



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DEPARTAMENTO DE IRRIGACIÓN Y MECÁNICA AGRÍCOLA

POSGRADO DE INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES PARA LA ESTIMACIÓN DE
COEFICIENTE KC Y ETAPAS FENOLÓGICAS EN MAÍZ

TESIS

QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA



DIRECCIÓN GENERAL ACADÉMICA
CENTRO DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXAMENES PROFESIONALES

PRESENTA:

LÓPEZ ROSANO JESÚS ISAAC

BAJO LA SUPERVISIÓN DE:

RAMÓN ARTEAGA RAMÍREZ, DR.



CHAPINGO, MÉXICO. AGOSTO DE 2017.

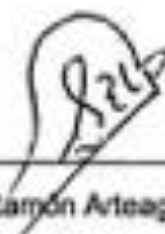


PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES PARA LA ESTIMACIÓN DE COEFICIENTE KC Y ETAPAS FENOLÓGICAS EN MAÍZ

Tesis realizada por el CC. López Rosano Jesús Isaac, bajo la supervisión del Comité Asesor indicado; ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN INGENIERIA

DIRECTOR:


Dr. Ramón Arteaga Ramírez

ASESOR:


Dr. Mario Alberto Vázquez Peña

ASESOR:


Dr. Agustín Ruiz García



AGRADECIMIENTOS

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)**, pues sin su apoyo no habría sido posible realizar mis estudios de posgrado.

A la **Universidad Autónoma Chapingo**, por ayudar a prepararme para afrontar los futuros retos que la vida me depare y por la oportunidad de poder alcanzar una más de mis tantas metas, por ser un hogar.

Al **Posgrado de Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua** por estos años en los que ha sido un apoyo para mi formación académica, por todas las vivencias.

A mi comité asesor integrado por: **Dr. Ramón Arteaga Ramírez, Dr. Mario Alberto Vázquez Peña y Dr. Agustín Ruiz García** por brindarme parte de su tiempo, sus recomendaciones en la elaboración del presente trabajo, por ser parte de mi formación profesional, por sus consejos y apoyo.

A **todos los profesores** que me ayudaron a mejorar este par de años.

A **mis amigos**, que me han acompañado a lo largo de mi vida, porque a su lado crecí como persona y por estar conmigo en todo momento.



DEDICATORIAS

A **Dios** por guiar mi camino y permitirme llegar a este punto, sin dejarme solo un instante de mi vida.

A mis padres, **María Guadalupe y José Aníbal**, por todo su esfuerzo para que yo pudiera llegar a esta meta, por cada uno de los consejos, por haberme educado con todos los valores que me forman hoy como persona y por todo este tiempo que han compartido conmigo Les estaré eternamente agradecido.

A mis hermanos **Jair y Aníbal**, por haber estado conmigo durante todos estos años, espero que esto sea uno de los ejemplos que puedan servirles para puedan cumplir sus metas y nunca se rindan ante los desafíos que se les presenten.

A mis abuelos **Laurencio y Conrada; Rogelio y Guadalupe (†)** por sus consejos y todo el apoyo y aliento, porque su presencia siempre estuvo conmigo.

A mis **tíos, primos y sobrinos**, muchos para mencionarlos a cada uno, ustedes saben que son parte importante de mi vida a los que les agradezco su apoyo, confianza, consejos y cada uno de los momentos que han compartido conmigo, con mención especial a mi tío **Víctor Espinoza (†)**, gracias por cada sonrisa contagiada, para ti donde sea que estés.

A **Betzaida Santiago** por estos años en los que has sido una persona especial, por ayudarme a ser una mejor persona, por todo ese afecto que me has sabido brindar, eres y serás uno de los pilares fundamentales de mis triunfos, gracias por tu paciencia y comprensión.

"La realización de este trabajo de investigación se realizó gracias al apoyo económico obtenido mediante el proyecto convencional titulado: Estimación de coeficientes Kc y predicción de rendimiento en maíz (Zea Mays L), con clave: 166501008."



DATOS BIOGRÁFICOS

El autor de la presente tesis es originario del Estado de México, nació el 31 de Enero de 1990 en el municipio de Texcoco, sus estudios de educación básica los realizó en la comunidad de Lomas de Cristo, la educación media superior en la preparatoria Oficial No. 100, egresó en el año 2014 del Departamento de Irrigación.

En el ámbito profesional trabajó en proyectos institucionales de la Universidad Autónoma Chapingo en el Laboratorio de Tecnologías Hídricas Innovadoras, como supervisor de obra en Rex de Jalisco y proyectista en SAYLE Texcoco.

En Agosto de 2015 ingresó al Programa de Posgrado de Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua en la Universidad Autónoma Chapingo, para realizar estudios de maestría en la línea de riego de precisión en maíz.



ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL	i
ÍNDICE DE CUADROS	iii
ÍNDICE DE FIGURAS	iv
RESUMEN GENERAL	vii
ABSTRACT	viii
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.1 Objetivo general	2
1.2 Objetivos específicos	3
1.3 Hipótesis.....	3
1.4 Capítulos de la Tesis.....	3
1.5 Literatura citada	5
CAPÍTULO 2: REVISIÓN DE LITERATURA	6
2.1 El Maíz	6
2.2 Maíz en el mundo actual y sus aportes	7
2.3 El maíz en México.....	8
2.4 Descripción Botánica	10
2.5 Descripción morfológica	10
2.6 Etapas de desarrollo del maíz.....	11
2.6.1 Etapas vegetativas.....	12
2.6.2 Etapas reproductivas	14
2.7 Conceptos básicos de Evapotranspiración	17
2.7.1 Evapotranspiración	17
2.7.2 Evaporación.....	17
2.7.3 Transpiración	18
2.7.4 ETo, Kc y ETc	20
2.7.5 Medición de la Evapotranspiración.....	22
2.7.6 Ecuación de Penman-Monteith	23
2.7.7 Ecuación final de Penman-Monteith	23
2.7.8 Calendarios del Riego.....	26
2.7.9 Balance de agua	26
2.8 Variables para el análisis de desarrollo en maíz.....	27



2.8.1 Índice de Área Foliar (IAF)	27
2.8.2 Cobertura Vegetal	28
2.9 Agricultura de precisión	28
2.10 Imagen Digital	29
2.11 Procesamiento digital de imágenes	29
2.11.1 Mejora de Imagen	30
2.11.2 Modelo RGB	30
2.11.3 Aplicaciones de la teledetección	30
2.12 Tratamiento digital de imágenes y la agricultura	31
2.13 Tratamiento de imágenes en relación al Kc	31
2.14 Modelación Matemática	31
2.14 Literatura Citada	33
RESUMEN	36
ABSTRACT	37
CAPÍTULO 3: APLICACIÓN DE LA ECUACIÓN DE PENMAN-MONTEITH PARA CALENDARIOS DE RIEGO EN MAÍZ	38
3.1 Introducción	38
3.2 Materiales y Métodos	39
3.3 Resultados y Discusión	46
3.4 Conclusiones	49
3.5 Literatura Citada	51
RESUMEN	52
ABSTRACT	53
CAPÍTULO 4: PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES PARA CÁLCULO DE COBERTURA VEGETAL Y DETERMINACIÓN DE ETAPAS FENOLÓGICAS EN MAÍZ	54
4.1 Introducción	54
4.2 Materiales y Métodos	55
4.2.1 Toma de fotografías en campo	56
4.2.2 Extracción de Porcentaje de Cobertura Vegetal	58
4.2.3 Determinación de Etapas de Crecimiento	64
4.3 Resultados y Discusión	66
4.4 Conclusiones	75
4.5 Literatura Citada	76



RESUMEN	77
ABSTRACT	78
CAPÍTULO 5: MODELACIÓN DE CRECIMIENTO DEL MAÍZ PARA LA OBTENCIÓN DE COEFICIENTES DE CULTIVO	79
5.1 Introducción	79
5.2 Materiales y Métodos	81
5.2.1 Toma de Datos en Campo	83
5.2.2 Procesamiento de Datos Experimentales	84
5.3 Resultados y Discusión	92
5.3.1 Etapa 1: Relación PCV/h	96
5.3.2 Etapa 2: Relación Kc/PCV	100
5.3.3 Kc único	100
5.3.4 Kc Dual	104
5.3.5 Uso de coeficientes modelados en Calendarios de Riego	108
5.4 Conclusiones	110
5.5 Literatura citada	112
CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES GENERALES.	114

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 3- 1: Muestra de valores de la ETo mediante Penman-Monteith	41
Cuadro 3- 2: Ejemplo de valores involucrados en el cálculo de la ETc.....	44
Cuadro 4- 1: Media y Desviación Estándar de Porcentaje de Cobertura Vegetal por cada tratamiento.	67
Cuadro 4- 2: ANOVA Tratamiento Temporal PCV.	69
Cuadro 4- 3: ANOVA Tratamiento 60% PCV.....	69
Cuadro 4- 4: ANOVA Tratamiento 80% PCV.....	69
Cuadro 4- 5: ANOVA Tratamiento 100% PCV.....	69
Cuadro 4- 6: ANOVA Tratamiento 120% PCV.....	69
Cuadro 4- 7: Prueba de Tukey para PCV.	70
Cuadro 4- 8: Duración de etapa inicial por tratamiento.....	71
Cuadro 4- 9: Día de término de Etapa de Desarrollo.	72



Cuadro 4- 10: Día de término de Etapa de Mediados de Temporada.....	73
Cuadro 5- 1: Criterios de ajuste para eficiencia Nash-Sutcliffe.....	91
Cuadro 5- 2: Media y Desviación Estándar de Porcentaje de Cobertura Vegetal por tratamiento.....	92
Cuadro 5- 3: Media y Desviación Estándar de altura de planta por cada tratamiento.....	93
Cuadro 5- 4: ANOVA Tratamiento 60% de altura de planta.....	94
Cuadro 5- 5: ANOVA Tratamiento 80% de altura de planta.....	94
Cuadro 5- 6: ANOVA Tratamiento 100% de altura de planta.....	94
Cuadro 5- 7: ANOVA Tratamiento 120% de altura de planta.....	94
Cuadro 5- 8: Prueba de Tukey para altura de planta.	95
Cuadro 5- 9: Pruebas de calibración de Modelos.	108
Cuadro 5- 10: Tiempos de riego calculados.	110

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2- 1: Centro de origen del maíz.	7
Figura 2- 2: Volumen de producción anual de maíz.....	8
Figura 2- 3: Indicadores de producción de maíz en México.....	9
Figura 2- 4: Exportaciones e Importaciones de Maíz.....	9
Figura 2- 5: Partes del Maíz.....	11
Figura 2- 6: Germinación a etapa V5 de maíz..	13
Figura 2- 7: Etapa de transición del maíz.	14
Figura 2- 8: Mazorca del maíz en etapa R3.....	15
Figura 2- 9: Mazorca del maíz en etapa R5.....	16
Figura 2- 10: Desarrollo de los granos de maíz. Fuente:.....	17
Figura 2- 11: Esquema de ETo y ETc.....	22
Figura 3- 1: Temperaturas observadas durante el ciclo del cultivo.	40
Figura 3- 2: Viento observado durante el ciclo fenológico.	40
Figura 3- 3: Riego por goteo en parcela de 60% y parcela de temporal.	45
Figura 3- 4: Parcela de maíz al 60% y 100% de la ETo.....	46



Figura 3- 5: ETo calculada con datos de la Estación Meteorológica de la Universidad Autónoma Chapingo.	46
Figura 3- 6: Coeficiente Kcb y Ke.	47
Figura 3- 7: Comparación ETo y ETc.....	48
Figura 3- 8: Láminas de agua aplicadas y precipitación.	49
Figura 4- 1: Seguimiento de plantas de maíz.	57
Figura 4- 2: Tripie, bastón y marco para seguimiento fotográfico.	57
Figura 4- 3: Proceso de corrección de líneas y perspectiva.	59
Figura 4- 4: Diagrama de flujo del programa para cálculo de PCV.....	60
Figura 4- 5: Proceso de extracción de Porcentaje de Cobertura Vegetal.	63
Figura 4- 6: Diferentes etapas de Crecimiento en maíz FAO 56.	66
Figura 4- 7: Porcentaje de cobertura vegetal por tratamiento.....	68
Figura 4- 8: Determinación de Etapa inicial de Crecimiento.	71
Figura 4- 9: Determinación de la Etapa de Desarrollo de Cultivo.	72
Figura 4- 10: Determinación de la etapa de Medios de Temporada.	73
Figura 4- 11: Etapas de Desarrollo en los Diferentes Tratamientos.....	74
Figura 5- 1: Parcela Experimental.....	82
Figura 5- 2: Tratamiento al 80% de la ETo.	82
Figura 5- 3: Toma de datos en campo.	83
Figura 5- 4: Porcentaje de Cobertura Vegetal de tratamientos.	84
Figura 5- 5: Altura de planta de tratamientos.....	85
Figura 5- 6: Valores de Kc Único por tratamientos.	87
Figura 5- 7: Valor de Kc Dual por tratamientos.....	88
Figura 5- 8: De izquierda a derecha, tratamiento de 60%, Temporal y 100% de la ETo.	88
Figura 5- 9: Modelo PCV/h tratamiento 60%.	96
Figura 5- 10: Modelo PCV/h tratamiento 80%.....	96
Figura 5- 11: Modelo PCV/h tratamiento 100%.....	97
Figura 5- 12: Modelo PCV/h tratamiento 120%.....	97
Figura 5- 13: Modelo 2 PCV/h tratamiento 60%.....	97
Figura 5- 14: Modelo 2 PCV/h tratamiento 80%.....	98



Figura 5- 15: Modelo 2 PCV/h tratamiento 100%.....	98
Figura 5- 16: Modelo 2 PCV/h tratamiento 120%.....	98
Figura 5- 17: Valores Porcentaje de Cobertura Vegetal obtenidos de los modelos.	99
Figura 5- 18: Modelo Kc Único/PCV tratamiento 60%.	100
Figura 5- 19: Modelo Kc Único/PCV tratamiento 80%.	100
Figura 5- 20: Modelo Kc Único/PCV tratamiento 100%.	101
Figura 5- 21: Modelo Kc Único/PCV tratamiento 120%.	101
Figura 5- 22: Modelo 2 Kc Único/PCV tratamiento 60%.	101
Figura 5- 23: Modelo 2 Kc Único/PCV tratamiento 80%.	102
Figura 5- 24: Modelo 2 Kc Único/PCV tratamiento 100%.	102
Figura 5- 25: Modelo 2 Kc Único/PCV tratamiento 120%.	102
Figura 5- 26: Valores Kc Único obtenidos de los modelos.....	103
Figura 5- 27: Modelo Kc Dual/PCV tratamiento 60%.	104
Figura 5- 28: Modelo Kc Dual/PCV tratamiento 80%.	104
Figura 5- 29: Modelo Kc Dual/PCV tratamiento 100%.	105
Figura 5- 30: Modelo Kc Dual/PCV tratamiento 120%.	105
Figura 5- 31: Modelo 2 Kc Dual/PCV tratamiento 60%.	105
Figura 5- 32: Modelo 2 Kc Dual/PCV tratamiento 80%.	106
Figura 5- 33: Modelo 2 Kc Dual/PCV tratamiento 100%.	106
Figura 5- 34: Modelo 2 Kc Dual/PCV tratamiento 120%.	106
Figura 5- 35: Valores Kc Dual obtenidos de los modelos.	107
Figura 5- 36: Volúmenes de agua con etapas FAO 56.	109
Figura 5- 37: Volúmenes de agua con etapas determinadas a partir fotografías.	109



RESUMEN GENERAL

PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES PARA LA ESTIMACIÓN DE COEFICIENTE Kc Y ETAPAS FENOLÓGICAS EN MAÍZ

AUTOR: López Rosano Jesús Isaac
DIRECTOR: Dr. Ramón Arteaga Ramírez

Esta publicación fue enfocada al estudio de la aplicación del Procesamiento de Imágenes por medio de visión por computadora, obtenidas a partir de cámaras digitales, dichas imágenes fueron tomadas durante todo el ciclo de cultivo de maíz, aunado a la toma de variables de campo, como altura de planta y largo y ancho de hojas. Para poder realizar estas mediciones se empleó un tripie adaptado con bastones Bluetooth donde se conectaba la cámara celular para tomar fotos de un área delimitada por un marco de 1.1x1.1m y así tener control de las plantas y el terreno monitoreado. El conjunto de datos se sometió a procesamiento, se destaca el uso del programa VisualStudio con Open CV como base para el cálculo de Cobertura Vegetal que se extrajo de las fotografías, la ecuación de Penman-Montieth para la ETo y coeficientes Kc además de la determinación de IAF a partir de métodos de muestreo destructivo y no destructivo, estos valores fueron analizados de acuerdo a parámetros mencionados en el Boletín 56 de la FAO para definir etapas de crecimiento, además se buscaron relaciones entre los datos generados de las cuales se encontraron modelos que permiten calcular el coeficiente Kc de la zona a partir de la altura de planta, resultados que reflejan las condiciones climáticas locales, lo que permite la generación de calendarios de riego, lo que ayudará en una mejor aplicación del agua y en la obtención de mayores rendimientos, en zonas con características climáticas similares, al ocupar una técnica muy precisa y más económica en comparación al uso de otras tecnologías.

Palabras Clave: Imagen Digital, Visión, Coeficiente Kc, Etapa Fenológica



ABSTRACT

DIGITAL IMAGE PROCESSING FOR THE ESTIMATION OF Kc COEFFICIENTS AND PHENOLOGICAL STAGES IN MAIZE

AUTOR: López Rosano Jesús Isaac
DIRECTOR: Dr. Ramón Arteaga Ramírez

This paper was focused on the study of the application of image processing through computer vision, obtained from digital cameras; these images were taken during the entire corn crop cycle, coupled with the recording of field variables, such as plant height and leaf length and width. In order to perform these measurements, we used a tripod adapted with Bluetooth sticks where a cell phone camera was connected to take pictures of a delimited area by a 1.1 x 1.1 m frame and thus have control of the plants and monitored ground. The dataset was processed, highlighted by the use of VisualStudio with Open CV software as the basis for the plant cover calculation extracted from photos, the Penman-Montieth equation for ETo and Kc coefficients, and the determination of LAI (Leaf Area Index) from destructive and non- destructive sampling methods; these values were analyzed according to parameters mentioned in FAO Bulletin 56 to define growth stages. We also searched for relationships between the generated data, finding models that allow calculating zone Kc coefficients from plant height, results that reflect local weather conditions; this, in turn, allows generating irrigation calendars, which will help provide a better application of water and obtain greater yields in areas with similar weather characteristics, by using a very precise and cheaper technique compared to other technologies.

Keywords: Digital image, Vision, Kc coefficients, Phenological stages



CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN GENERAL

Los distritos de riego de México son el principal factor de desarrollo; en condiciones de baja disponibilidad de agua, se requiere de una estrategia integral del manejo del agua que permita mejorar su productividad. En condiciones de disponibilidad limitada de agua, los agricultores deben adaptarse a las restricciones en la dotación asignada por los administradores del riego e implementar acciones que reduzcan el estrés hídrico de los cultivos (Sifuentes, et. al. 2005). Para mejorar la eficiencia de riego de un distrito se requiere tanto de acciones estructurales como no estructurales. Las segundas son acciones que no requieren de inversiones económicas considerables, y que pueden ser igual o más efectivas que las primeras; básicamente, consisten en un cambio en la manera de operar el riego, apoyado en técnicas aplicables a las condiciones específicas de cada región (Sifuentes, et. al. 2005). Uno de los aspectos muy importantes en los que se puede atacar el problema de escasez de agua es el calendario o programa de riegos que proporciona la información sobre el número de riegos que se van a aplicar al cultivo, los intervalos entre riegos, las láminas de requerimiento de riego y las láminas netas de riego. En el programa de riegos se combinan las características de retención de agua por los suelos y los de requerimiento de agua por los cultivos (ET) (Aguilera y Martínez, 1996). Se conoce como evapotranspiración (ET) 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 (Allen, et. al., 2006). Para poder realizar el cálculo de la ET es necesario contar con el valor Kc del cultivo, este coeficiente integra las diferencias en la evaporación en el suelo y en la tasa de transpiración del cultivo, entre el cultivo y la superficie del pasto de referencia. El coeficiente del cultivo integra los efectos de las características que distinguen a un cultivo típico de campo del pasto de referencia, el cual posee una apariencia uniforme y cubre completamente la superficie del suelo. En consecuencia, distintos cultivos poseerán distintos valores de coeficiente de cultivo. Por otra parte, las características del cultivo que varían durante el



crecimiento del mismo también afectarán al valor del coeficiente Kc (Allen, et. al., 2006).

La forma convencional para la determinación del coeficiente de cultivo es mediante el uso de imágenes de satélite de las cuales es posible estimar índices de vegetación (IV), como el de vegetación de diferencias normalizadas (NDVI) y el de vegetación ajustado para suelo (SAVI), que permiten monitorear el desarrollo de los cultivos y estimar con precisión la variabilidad espacial y temporal del Kc, (Castañeda, et. al. 2005), con una combinación algebraica de la reflectividad espectral de la cubierta vegetal en las bandas del rojo e infrarrojo cercano (Cuesta, et. al. 2005). El problema de esta metodología es que el uso de las imágenes satelitales se limita a la disponibilidad de estas y a la periodicidad en que son tomadas, puesto que en algunos casos llegan a ser tomadas cada 30 días, lo que deja con la incertidumbre sobre los datos no tomados durante ese lapso de tiempo, además de los altos costos que en algunos casos se presentan. El presente trabajo realizó la estimación del coeficiente de cultivo “Kc” de acuerdo a la metodología de Escarabajal, et. al. (2015), la cual permitió determinar de mejor forma el coeficiente mediante un seguimiento del cultivo durante todo su ciclo fenológico, encontrando una ecuación que permite su determinación, todo esto mediante el uso de fotografías digitales, su pertinente tratamiento mediante los software VisualStudio y OpenCV y la aplicación de modelación para la obtención de resultados, trabajo aplicado al cultivo del maíz, por ser uno de los cultivos más representativos de la República Mexicana.

1.1 Objetivo general

Estimar el coeficiente de cultivo Kc y etapas fenológicas en maíz mediante segmentación de imágenes obtenidas a partir de cámaras digitales.



1.2 Objetivos específicos

Determinar el valor del coeficiente Kc Dual en maíz necesarios para la generación de calendarios de riego, basados en la ecuación de Penman-Monteith, para aplicación de láminas de agua a distintos porcentajes del valor de la ETo.

Obtener el Porcentaje de Cobertura Vegetal mediante tratamiento de imágenes digitales en VisualStudio y OpenCV para su aplicación en la determinación de la duración de etapas fenológicas en maíz.

Generar modelos matemáticos que permitan predecir el valor del coeficiente Kc y comparar los volúmenes de agua obtenidos con los datos teóricos de la FAO para conocer las variaciones de los resultados en la generación de calendarios de riego.

1.3 Hipótesis

El tratamiento de imágenes digitales de un cultivo mediante software especializado permite obtener la duración de etapas fenológicas y modelos matemáticos que se pueden relacionar para estimar el valor del coeficiente de cultivo Kc para una mejor determinación de los requerimientos hídricos de la planta, analizando información de cobertura vegetal, altura de la planta y evapotranspiración.

1.4 Capítulos de la Tesis

El Capítulo 3 de este documento de tesis está enfocado al procesamiento de datos obtenidos de la estación meteorológica como punto de partida para la generación de los calendarios de riego por el método de Allen *et. al.* (2006) en el Boletín 56 de la FAO, empleando la metodología del balance con el coeficiente Kc Dual, al aplicar láminas de la ETo al 60%, 80%, 100% y 120%.

El Capítulo 4 presenta la metodología empleada para la extracción del Porcentaje de Cobertura Vegetal a partir de un programa generado en VisualStudio con OpenCV, además de que con estos valores y otras características del cultivo que



se mencionan en el Boletín 56 se generaron etapas de cultivo que consideraban las condiciones locales.

El Capítulo 5 hace uso de los coeficientes Kc Duales generados en los calendarios de riego y los Kc Únicos calculados de acuerdo a lo establecido en el Boletín 56 para poder generar modelos que mostrarán la relación de los coeficientes mencionados con el Porcentaje de Cobertura Vegetal y la altura para poder obtener coeficientes que representen las condiciones de la zona y así generar calendarios de riego adecuados.



1.5 Literatura citada

- Aguilera Contreras, M., Martínez Elizondo, R. (1996). Relaciones Agua Suelo Planta Atmosfera. UCh. México.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo. FAO. Roma.
- Castañeda Ibáñez, Carlos R; Martínez Menes, Mario; Pascual Ramírez, Fermín; Flores Magdaleno, Héctor; Fernández Reynoso Demetrio S. (2005) Estimación de coeficientes de cultivo mediante sensores remotos en el distrito de riego río yaqui, Sonora, México. México.
- Cuesta, A.; Montoro, A.; Jochum, A.M.; López, P. (2005). Metodología operativa para la obtención del coeficiente de cultivo desde imágenes de satélite. Universidad de Castilla la Mancha, España.
- Escarabajal Henarejos, D., Molina Martínez, J.M., Fernández Pacheco, D.G., Cavas Martínez, F., García Mateos G. (2015) Digital photography applied to irrigation management of Little Gem lettuce. Agricultural Water Management. 151. España. 148-157.
- Sifuentes Ibarra, Ernesto; Macías Cervantes, Jaime; Quintana Quiroz, José Guadalupe; Corral Vega, Rosendo Abel; González Calderón, Víctor Manuel; Ojeda Bustamante, Waldo. (2005). Tecnologías de riego bajo condiciones de escasez de agua en maíz. México.



CAPÍTULO 2: REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 El Maíz

Citando el trabajo de Serratos (2009) el maíz es el cereal de los pueblos y culturas del continente americano. Las más antiguas civilizaciones de América, desde los olmecas y teotihuacanos en Mesoamérica, hasta los incas y quechuas en la región andina de Sudamérica, estuvieron acompañadas en su desarrollo por esta planta. Es el cereal que más importancia ha tenido en varios sectores de la economía a escala mundial durante el siglo XX y en los inicios del XXI. En los países industrializados, el maíz se utiliza principalmente como forraje, materia prima para la producción de alimentos procesados y, recientemente, para la producción de etanol. Por el contrario, en algunos países de América Latina y, cada vez más en países africanos, un gran porcentaje del maíz que se produce o importa se destina al consumo humano. En este sentido, el maíz ha sido y sigue siendo un factor de sobrevivencia para los campesinos e indígenas que habitan en la mayoría de los países del continente americano.

De acuerdo a Serratos (2009), que retoma ideas de Vavilov, se ha definido como “centro de origen” de plantas cultivadas a una zona geográfica en donde se encuentra un máximo de diversidad del cultivo y en el que coexisten o coexistieron sus parientes silvestres, tomando en cuenta varios aspectos para definir a los centros de origen de los cultivos agrícolas: 1) se trata de áreas geográficas en las que éstos se siguen cultivando; 2) se asocian a grandes extensiones de territorio y; 3) “los focos primarios del origen de los cultivos se encuentran en las regiones montañosas”. Según sus observaciones, el origen del maíz junto con aproximadamente 49 especies más, está en el Centro Primario VII (Figura 2-1) que se localiza desde el centrosur de México, hasta la mitad del territorio de Centroamérica. Desde sus primeras exploraciones en México, para Vavilov fue evidente que *Euchlaena*, género en el que antiguamente se clasificó al teocintle, era el pariente silvestre más cercano del maíz. (Serratos, 2009).

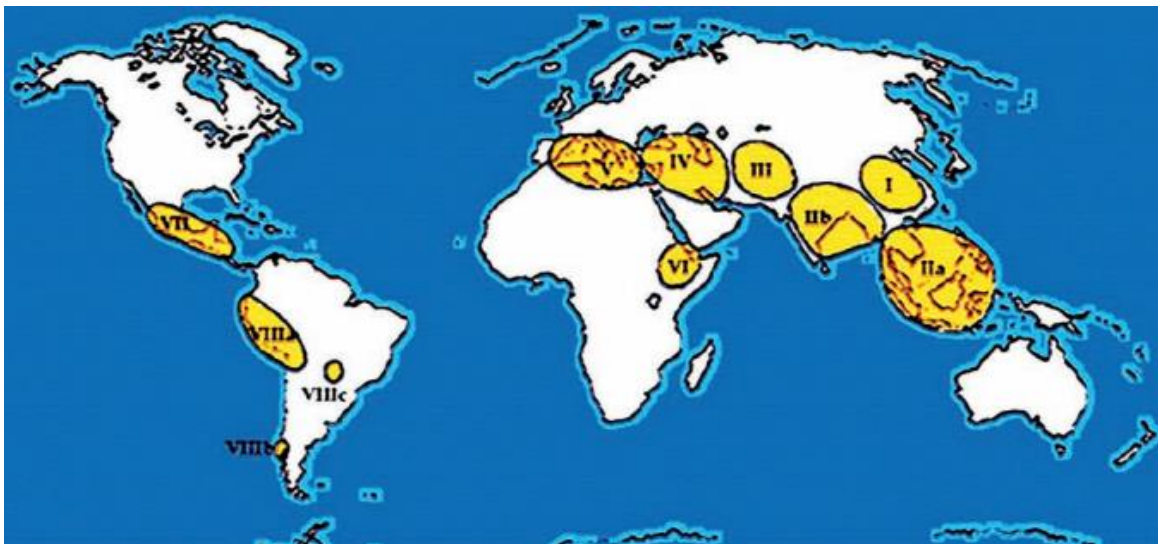


Figura 2- 1: Centro de origen del maíz.

2.2 Maíz en el mundo actual y sus aportes

Asturias (2004) afirma que debido a su productividad y adaptabilidad, el cultivo del maíz se ha extendido rápidamente a lo largo de todo el planeta después de que los españoles y otros europeos exportaran la planta desde América durante los siglos XVI y XVII. El maíz es actualmente cultivado en la mayoría de los países del mundo y es la tercera cosecha en importancia (después del trigo y el arroz). Al momento, los principales productores de maíz son Estados Unidos, la República Popular de China y Brasil. Independientemente de su uso industrial, el maíz constituye un componente importante de la vida de los pueblos de América. Por ser el sustento de la dieta alimenticia de los pueblos indígenas y mestizos de nuestro continente, este cultivo ha dado lugar a una serie de sistemas agrícolas muy variados.

Abundante en carbohidratos, tiene también proteínas. Mezclado con frijol (rico en proteínas, hierro y otros minerales) y calabaza (que posee alto contenido de grasas y proteínas), suministra prácticamente todas las vitaminas necesarias para el hombre, integra una nutrición completa y balanceada; sobre todo si se le adicionan proteínas de origen animal y muy diversas frutas, verduras y tubérculos



procedentes de la milpa y los huertos familiares y otros modelos agrícolas tradicionales (Asturias, 2004).

Otra ventaja poco conocida del maíz es que antes de molerlo para hacer las tortillas en el caso de Mesoamérica o el mote en Sudamérica, se lo remoja en agua con cal y de ese modo se lo enriquece con calcio. Por ello, en las zonas de alto consumo de maíz son raros los casos de raquitismo. El maíz también es ampliamente utilizado en medicina popular contra la hepatitis, la hipertensión, la diabetes, la menorragia, los padecimientos renales, los cálculos, el reumatismo, las verrugas, los tumores y otros padecimientos, en forma de cataplasmas, cocciones, ungüentos y emplastos. La infusión de los denominados pelos de choclo o cabellos de elote, como también es conocido, es un excelente diurético y se usa en caso de trastornos renales (Asturias, 2004).

2.3 El maíz en México

De acuerdo al Atlas agroalimentario (SIAP, 2016) las estadísticas del maíz para grano, en 2015, la superficie con el cultivo fue mayor en 174 mil hectáreas respecto a las del año pasado, con un total de 24, 694, 046 toneladas de rendimiento (Figura 2-2).

Rank	Entidad federativa	Volumen (toneladas)	Variación (%) 2014-2015
	Total nacional	24,694,046	6.1
1	Sinaloa	5,380,042	45.9
2	Jalisco	3,338,766	-3.8
3	México	2,036,339	9.7
4	Michoacán	1,721,658	-11.0
5	Chihuahua	1,436,560	4.6
6	Guanajuato	1,361,922	-4.1
7	Veracruz	1,212,089	-4.2
8	Chiapas	1,067,994	-10.1
9	Tamaulipas	1,007,931	91.2
10	Puebla	1,002,155	4.3
	Resto	5,128,590	-8.2

Figura 2- 2: Volumen de producción anual de maíz. Fuente: SIAP, 2016.



En comparación al año 2015, hubo cambios positivos con respecto al área sembrada, rendimientos y precio del producto. (Figura 2-3).

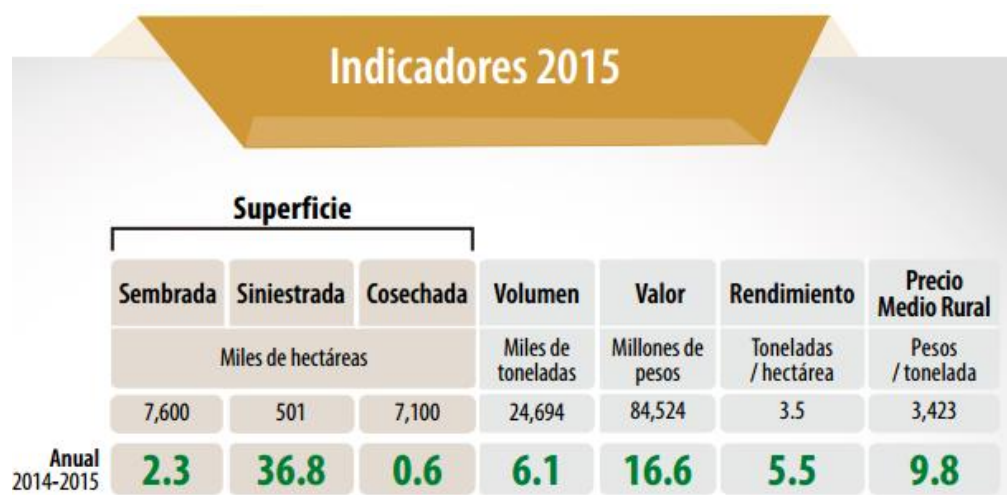


Figura 2- 3: Indicadores de producción de maíz en México. Fuente: SIAP, 2016.

En el ámbito internacional las estadísticas ponen a Estados Unidos como el primer productor mundial con una producción de 353, 699, 441 toneladas, mientras que México se coloca en el 7°. En cuanto a exportaciones e importaciones los datos se resumen en la Figura 2-4 (SIAP, 2016).

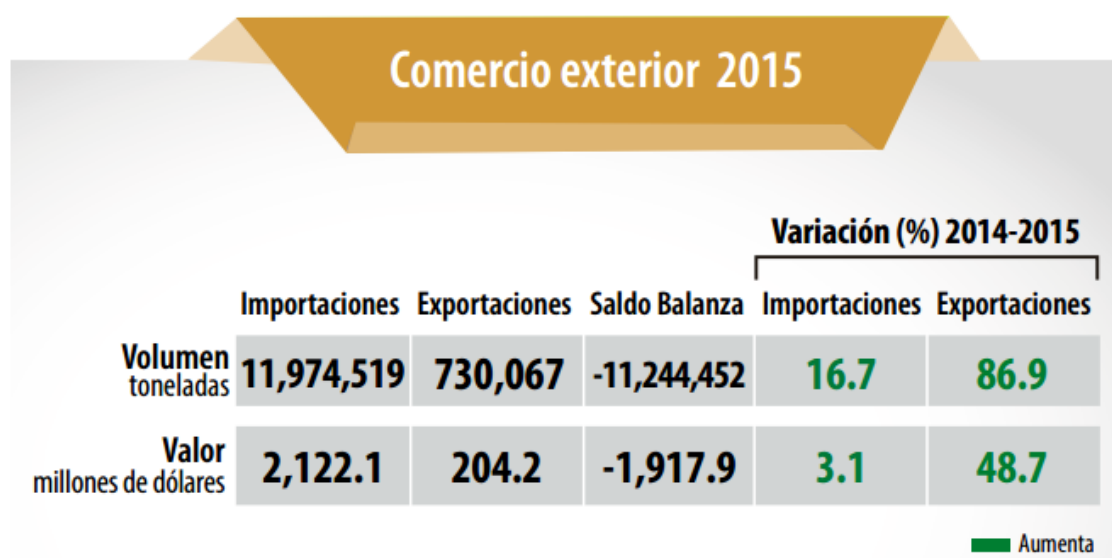


Figura 2- 4: Exportaciones e Importaciones de Maíz. Fuente: SIAP, 2016.



2.4 Descripción Botánica

El maíz es una planta hermafrodita, lo que significa que produce flores masculinas y femeninas separadas en la misma planta. La panoja (flor masculina) produce polen, mientras que la mazorca (flor femenina) produce los óvulos que se convierten en la semilla.

El maíz es una monocotiledónea perteneciente a la familia Gramínea, Tribu Maydae, con dos géneros: *Zea* ($2n=20$) y *Tripsacum* ($2n=36$). El género *Zea* tiene además de *Z. mays* (maíz) 4 otras especies conocidas vulgarmente como teosinte (*Z. mexicana*, *Z. luxurians*, *Z. diploperennis* y *Z. perennis*). Es una gramínea anual, robusta, de 1-4 m de altura (Bolaños y Edmeades, 1993).

2.5 Descripción morfológica

El cultivo del maíz es de régimen anual. Su ciclo vegetativo oscila entre 80 y 200 días, desde la siembra hasta la cosecha. La estructura del maíz, según Antonio (2014) es la siguiente (Figura 2-5):

(1) Planta. Existen variedades enanas de 40 a 60 cm de altura, hasta las gigantes de 200 a 300 cm. El maíz común no produce macollos.

(2) Tallo. Es leñoso y cilíndrico. El número de los nudos varía de 8 a 25, con un promedio de 16.

(3) Hoja. La vaina de la hoja forma un cilindro alrededor del entrenudo, pero con los extremos desunidos. Su color usual es verde pero se pueden encontrar hojas rayadas de blanco y verde o verde y púrpura. El número de hojas por planta varía entre 8 y 25.

(4) Sistema radicular

(5) Raíz seminal o principal. Está representada por un grupo de una a cuatro raíces, que pronto dejan de funcionar. Se originan en el embrión. Suministra nutrientes a las semillas en las dos primeras semanas.



(6) Raíces adventicias. El sistema radicular de una planta es casi totalmente de tipo adventicio. Puede alcanzar hasta dos metros de profundidad.

(7) Raíces de sostén o soporte. Este tipo de raíces se originan en los nudos, cerca de la superficie del suelo. Favorecen una mayor estabilidad y disminuyen problemas de acame.

(8) Raíces aéreas. Son raíces que no alcanzan el suelo. El maíz es monoico, es decir, tiene flores masculinas y femeninas en la misma planta. Las flores son estaminadas o pistiladas. Las flores estaminadas o masculinas están representadas por la espiga. Las pistiladas o femeninas son las mazorcas.

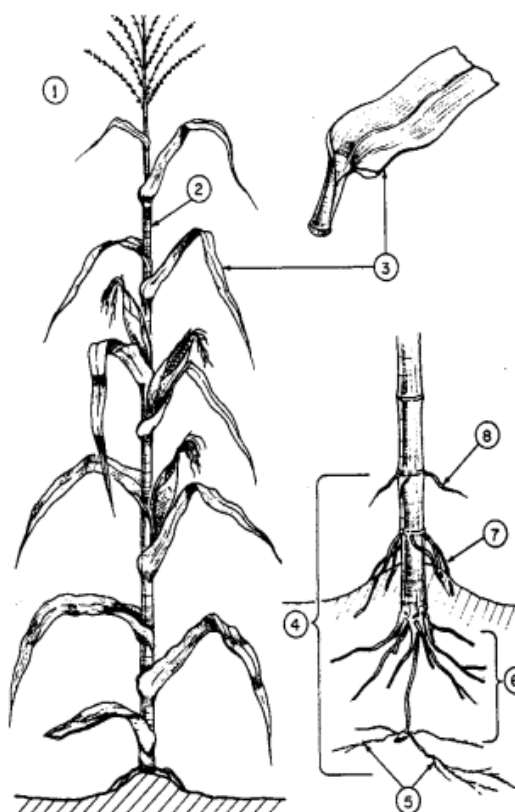


Figura 2- 5: Partes del Maíz.

2.6 Etapas de desarrollo del maíz

Endicott, *et. al.* (2015) realizó un estudio para la descripción del maíz, desarrollado en la Universidad del Estado de Iowa, dividiendo el desarrollo en etapas vegetativas (V) y reproductivas (R).



2.6.1 Etapas vegetativas

Endicott *et. al.* (2015) dice que las etapas vegetativas (V) se caracterizan por la presencia del cuello de una hoja en hojas emergidas. La hoja de maíz tiene tres partes principales: el cuerpo, la vaina y el cuello. El cuerpo es la parte plana de la hoja que intercepta la luz solar; la vaina es la parte que se envuelve alrededor del tallo; y el cuello es la línea de demarcación entre el cuerpo y la vaina, normalmente con una curva definida. Las etapas vegetativas del desarrollo comienzan con la emergencia (VE) y continúan de forma numérica con cada hoja sucesiva hasta que emerge la panoja (VT). La descripción de las etapas vegetativas es la siguiente:

- Germinación y emergencia (VE)

Después de su siembra, una semilla de maíz absorberá aproximadamente del 30 al 35 por ciento de su peso en agua. Para que la radícula comience la elongación, las temperaturas del suelo deben ser propicias para el proceso de germinación (10 °C). Poco después de que la radícula emerge, de tres a cuatro raíces adicionales emergen de la semilla. Estas raíces y la radícula forman el sistema de raíces seminales que actúa en la absorción de agua y algunos nutrientes para la plántula. La mayoría de los nutrientes para la plántula son provistos por las proteínas y los almidones hidrolizados del endospermo. El desarrollo radicular de coronas y principal (permanente) se inicia en la VE. El mesocotilo, o primer nodo interno, se alarga y empuja la punta del coleóptilo hacia la superficie del suelo. Cuando el coleóptilo rompe la superficie del suelo, se ha producido la emergencia (VE). Las hojas embrionarias crecen a través del coleóptilo, y la primera hoja verdadera (con punta redondeada) emerge y se cuenta como la hoja de la V1 durante las etapas tempranas.

- Etapas vegetativas tempranas (de V1 a V5)

Durante este período, hay una mínima elongación del tallo (nodo interno). Antes de la V5, el punto de crecimiento está por debajo de la superficie del suelo, y se



inician todos los brotes de la mazorca y las hojas. Los brotes que se desarrollan en los nodos por encima del suelo pueden diferenciarse en el tejido reproductivo (mazorcas o elotes), y los brotes que se desarrollan por debajo del suelo pueden diferenciarse en el tejido vegetativo (vástagos o retoños). Las raíces permanentes se desarrollan en cinco nodos por debajo de la superficie, una en la superficie del suelo, y potencialmente uno o más nodos por encima de la superficie del suelo, denominadas raíces “soporte” o “ancla”. Figura 2-6.



Figura 2- 6: Germinación a etapa V5 de maíz. Fuente: Universidad Estatal de Iowa.

- Etapas vegetativas intermedias (de V6 a V11)

Durante estas etapas, las plantas de maíz comienzan un período de elongación del nodo interno muy rápida. El punto de crecimiento se desplaza por encima de la superficie del suelo alrededor de la V6. Como resultado de este rápido crecimiento, las tres o cuatro hojas más bajas, incluida la primera hoja verdadera, pueden desprenderse del tallo y desintegrarse. En el “cinturón de maíz” de los Estados Unidos, la cantidad de hileras de granos alrededor del elote se establece aproximadamente en la V7, momento en el que los vástagos o brotes de la mazorca son visibles, como también la panoja. Siempre habrá un número par de hileras como resultado de la división celular. La mayoría de los híbridos de madurez media promedian 14, 16 o 18 hileras de granos, pero pueden ser menos o más. Los números de hileras inferiores están muy relacionados con los híbridos de madurez temprana.



- Etapa de transición (de VT a R1)

En este momento, el brote de la mazorca superior se convierte en dominante. La VT ocurre cuando la última rama de panoja ha emergido y se extiende hacia afuera. La VT se superpone con la R1 cuando los estigmas visibles aparecen antes de que la panoja emerja completamente. El desarrollo vegetativo ahora está completo: la planta casi alcanza la máxima altura; las células del tallo continúan lignificándose, lo que mejora la fuerza del tallo; y la planta pasa al desarrollo reproductivo (R1). Figura 2-7.

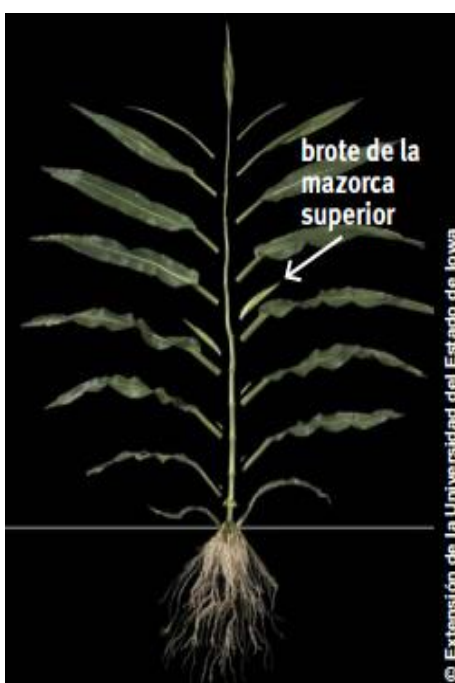


Figura 2- 7: Etapa de transición del maíz. Fuente: Universidad Estatal de Iowa.

2.6.2 Etapas reproductivas

Según Endicott, *et. al.* (2015) las etapas reproductivas se caracterizan por la emergencia de granos en desarrollo en la mazorca, excepto por la primera etapa reproductiva (R1), que se identifica únicamente por la emergencia de estigmas de las chalas. Hay seis etapas reproductivas que describe de la siguiente manera:

- Etapa de aparición de los estigmas (R1)

La R1 ocurre cuando los estigmas son visibles fuera de las chalas. Una vez que un grano de polen cae en un estigma (polinización), se forma un tubo polínico, y



lleva alrededor de 24 horas hacer crecer el estigma hacia abajo hasta el óvulo. Una vez que alcanza el óvulo, se produce la fertilización y el óvulo se convierte en un grano. En esta etapa, los granos están casi completamente envueltos en glumas (sépalos), y son blancos con un contenido claro y acuoso.

- Etapa de “blíster” (R2)

La R2 ocurre de 10 a 14 días después de la aparición de los estigmas y se la denomina la etapa de “blíster”. Los granos en desarrollo tienen alrededor del 85 por ciento de humedad, se asemejan a un blíster, y el endospermo y el fluido interno son claros. A medida que los granos se expanden, las glumas se vuelven menos visibles. En esta etapa, la mazorca alcanza la máxima longitud. Los estigmas de granos fertilizados se secan y se vuelven de color marrón.

- Etapa de grano lechoso (R3)

La R3 ocurre de 18 a 22 días después de la aparición de los estigmas cuando los granos comienzan a mostrar el color final, que es amarillo o blanco en la mayoría de los híbridos dentados, o con variaciones de blanco o naranja amarillento en los híbridos indios. Los granos tienen alrededor del 80 por ciento de humedad, el líquido interior es blanco lechoso por el almidón (endospermo) acumulado, y llenan totalmente el espacio entre las hileras de granos, Figura 2-8.



Figura 2- 8: Mazorca del maíz en etapa R3. Fuente: Universidad Estatal de Iowa.



- Etapa de grano pastoso (R4)

La R4 ocurre de 24 a 28 días después de la aparición de los estigmas. Los granos tienen alrededor del 70 por ciento de humedad, y el líquido interior se espesa y forma una consistencia pastosa, como de masa. Los granos obtienen su color final y alrededor de la mitad de su peso seco maduro. Las chalas comienzan a volverse marrones en los bordes exteriores. El estrés puede reducir la tasa de acumulación de almidón y el peso del grano promedio.

- Etapa de grano dentado (R5)

La R5 ocurre de 35 a 42 días después de la aparición de los estigmas. Los granos están compuestos de una capa externa de almidón duro que rodea un núcleo suave de almidón. Cuando el núcleo más suave de almidón comienza a perder humedad y se reduce, se forma una hendidura en la parte superior del grano, Figura 2-9.



Figura 2- 9: Mazorca del maíz en etapa R5. Fuente: Universidad Estatal de Iowa.

- Madurez fisiológica (R6)

La R6 ocurre de 60 a 65 días después de la aparición de los estigmas. La humedad de los granos es de aproximadamente el 35 por ciento, los granos se consideran maduros fisiológicamente y han alcanzado su peso seco máximo. La línea lechosa, o capa de almidón duro, ha avanzado hasta la punta del grano. Las células en la punta del grano pierden su integridad y caen, y hacen que se forme una capa de abscisión de marrón a negra, generalmente denominada



“capa negra”. Una vez que se forma la capa negra, el almidón y la humedad no pueden ingresar o salir más del grano, con la excepción de la pérdida de humedad a través de la evaporación. La formación de la capa negra avanza desde la punta de la mazorca hacia la base. Si la planta de maíz muere prematuramente (antes de la madurez fisiológica), la capa negra aún se forma, pero puede llevar más tiempo, y el rendimiento puede reducirse. Figura 2-10.



Figura 2- 10: Desarrollo de los granos de maíz. Fuente: Universidad Estatal de Iowa.

2.7 Conceptos básicos de Evapotranspiración

2.7.1 Evapotranspiración

Se conoce como evapotranspiración (ET) 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 (Allen *et. al.*, 2006).

2.7.2 Evaporación

La evaporación es el fenómeno físico en el que el agua pasa de líquido a vapor, pudiendo añadir la sublimación (sólido a vapor) desde la nieve y el hielo de acuerdo a Sánchez (2001), que de igual manera afirma que se produce evaporación desde:

- La superficie del suelo y la vegetación inmediatamente después de la precipitación
- Desde las superficies de agua (ríos, lagos, embalses)



- Desde el suelo, agua infiltrada que se evapora desde la parte más superficial del suelo.

Puede tratarse de agua recién infiltrada o, en áreas de descarga, de agua que se acerca de nuevo a la superficie después de un largo recorrido en el subsuelo.

La importancia de la evaporación radica en que es la fuente primordial de toda el agua que se precipita en las zonas continentales y uno de los factores vitales de la transferencia continentales y uno de los factores vitales de la transferencia en gran escala del agua y su vapor, entre océanos y continentes, es la evaporación que ocurre en los mares y océanos. Por otra parte, debido a las significativas pérdidas que por este fenómeno se tienen, su estimación es necesaria en todos los estudios hidrológicos relativos a la distribución de las aguas y en los estudios de balance y operación de almacenamientos (U. De Sonora, 2007).

2.7.3 Transpiración

La transpiración es el fenómeno biológico por el que las plantas pierden agua a la atmósfera. Toman agua del suelo a través de sus raíces, una pequeña parte para su crecimiento y el resto lo transpiran (Sánchez, 2001).

Los cultivos pierden agua predominantemente a través de los estomas. Estos son pequeñas aberturas en la hoja de la planta a través de las cuales atraviesan los gases y el vapor de agua de la planta hacia la atmósfera. El agua, junto con algunos nutrientes, es absorbida por las raíces y transportada a través de la planta. La vaporización ocurre dentro de la hoja, en los espacios intercelulares, y el intercambio del vapor con la atmósfera es controlado por la abertura estomática. Casi toda el agua absorbida del suelo se pierde por transpiración y solamente una pequeña fracción se convierte en parte de los tejidos vegetales (Allen *et. al.*, 2006).

La UJI (2015) declara que la transpiración está controlada por muchas variables ya que depende de algunos aspectos dinámicos de la actividad de la planta, entre esas variables están:



- El tamaño, densidad y localización o exposición de los estomas.
- La estación del año, que determina si las plantas tienen hojas y por cuánto tiempo.
- La hora del día, que altera el balance de la radiación, y los ritmos de fotosíntesis y crecimiento de la planta, y la actividad de los estomas.
- El estado de crecimiento de la planta, dado que las plantas consumen mucha más agua en estado de crecimiento activo o periodos de construcción de biomasa, o cuando el sistema radicular ha alcanzado el máximo de expansión y eficiencia.
- Los factores meteorológicos también influyen en la apertura de los estomas, dándose la circunstancia de que con fuertes vientos, sobre todo si son cálidos, los estomas se cierran, como mecanismo para no perder grandes cantidades de agua. Por el contrario, en casos de gran humedad ambiental, las plantas pueden seguir eliminando agua incluso en forma líquida para permitir el movimiento de la savia
- Las propiedades del suelo también condicionan la cantidad de agua disponible para la planta,

Como son difíciles de medir por separado, y además en la mayor parte de los casos lo que interesa es la cantidad total de agua que se pierde a la atmósfera sea del modo que sea, se consideran conjuntamente bajo el concepto mixto de ET (Sánchez, 2001).

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 (Allen *et. al.*, 2006). Se debe considerar adicionalmente la gama de prácticas locales de manejo que actúan sobre los factores climáticos y de cultivo afectando el proceso de ET. Las prácticas del cultivo y el método de riego pueden alterar el microclima, afectar las características del cultivo o afectar la capacidad de absorción del agua del suelo y la superficie de cultivo (Allen *et. al.*, 2006).



2.7.4 ETo, Kc y ETc

La evaporación es el proceso físico, por el cual el agua pasa del estado líquido en que se encuentra en almacenamientos, conducciones, en el suelo, en las capas cercanas a la superficie a estado gaseoso y se transfiere a la atmósfera; afectada por factores meteorológicos como son el suministro de energía; encargada de suministrar el calor latente de vaporización, humedad relativa, velocidad del viento; encargada del transporte del vapor fuera de la superficie de evaporación, la precipitación, la presión atmosférica y la temperatura entre otros (Barco, *et. al.* 2000).

La transpiración es un determinante primario del balance energético de la hoja y del estado hídrico de la planta. Este proceso comprende la evaporación del agua desde las células superficiales en el interior de los espacios intercelulares y su difusión fuera del tejido vegetal principalmente a través de los estomas y en menor medida a través de la cutícula y las lenticelas. Junto al intercambio de dióxido de carbono (CO₂), determina la eficiencia de uso del agua de una planta (Squeo y León, 2007).

Las hojas pierden agua a través de sus estomas como una consecuencia de la actividad fotosintética de las células del mesófilo. El flujo de agua a través de la planta responde a dos ambientes distintos. Por un lado, el ambiente aéreo a que está expuesta la hoja y que puede ser definido en términos de radiación, temperatura, diferencia de presión de vapor, contenido de CO y condición de la capa límite. Por otro lado, las raíces comúnmente generan señales de estrés hídrico, las que sumadas a las señales en la conductividad hidráulica del xilema también controlan la pérdida de agua por la hoja (Sperry *et al.* 1998).

Santos, *et. al.* 2007 afirman que la evaporación y la transpiración son procesos que ocurren simultáneamente y no hay forma sencilla de separar ambos procesos, al flujo de vapor de agua desde una cubierta vegetal se le denomina de forma general evapotranspiración (ET). La proporción de evaporación y transpiración en un cultivo cambia según las diferentes fases de desarrollo y



crecimiento. Así, cuando el cultivo está en las primeras fases de desarrollo predomina el suelo desnudo, y el principal proceso es el de evaporación. Al desarrollarse el cultivo va cubriendo progresivamente el suelo hasta alcanzar la cobertura máxima. Cuando el cultivo llega a cubrir totalmente el suelo, la transferencia de agua a la atmósfera deberá principalmente a la transpiración.

La evapotranspiración de referencia (ETo) se define como “la tasa de evapotranspiración de una superficie extensa de gramíneas verdes de 8 a 15 cm de altura, uniforme, en crecimiento activo, que sombrea totalmente el suelo y sin falta de agua” (Fernández, *et. al.*, 2012).

El coeficiente de cultivo se define como el cociente entre la evapotranspiración del cultivo en condiciones estándar (ETc) y la evapotranspiración de referencia:

$$Kc = \frac{ETc}{ETo}$$

Este coeficiente refleja las diferencias entre el cultivo y la superficie de referencia. Como las características de un cultivo cambian con las distintas fases de crecimiento, los valores del coeficiente de cultivo describen una curva a lo largo del ciclo del cultivo cuya forma refleja los cambios en la vegetación y en la cobertura vegetal debidos al crecimiento y maduración en el ciclo de crecimiento del cultivo. Conociendo el coeficiente de cultivo en un determinado instante se puede obtener la evapotranspiración real del cultivo, utilizando la evapotranspiración de referencia, calculada anteriormente con parámetros climáticos (Santos, *et. al.* 2007).

La evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar se denomina ETc , Figura 2-11, para su cálculo, se considera que no existen limitaciones en el desarrollo del cultivo debido a estrés hídrico o salino, densidad del cultivo, plagas y enfermedades, presencia de malezas o baja fertilidad. El valor de ETc es calculado a través del enfoque del coeficiente del cultivo, donde los efectos de las condiciones del tiempo atmosférico son incorporados en ETo y las características del cultivo son incorporadas en el coeficiente Kc (Fontanella y Aumassanne, 2012).



$$ET_c = ET_o * K_c$$

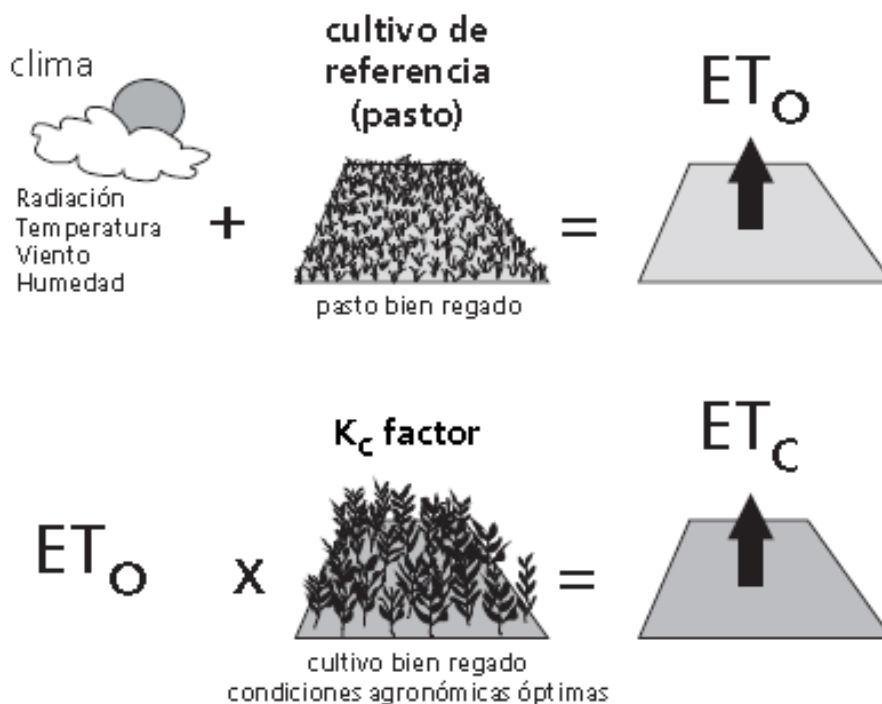


Figura 2- 11: Esquema de ET_o y ET_c .

2.7.5 Medición de la Evapotranspiración

La evapotranspiración no es simple de medir. Para determinarla experimentalmente se requieren aparatos específicos y mediciones precisas de varios parámetros, destacan: Balance de energía y microclimáticos, Balances hídricos, Balance en cuencas, Lisímetro y Tanque de evaporación.

También hay una gran cantidad de ecuaciones empíricas o semi-empíricas que se han desarrollado para determinar la evapotranspiración del cultivo o de referencia utilizando datos meteorológicos. Algunos de los métodos son solamente válidos para condiciones climáticas y agronómicas específicas y no se pueden aplicar bajo condiciones diferentes de las que fueron desarrolladas originalmente, algunas son: Ecuación De Thornhwaite, Ecuación De Blanney-Cridle, Ecuación De Turc, Ecuación De Penman, etc. (Allen *et. al.*, 2006).



2.7.6 Ecuación de Penman-Monteith

La fórmula FAO Penman Monteith está definida como el procedimiento que permite de la manera más precisa, la estimación de la evapotranspiración de referencia ETO, valor fundamental en las actividades agrícolas y en el manejo de los recursos hídricos (Guevara, 2006).

La fórmula Penman-Monteith reemplaza con ventaja a las diversas formulaciones que se utilizaban hasta hace poco en la literatura climática para estimar la evapotranspiración potencial. El antecedente de la fórmula Penman-Monteith es la fórmula en la que Monteith en el modelo de Penman incluye la resistencia de la superficie de la cubierta vegetal (Guevara, 2006). Esta fórmula se desarrolla a partir de datos climáticos estándar de horas sol, temperatura, humedad atmosférica y velocidad de viento.

2.7.7 Ecuación final de Penman-Monteith

El método de FAO Penman-Monteith para estimar ETo, puede ser derivado de la ecuación original de Penman-Monteith y las ecuaciones de la resistencia aerodinámica y superficial:

Teniendo una altura estandarizada a 2 m (el $z_m = z_h = 2$ m) y la altura del cultivo $h = 0.12$ m, las resistencias aerodinámicas y superficiales fueron:

$$r_a = 208/u_2 \text{ s/m}$$

$$r_s = 70 \text{ s/m}$$

Por lo que sustituyendo en la ecuación original

$$ET = \frac{\Delta(Rn - G) + \rho_a * c_p * \frac{es - ea}{r_a}}{\Delta + \gamma * (1 + 0.34u_2)}$$

Rn y G constituyen la energía disponible por unidad de área y se expresan en MJ/(m²*día). Para convertir las unidades de energía de radiación a alturas



equivalentes de agua (mm), el calor latente de vaporización es utilizado como factor de conversión (Allen *et. al.*, 2006).

Los valores de energía a alturas equivalentes de agua o viceversa se convierten con:

Radiación (mm/día) = Radiación (MJ/m² día)/2.45 = 0.408 Radiación [MJ/m² día]

$$ET = \frac{0.408\Delta(Rn - G) + \rho a * cp * \frac{es - ea}{ra}}{\Delta + \gamma * (1 + 0.34u2)}$$

Posteriormente se sustituyen cp y pa:

$$cp = \frac{\gamma * \varepsilon * \lambda}{P} \text{ y } pa = \frac{P}{Tkv * R}$$

Donde:

TKv (temperatura virtual), se puede sustituir por:

$$TKv = 1,01(T + 273)$$

Lo cual resulta en:

$$\frac{cp * pa}{ra} = \frac{\gamma * \varepsilon * \lambda}{1.01 * (T + 273) * R * (208)} u2$$

En [MJ/m² °C día]

Donde:

-ε cociente del peso molecular del vapor agua/aire seco = 0,622

-λ calor latente de vaporización [MJ/kg]

u2 velocidad del viento a 2 m [m/s]

R constante universal de los gases = 0,287 kJ/kgK

T temperatura del aire [°C],

P presión atmosférica [kPa],



$$86400 * \frac{\gamma * 0.622 * \lambda}{1.01 * (T + 273) * 0.287 * 208} u^2$$

De la formula anterior el 86400 (que ayuda a obtener la evapotranspiración diaria) se incluye porque se introdujo en s/m. esta ecuación está en [MJ/m² °C día], por lo que la ecuación se divide entre λ=2.45

Con lo cual la ecuación queda como:

$$\gamma * \frac{900}{T + 273} * u^2$$

Con unidades = [mm/ °C día]

Con estos ajustes se da origen a la ecuación final de Penman-Monteith.

$$ET_o = \frac{0.408 * \Delta * (R_n - G) + \gamma * \frac{900}{T + 273} * u^2 * (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma * (1 + 0.34 * u^2)}$$

Donde:

- ET_o evapotranspiración de referencia (mm/ día)
- R_n radiación neta en la superficie del cultivo (MJ/m² día)
- R_a radiación extraterrestre (mm/día)
- G flujo del calor de suelo (MJ/m²día)
- T temperatura media del aire a 2 m de altura (°C)
- u² velocidad del viento a 2 m de altura (m/s)
- e_s presión de vapor de saturación (kPa)
- e_a presión real de vapor (kPa)
- e_s - e_a déficit de presión de vapor (kPa)
- Δ pendiente de la curva de presión de vapor (kPa/°C)
- γ constante psicrométrica (kPa/°C)



2.7.8 Calendarios del Riego

Se requiere del riego cuando la cantidad de lluvia sea insuficiente para compensar las pérdidas de agua por evapotranspiración. El objetivo principal del riego es la aplicación del agua en el momento preciso y con la cantidad precisa de agua. Mediante el cálculo del balance diario del agua presente en la zona radicular del suelo, se pueden planificar las láminas y los momentos de aplicación del riego. Para evitar el estrés hídrico se debe aplicar el riego antes, o en el momento, de agotarse la lámina de agua fácilmente extraíble del suelo. Por otra parte, para evitar pérdidas por percolación que puedan producir el lavado de importantes nutrientes de la zona radicular, la lámina neta de riego deberá ser menor o igual que el agotamiento de humedad en la zona radicular del suelo (Allen *et. al.*, 2006).

El requerimiento de riego, será el valor que indique la cantidad de agua que habrá que aplicarse a un cultivo, tomando en cuenta la evapotranspiración, una cantidad adicional de agua para lavado de sales y la precipitación del lugar. Una vez calculada la evapotranspiración, se puede calcular el requerimiento de riego. Este se calcula con la siguiente ecuación (Cisneros, 2003):

$$Rr = Et + RI - Pe$$

Donde:

Rr = requerimiento de riego (cm)

Et = evapotranspiración (cm)

RI = requerimiento de lavado (cm)

Pe = precipitación efectiva (cm)

2.7.9 Balance de agua

Allen *et. al.*, (2006) explican que la lluvia, el riego y el ascenso capilar del agua subterránea son procesos que añaden agua a la zona radicular y disminuyen el agotamiento de humedad. Por otra parte, los procesos de evaporación, transpiración del cultivo y las pérdidas por percolación remueven agua de la zona



radicular y aumentan el agotamiento de la humedad del suelo. El balance diario del agua en la zona radicular del suelo, expresado en términos de agotamiento al final del día, es por lo tanto:

$$Dr,i = Dr,i-1 - (P - RO)i - li - CRi + ETc,i + DPi$$

donde

Dr,i : agotamiento de humedad en la zona radicular del suelo al final del día i [mm],

$Dr,i-1$: contenido de humedad en la zona radicular al final del día anterior, $i-1$ [mm],

Pi : precipitación en el día i [mm],

ROi : escurrimiento superficial en el día i [mm],

li : lámina neta de riego en el día i que infiltra en el suelo [mm],

CRi : ascenso capilar proveniente de la mesa de agua subterránea en el día i [mm],

ETc,i : evapotranspiración del cultivo en el día i [mm],

Dpi : pérdidas de agua de la zona radicular por percolación profunda en el día i [mm].

2.8 Variables para el análisis de desarrollo en maíz

2.8.1 Índice de Área Foliar (IAF)

El área foliar está asociada con la mayoría de procesos agronómicos, biológicos, ambientales y fisiológicos, que incluyen el análisis de crecimiento, la fotosíntesis, la transpiración, la interceptación de luz, la asignación de biomasa y el balance de energía (Kucharika, *et. al.* 1998). Los fisiólogos vegetales, los biólogos y los agrónomos demostraron la importancia del área foliar en la estimación de crecimiento vegetal, en la determinación de etapas fenológicas, en la estimación del potencial de rendimiento biológico y agronómico, en el cálculo del uso eficiente de la radiación solar, como también en el cálculo del uso eficiente del agua y de la nutrición mineral (Sonnentag, *et. al.* 2008).



El índice de área foliar se define generalmente como el área de una cara (el haz) de tejido fotosintético por unidad de superficie horizontal de suelo (Myneni, *et. al.* 2002, citado por Velasco, *et. al.* 2010) y representa el tamaño de la interfase planta-atmósfera, por lo que es la principal variable utilizada para modelar fotosíntesis y evapotranspiración, evaluar la radiación fotosintéticamente activa absorbida (FAPAR) y describir el microclima de la planta (Weiss, *et. al.* 2004; Jonckheere, *et. al.*, 2004, citados por Velasco, 2010).

Vásquez, *et. al.* (2014) recopilaron información que definen al IAF como:

$$IAF = \frac{AF}{AS}$$

Dónde: IAF = índice de área foliar, AF = área foliar del cultivo (m²), AS = área del terreno muestreado (m²).

2.8.2 Cobertura Vegetal

La cobertura o cubrimiento representa la proporción del terreno que es ocupada por la vegetación o por su proyección vertical. Este criterio proporciona información de la abundancia de los diferentes tipos biológicos y se expresa en porcentaje global o por estratos (Hernández, 2000).

2.9 Agricultura de precisión

La revolución tecnológica que a nuestra generación le ha tocado vivir es la que ha provocado las llamadas “Tecnologías de la Información y la Comunicación” (TIC), lo que ha conducido a la “era digital” en la actualidad. Como ha ocurrido con anterioridad, la sociedad se está transformando como consecuencia de los avances tecnológicos. La “Agricultura de Precisión” (AP) no es ni más ni menos que la consecuencia de la irrupción de las TIC en la agricultura, es decir, la manifestación de la era digital en la Producción Agraria (Agüera y Pérez, 2013).

La Agricultura de Precisión se presenta como una excelente herramienta útil para maximizar rendimientos, pero por sobre todas las cosas viene a vincular al productor con el concepto de sustentabilidad del medio ambiente. Concepto que



durante décadas se dejó lado y sólo aparecía la rentabilidad por hectárea. Hoy gracias a esta nueva generación de agricultura es posible enlazar la idea de cuidar nuestra tierra, de utilizar cada vez métodos menos nocivos y lograr el rendimiento esperado (Marote, 2010).

2.10 Imagen Digital

Una imagen digital es una imagen (función) $f(x,y)$ que ha sido discretizada tanto en coordenadas espaciales como en luminosidad. Una imagen digital puede ser considerada como una matriz cuyos índices de renglón y columna identifican un punto (un lugar en el espacio bidimensional) en la imagen y el correspondiente valor de elemento de matriz identifica el nivel de gris en aquel punto. Los elementos de estos arreglos digitales son llamados elementos de imagen o pixels (Escalante, 2006).

2.11 Procesamiento digital de imágenes

Al conjunto de técnicas y procesos para descubrir o hacer resaltar información contenida en una imagen usando como herramienta principal una computadora se le conoce como procesamiento digital de imágenes (PDI). Hoy en día, el PDI es un área de investigación muy específica en computación y está muy relacionada con el procesamiento digital de señales. Esta relación estriba en el hecho de que en esencia el PDI es una forma muy especial del procesamiento digital de señales en dos o tres dimensiones. El interés en el estudio del PDI se basa en dos áreas de aplicación primordiales, de acuerdo a Domínguez (1996):

El mejoramiento de la calidad de la información contenida en una imagen con el fin de que esta información pueda ser interpretada por los humanos.

El procesamiento de los datos contenidos en un escenario a través de una máquina de percepción autónoma.



2.11.1 Mejora de Imagen

Mejía (2005) dice que el principal objetivo de la mejora es procesar una imagen para que el resultado sea más conveniente que la imagen original para una aplicación específica. Y este autor afirma que la mejora de la imagen se divide en 2 categorías:

- Los métodos del dominio espacial trabajan sobre el plano de la imagen, y en éste se manipulan directamente los píxeles de una imagen.
- Los métodos del dominio de la frecuencia donde se modifica la transformada de Fourier de una imagen.

2.11.2 Modelo RGB

En el modelo RGB cada color se disgrega en sus componentes espectrales primarios y se representa por un sistema de coordenadas cartesianas. En este modelo los niveles de gris se extienden en línea recta desde el color negro (origen del sistema coordinado) hasta el blanco. Los colores son puntos dentro o sobre el cubo y se definen como vectores que se extienden desde el origen. Las imágenes con modelo RGB contienen tres planos de imágenes independientes, uno para cada color primario. Cuando estas tres imágenes son inyectadas a un monitor RGB la pantalla produce una imagen de color compuesto. El procesamiento de imágenes en color, utilizando el modelo RGB, toma sentido cuando las imágenes se expresan naturalmente en términos de tres planos de color. Actualmente muchas cámaras a colores, utilizadas para adquirir imágenes digitales, utilizan el formato RGB. Lo anterior convierte al modelo RGB en un modelo de gran importancia para el procesamiento de imágenes (Loaiza, 1999).

2.11.3 Aplicaciones de la teledetección

El procesamiento digital de la imagen está orientado a interpretar la información recibida a través de una cámara de video en tiempo real para detectar un color en particular y sus características (matiz, saturación, brillo). Para un correcto procesamiento de esta imagen es necesario conocer la posición exacta de la



lente de la cámara en sus tres ejes (x, y, z) y sus tres ángulos (pitch, yaw y roll) y así, posteriormente poder transformar la imagen en función de dicha posición, empleando para ello algoritmos específicos (Sánchez, *et. al.*, 2013).

2.12 Tratamiento digital de imágenes y la agricultura

La agricultura debe maximizar la eficiencia de uso del agua de riego, y para este fin, emplear herramientas o desarrollar otras nuevas que permitan una gestión más eficiente. En este sentido, el tratamiento digital de imagen es una técnica ya desarrollada en el campo de la agronomía, y que también encuentra su aplicación a nivel de parcela, pues junto a un sistema de procesamiento de imágenes permite determinar variables involucradas en la estimación de los requerimientos de agua de los cultivos, como la fracción de suelo cubierto por vegetación. Este parámetro está relacionado directamente con el coeficiente de cultivo (Escarabajal, *et. al.*, 2015).

2.13 Tratamiento de imágenes en relación al Kc

El procesamiento de imágenes y visión por computadoras se utilizan cada vez más en aplicaciones de gestión del agua en la agricultura. Las imágenes pueden proporcionar información valiosa sobre el porcentaje de cobertura del suelo, que es esencial en la determinación de las necesidades de riego de los cultivos (García, *et. al.* 2015).

La fracción cubierta del suelo, que se obtiene mediante la aplicación de técnicas de clasificación digital a fotografías, es un parámetro útil para la determinación de las necesidades de agua de los cultivos basándose en la metodología 56 de la FAO que está directamente relacionada con el coeficiente de cultivo (Escarabajal, *et. al.* 2015).

2.14 Modelación Matemática

La modelación matemática es un proceso involucrado en la obtención de un modelo matemático. Un modelo matemático de un fenómeno o situación problema es un conjunto de símbolos y relaciones matemáticas que representa,



de alguna manera, el fenómeno en cuestión. El modelo permite no sólo obtener una solución particular, sino también servir de soporte para otras aplicaciones o teorías.

El proceso de modelación involucra una serie de procedimientos, a saber, elección del tema; reconocimiento de la situación/problema, delimitación del problema; familiarización con el tema que va a ser modelado; formulación del problema; hipótesis; formulación de un modelo matemático; resolución del problema a partir del modelo; interpretación de la solución y validación del modelo (Biembengut y Hein, 2004).



2.14 Literatura Citada

- Agüera Vega, J., y Pérez Ruiz, M. (2013). Agricultura de precisión: hacia la integración de datos espaciales en la producción agraria. Ambien. España. Disponible en: <http://www.revistaambienta.es/WebAmbienta/marm/Dinamicas/secciones/articulos/AP.htm> Fecha de Consulta: 11 de Julio de 2017.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo. FAO. Roma.
- Antonio Velázquez, Carolina. (2014). Detección no destructiva de los periodos críticos del maíz. (Tesis de Maestría, Instituto Politécnico Nacional. Ciudad de México, México).
- Asturias, Miguel Ángel. (2004). Maíz de alimento sagrado a negocio del hambre. Quito, Ecuador pp. 9-12.
- Barco, Janet. Cuartas, Adriana. Mesa, Oscar. Poveda, Germán. Jaime (2000). Estimación de la evaporación en Colombia. Avances En Recursos Hidráulicos, Número 07. Páginas 43-51, Medellín, Colombia.
- Biembengut Salett, Maria y Hein, Nelson. (2004). Modelación matemática y los desafíos para enseñar matemática. Educación Matemática, vol. 16, núm. 2, pp. 105-125. México.
- Bolaños, Jorge y Edmeades, Gregory. (1993). La fenología del maíz. Síntesis de resultados experimentales del PRM. Vol. 4. 251-261. México.
- Cisneros Almazan, R. (2003). Riego Y Drenaje. Universidad Autónoma De San Luis Potosí, 1° Ed. Facultad De Ingeniería. pp 61-68.
- Domínguez Torres, Alejandro. (1996). Procesamiento digital de imágenes. Instituto de Investigaciones sobre la Universidad y la Educación. Perfiles Educativos, núm. 72, abril-junio. Distrito Federal, México.
- Endicott, S., Brueland, B., Keith R., Schon, R., Bremer, C., Farnham, D. (2015). Maíz, crecimiento y desarrollo. PIONEER. Iowa, Estados Unidos. pp. 9-18
- Escalante Ramírez, B. (2006). Procesamiento Digital de Imágenes. UNAM. México. Disponible en: [http://verona.fi-p.unam.mx/boris/teachingnotes/Introduccion .pdf](http://verona.fi-p.unam.mx/boris/teachingnotes/Introduccion.pdf) Fecha de Consulta: 11 de Julio de 2017.
- Escarabajal Henarejos, D., Molina Martínez, J.M., Fernández Pacheco, D.G., Cavas Martínez, F., García Mateos G. (2015). Digital photography applied to irrigation management of Little Gem lettuce. Agricultural Water Management. 151. pp. 148-157.



- Fernández Reynoso, Demetrio S., Martínez Menes, Mario R., Tavarez Espinosa, Carlos Arturo. (2012). Estimación de las demandas de consumo de agua. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. pp. 10-12
- Fontanella, Dardo, Aumassanne, Carolina. (2012). Evapotranspiración de maíz, alfalfa y vid bajo riego, en la cuenca media del río Colorado. INTA. La Pampa, Argentina.
- García Mateos, C., Hernández Hernández, J.L., Escarabajal Henarejos, D., Jaén Terrones, S., Molina Martínez, J.M. 2015. "Study and comparison of color models for automatic image analysis in irrigation management applications". Agricultural Water Management. 151. pp 158-166.
- Guevara Díaz, José Manuel. (2006). La fórmula de Penman-Monteith FAO 1998 para determinar la evapotranspiración de referencia, ETo. Terra Nueva Etapa, vol. XXII, núm. 31. pp. 31-72.
- Hernández, Jaime. (2000). Manual de Métodos y Criterios para la Evaluación y Monitoreo de la Flora y la Vegetación. Universidad de Chile, Chile.
- Kucharika, Christopher J., Normana, John M., Gowerb, Stith T. (1998). Measurements of branch area and adjusting leaf area index indirect measurements. Agricultural and Forest Meteorology Volume 91. Wisconsin, USA. 69-88.
- Marote, M.L. (2010). Agricultura de precisión. Universidad de Palermo. Ciencia y Tecnología. Vol. 10. ISEU. pp. 147-166.
- Mejía Vilet, José Ramón. (2005). Procesamiento Digital de Imágenes. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. (1° ed.) UASLP San Luis Potosí, México.
- Sánchez Álvarez, M., Vaquero Gil, R., Vázquez Montecino, C. (2013). Control de un robot Móvil con visión: Rectificación de imágenes para agricultura de precisión. Universidad Complutense de Madrid. Memoria. Madrid.
- Sánchez san Román, Javier. (2001). Evapotranspiración. Madrid, España.
- Santos Rufo, Cristina, Lorite Torres, Ignacio J., Allen, Richard, Tasumi, Masahiro. (2007). Mejora de la gestión de los recursos hídricos por medio de la integración de técnicas de teledetección y modelos de simulación. (1° ed.), AEA, Málaga, España.
- Serratos Hernández, José Antonio. (2009). El origen y la diversidad del maíz en el continente americano. Universidad Autónoma de la Ciudad de México, México. pp. 2-4.
- SIAP. (2016). Atlas Agroalimentario 2016. Ciudad de México, México. 100-102.
- Sonnentag, O., Talbot, J., Chen, J.M., Chen J.M. (2008). Using direct and indirect measurements of leaf area index to characterize the shrub canopy in an



ombrotrophic peatland. Agricultural and Forest Meteorology Volume 144. Canada. pp. 00-212.

Sperry J., Adler, F. Campbell, G. Comstock, J. (1998). Limitation of plant water use by rhizosphere and xylem conductance: results from a model. Plant, cell and environment 21. pp. 347-359.

Squeo, Francisco A. y León, Mario F. (2007). Transpiración. Ediciones Universidad de La Serena, La Serena, Chile (2007) 3: pp. 67-84.

Universidad de Sonora. (2007). Evaporación, transpiración y evapotranspiración. Departamento de Ingeniería Civil y Minas. 1° ed. México. pp. 5-12.

Universidad Jaume I. (2015). Evaporación y Transpiración. UJI, España. En línea: [https://www.google.com.mx/search?q=uji&oq=uji&aqs=chrome..69i57j69i60.1107j0j7&sourceid=chrome&es_sm=93&ie=UTF-8] Fecha de Consulta: 23 de Junio de 2017.

Vásquez, Agustín, Rodríguez Ortiz, Gerardo, Enríquez del Valle, José Raymundo. (2014). Índice de área foliar y factores de perturbación en una cuenca hidrográfica del río Tehuantepec. Revista Mexicana de Agroecosistemas. Vol. 1(1). pp. 52-59.

Velasco López, Silvia, Champo Jiménez, Omar, España Boquera, Ma. Luisa, Frédéric, Baret. (2010). Estimación del índice de área foliar en la reserva de la biósfera mariposa monarca. Rev. Fitotecnia. Vol. 33 (2). pp. 169-174.



RESUMEN

CÁLCULO DE COEFICIENTE KC DUAL EN MAÍZ MEDIANTE LA ECUACIÓN DE PENMAN-MONTEITH PARA CALENDARIOS DE RIEGO EN MAÍZ

En este capítulo se aplicó la ecuación de Penman-Monteith para el cálculo de la ETo con la finalidad de generar calendarios de riego, para dicho cálculo se ocuparon datos climatológicos de la zona como Temperaturas máxima, mínima y de rocío, velocidades del viento y precipitación tomadas de la Estación Meteorológica de la Universidad Autónoma Chapingo, el dato de la ETo se empleó al 60, 80, 100 y 120% de su valor para establecer Tratamientos de riego en un cultivo de maíz para la fase experimental, posteriormente se procedió a determinar la ETc basada en la metodología del coeficiente Kc Dual del Boletín 56 de la FAO para obtener los requerimientos hídricos y determinar los intervalos de riego. De acuerdo a los tratamientos establecidos la precipitación prácticamente cubrió las necesidades de agua de la planta en el tratamiento del 60% al solo ser regada 32 días de 146 de fase experimental y aumentando el número de eventos hasta llegar a los 103 días de eventos de riego en el tratamiento de 120%.

Palabras Clave: ETo , ETc , Coeficiente Kc Dual, Calendario de Riego

Tesis de Maestría en Ingeniería, Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo.

Autor: López Rosano Jesús Isaac

Director de Tesis: Dr. Ramón Arteaga Ramírez



ABSTRACT

CALCULATION OF DUAL KC COEFFICIENT IN MAIZE THROUGH PENMAN-MONTEITH'S EQUATION FOR maize IRRIGATION CALENDARS

In this chapter, the Penman-Monteith equation was used for the calculation of the ETo for the purpose of generating irrigation calendars for the calculation of the climatic data of the area as Maximum, minimum and dew temperatures, velocities Of the wind and precipitation Taken from the Meteorological Station of the Universidad Autónoma Chapingo, ETo data were used 60, 80, 100 and 120% of its value to establish Irrigation treatments in maize crop for the experimental phase, later proceeded To be determined The ETc based on the methodology of the Dual Kc coefficient of FAO Bulletin 56 to obtain the water requirements and determine the irrigation intervals. According to established treatments the precipitation practically covered the plant water needs in the treatment of 60% in the sun only the days of 146 experimental phase and increasing the number of events until reaching the 103 days of irrigation events In the treatment of 120%.

Keywords: ETo , ETc , Coefficient Kc Dual, Irrigation Calendar

Thesis, Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo.
Author: López Rosano Jesús Isaac
Advisor: Dr. Ramón Arteaga Ramírez



CAPÍTULO 3: CÁLCULO DE COEFICIENTE KC DUAL EN MAÍZ MEDIANTE LA ECUACIÓN DE PENMAN- MONTEITH PARA CALENDARIOS DE RIEGO EN MAÍZ

3.1 Introducción

La poca disponibilidad de agua observada en las presas del país en los últimos años y la consecuente sobreexplotación de los acuíferos subterráneos urgen al establecimiento de estrategias para hacer un uso racional y eficiente de este recurso (Catalán *et. al.* 2006). El dato anterior aunado a que durante la estación lluviosa se dispone de agua en forma natural que es aprovechada para la producción; aunque, existen periodos en los cuales el agua de lluvia no es suficiente para el desarrollo de los cultivos y durante la estación seca, el agua que queda almacenada en el suelo después de la estación lluviosa, se va consumiendo poco a poco hasta que se agota completamente y los cultivos no pueden desarrollarse, aspectos que provocan que el riego se haga necesario (Mendoza, 2013). La magnitud de estas deficiencias justifica que el agua sea el factor determinante de la producción agrícola y de toda la industria agroalimentaria que de ella depende, representando un factor básico en el reequilibrio del territorio (Servín, 2015). El regante, al igual que el extensionista y el técnico, requieren conocer la evapotranspiración del sistema de cultivo elegido para su explotación, aplicar las técnicas de programación de riegos que definen el momento y la cuantía de cada riego, conocer y controlar los principales factores que intervienen en el proceso de aplicación del agua a la parcela según el sistema de riego (Santos *et. al.* 2010).

Según Ortega y Acevedo (1999) la programación de riego es una técnica que permite determinar el nivel óptimo de riego de acuerdo a las interacciones específicas de suelo, cultivo, clima y manejo agronómico. Proceso orientado a determinar las cantidades de agua por aplicar y las fechas de aplicación de cada riego para minimizar deficiencias o excesos de humedad en el suelo que pudieran causar efectos adversos sobre el crecimiento, rendimiento y calidad de los



cultivos. Con la programación adecuada del riego se pueden lograr objetivos múltiples como ahorrar agua, disminuir costos por ahorro de energía y mano de obra, minimizar estrés hídrico y maximizar rendimiento, así como maximizar calidad, rentabilidad o ingreso (Servín, 2015).

De acuerdo a Allen *et. al.* (2006) el procedimiento del coeficiente dual del cultivo requiere de una mayor cantidad de cálculos numéricos que el procedimiento del coeficiente único pero es preferible para los casos de los calendarios de riego en tiempo real, para los cálculos de balance del agua en el suelo, y para los estudios de investigación donde sean importantes tanto los efectos de las variaciones diarias del humedecimiento de la superficie del suelo y su impacto resultante en el valor diario de la Evapotranspiración de Cultivo (ET_c), como el patrón de humedecimiento del perfil del suelo y los flujos de percolación profunda.

De acuerdo a lo anterior el objetivo del capítulo es elaborar calendarios de riego basados en la ecuación de Penman-Monteith con la metodología del coeficiente Dual de cultivo para el cálculo de láminas de riego en maíz establecido en la parcela experimental de la Estación Meteorológica de la Universidad Autónoma Chapingo.

3.2 Materiales y Métodos

La etapa de campo del estudio se realizó en el Campo Experimental, de la estación meteorológica de la Universidad Autónoma Chapingo, con coordenadas 19° 16' 52" latitud Norte y 99° 39' 0" longitud Oeste, a la que le corresponde un clima Cb (Wo) (W) (i') g, que es para climas templados subhúmedos con lluvias en Verano, una época seca en invierno y con poca oscilación térmica entre 5 y 7 °C. La temperatura media anual es de 15.5 °C y precipitación media anual de 664mm (López, 2008).

Los materiales empleados para el desarrollo, generación y aplicación de calendarios fueron:

Datos de estación meteorológica Universidad Autónoma Chapingo



Paquetería Office Excel

Para realizar el cálculo del calendario de riego se adoptó el método de la FAO 56 (Allen, *et. al.* 2006), el primer punto de este cálculo es la determinación de la ETo, para esta parte se tomaron datos de la estación meteorológica y automática de la Universidad Autónoma Chapingo, las variables ocupadas fueron: Temperatura máxima, temperatura mínima, temperatura de punto de rocío y velocidad del viento.

En las figura 3-1 se presenta las variaciones de las temperaturas máxima, mínima y de rocío y en la 3-2 los datos de Viento durante el desarrollo del experimento.

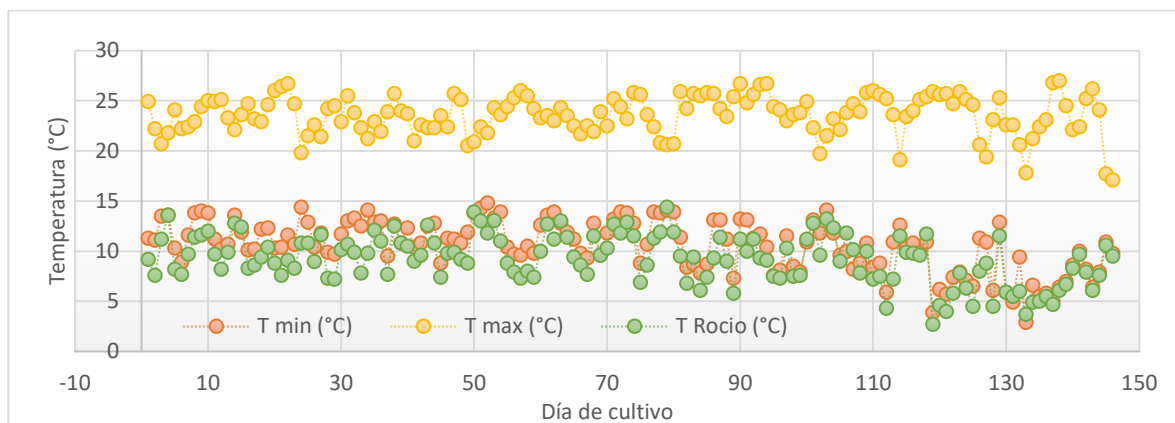


Figura 3- 1: Temperaturas observadas durante el ciclo del cultivo.

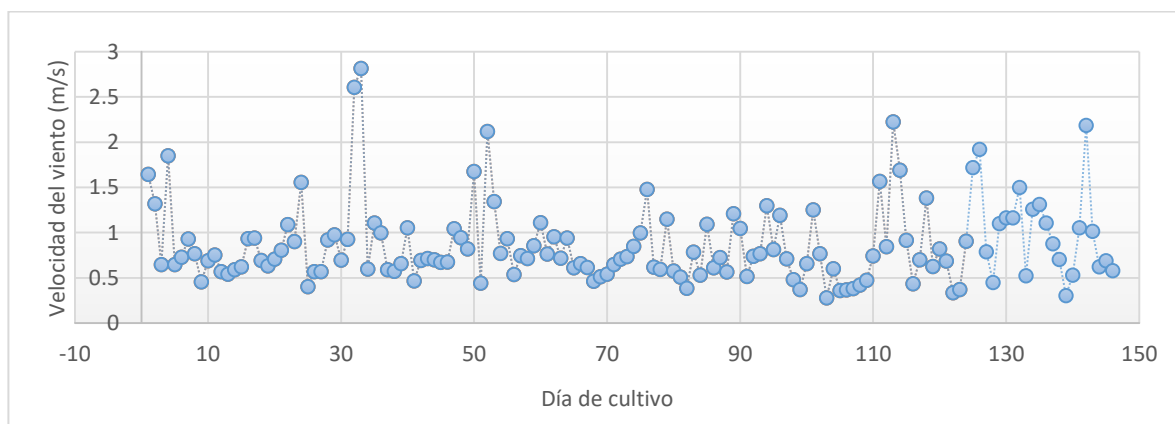


Figura 3- 2: Viento observado durante el ciclo fenológico.

Con los datos tomados de las estaciones se procedió a realizar los cálculos de los diferentes apartados de la ecuación de Penman-Monteith para generar la ETo de manera diaria, (Cuadro 3-1) a partir de la ecuación:



$$ET_o = \frac{0.408 * \Delta * (Rn - G) + \gamma * \frac{900}{T + 273} * u_2 * (es - ea)}{\Delta + \gamma * (1 + 0.34 * u_2)}$$

Donde:

- ET_o evapotranspiración de referencia (mm/ día)
- R_n radiación neta en la superficie del cultivo (MJ/m² día)
- R_a radiación extraterrestre (mm/día)
- G flujo del calor de suelo (MJ/m² día)
- T temperatura media del aire a 2 m de altura (°C)
- u₂ velocidad del viento a 2 m de altura (m/s)
- es presión de vapor de saturación (kPa)
- ea presión real de vapor (kPa)
- es - ea déficit de presión de vapor (kPa)
- Δ pendiente de la curva de presión de vapor (kPa/°C)
- γ constante psicrométrica (kPa/°C)

Cuadro 3- 1: Muestra de valores obtenidos de Evapotranspiración de Referencia (ET_o) con Penman-Monteith

EVPOTRANSPIRACION DE REFERENCIA		
$0.408 * (R_n - G) * \Delta / [\Delta + \gamma * (1 + 0.34 * U_2)]$	$900 / (T_{med} + 273) * U_2 * (es - ea) * \gamma / [\Delta + \gamma * (1 + 0.34 * U_2)]$	ET _o
3.421602658	1.342304624	4.76390728
3.1208878	1.033500566	4.15438837
2.885552369	0.368465141	3.25401751
2.810740038	0.734942516	3.54568255
3.673845678	0.573695004	4.24754068
3.487433207	0.565240556	4.05267376

Ya con la generación del valor de la ET_o diaria el método del cálculo de la ET_c se formuló de acuerdo al Capítulo 7 del boletín 56 de la FAO, aplicando el concepto del coeficiente dual del cultivo que proporciona un cálculo separado de estos dos fenómenos físicos, este se integra por un coeficiente basal del cultivo (K_{cb}) y un coeficiente de evaporación del suelo (K_e), que permite evaluar



mejor el impacto del humedecimiento del suelo por la lluvia o riego, (Allen et. al. 2006 y Rosa et al. 2012).

El procedimiento y fórmulas de cálculo de la evapotranspiración de cultivo propuesto por Allen et. al. (2006) con el coeficiente dual consiste en:

- Identificar las duraciones de las etapas de desarrollo del cultivo y seleccionar los valores de k_{cb} correspondientes.
- ajustar los valores de los coeficientes K_{cb} seleccionados de acuerdo a las condiciones climáticas en cada etapa con la ecuación:

$$K_{cb} = K_{cb}(tab) + [0.04(u_2 - 2) - 0.004(HR_{min} - 45)]\left(\frac{h}{3}\right)^{0.3}$$

Donde:

- $K_{cb}(Tab)$ valor de K_{cb} med o K_{cb} fin tomado de (Cuadro 17 del Boletín 56 de la FAO),

- u_2 velocidad del viento diaria a 2 m de altura (m/s)

- HR_{min} valor de la humedad relativa mínima diaria (%)

- h altura promedio de las plantas durante mediados o final de temporada (m)

- construir la curva del coeficiente basal del cultivo (lo que permite determinar los valores de K_{cb} para cualquier período durante la temporada de crecimiento)
- determinar los valores diarios de K_e para la evaporación en la superficie del suelo, a partir de:

$$K_e = K_r(K_{c_{max}} - K_{cb}) \leq f_{ew}K_{c_{max}}$$

Donde:

- K_e coeficiente de la evaporación en el suelo,

- K_{cb} coeficiente basal del cultivo,



- Kc max valor máximo de Kc después del riego o lluvia,
- Kr coeficiente adimensional de reducción de la evaporación, dependiente de la lámina acumulada de agua agotada (evaporada) de la capa superficial del suelo,
- f_{ew} fracción del suelo que se encuentra simultáneamente expuesto y humedecido, es decir la fracción de la superficie del suelo a partir de la cual ocurre la mayor parte de la evaporación.

- calcular ET_c como el producto de ET_o y (K_{cb}+K_e=K_c Dual).

Del proceso anterior hay un parámetro importante, que es el coeficiente de reducción Kr, Allen *et. al.* (2006) lo explican asumiendo que la evaporación que se presenta en la parte expuesta del suelo ocurre en dos etapas:

- Etapa 1: será limitada solamente por la cantidad de energía disponible en la superficie del suelo. Esta etapa se mantiene hasta que la lámina acumulada de evaporación aumente hasta un punto donde las propiedades hidráulicas de la parte superior del suelo comiencen a ser limitantes y la humedad no pueda ser transportada a la superficie del suelo a una tasa que pueda satisfacer la demanda potencial de la evaporación. Durante la etapa 1 de secado, Kr = 1.
- Etapa 2: (donde la tasa de evaporación se va reduciendo paulatinamente) es denominada: etapa de reducción de la tasa de evaporación. En este punto, la superficie del suelo se encontrara visiblemente seca y la evaporación a partir de la porción expuesta del suelo se reducirá en proporción a la cantidad de agua remanente en la capa superficial del suelo, Kr toma valores de acuerdo a la fórmula:

$$Kr = \frac{AET - De_{i-1}}{AET - AFE}$$



Donde:

- Kr: coeficiente adimensional de reducción de la evaporación,
- De_{i-1}: lamina acumulada de evaporación (agotamiento) en la capa superficial del suelo al final del día_{i-1} (el día anterior) (mm),
- AET: lamina acumulada máxima de evaporación (agotamiento) en la capa superficial del suelo cuando Kr = 0 (AET = agua evaporable total) (mm),
- AFE: lamina acumulada de evaporación al final de la etapa 1
(AFE = agua fácilmente evaporable) (mm).

Siguiendo los pasos anteriores de acuerdo a las formulas y ajustes (para mayor detalle consultar el Boletín 56 de la FAO (Allen *et. al.* (2006)) se obtuvieron los valores diarios de la ETc (Cuadro 3-2).

Cuadro 3- 2: Ejemplo de valores involucrados en el cálculo de la ETc.

ETo (mm/día)	Kcb	Ke	Kc	ETc (mm/día)
4.76390728	0.15	1.05582925	1.20582925	5.74445873
4.15438837	0.15	1.04565931	1.19565931	4.96723312
3.25401751	0.15	1.00173724	1.15173724	3.74777315
3.54568255	0.15	1.01332711	1.16332711	4.12478863
4.24754068	0.15	1.03896295	1.18896295	5.0501685
4.05267376	0.15	1.03427052	1.18427052	4.79946208
3.91630428	0.15	1.02744875	1.17744875	4.61124757
3.71482071	0.15	1.01659472	1.16659472	4.33369022

Allen *et. al.*, (2006) proponen un método de cálculo de riego basado en un balance, explican que la lluvia, el riego y el ascenso capilar del agua subterránea son procesos que añaden agua a la zona radicular y disminuyen el agotamiento de humedad. Por otra parte, los procesos de evaporación, transpiración del cultivo y las pérdidas por percolación remueven agua de la zona radicular y aumentan el agotamiento de la humedad del suelo. De acuerdo a estas características propusieron la fórmula:

$$Dr,i = Dr,i - 1 - (P - RO)i - Ii - CRi + ETc,i + DPi$$



Donde:

$Dr_{,i}$: agotamiento de humedad en la zona radicular del suelo al final del día i (mm),

$Dr_{,i-1}$: contenido de humedad en la zona radicular al final del día anterior, $i-1$ (mm),

P_i : precipitación en el día i (mm),

RO_i : escurrimiento superficial en el día i (mm),

li : lámina neta de riego en el día i que infiltra en el suelo (mm),

CR_i : ascenso capilar proveniente de la mesa de agua subterránea en el día i (mm),

$ET_{c,i}$: evapotranspiración del cultivo en el día i (mm),

Dp_i : pérdidas de agua de la zona radicular por percolación profunda en el día i (mm).

Por lo que este balance de entradas y salidas (explicado de manera minuciosa en el Boletín 56 de la FAO) se empleó para el cálculo de las láminas de agua que se aplicaron a los tratamientos.

Para el cálculo de los tiempos de riego se tomaron en cuenta: el gasto del emisor, área de parcela, requerimiento de riego, entre otros y fue administrado por medio de riego por goteo, (Figura 3-3) destacando que por cada subunidad de la parcela se generó un calendario ya que se contaba con 5 tratamientos: Temporal, aplicando láminas de riego al 60%, 80%, 100% y 120% del valor de la ET_o .



Figura 3- 3: Riego por goteo en parcela de 60% y parcela de temporal.



3.3 Resultados y Discusión

En cuanto a la parte experimental, la generación de estos calendarios de riego permitió satisfacer las necesidades hídricas del cultivo de maíz, observándose diferencias significativas entre los tratamientos establecidos como se nota en la Figura 3-4.



Figura 3- 4: Parcela de maíz al 60% y 100% de la ETo.

De acuerdo a las variables climáticas obtenidas en la zona y comparando con las estimaciones obtenidas por Santiago *et. al.* (2012) los valores generados de la ETo están acordes a la zona de establecimiento del experimento, teniendo como resultado la ETo de todo el ciclo del cultivo que se muestra en la Figura 3-5.

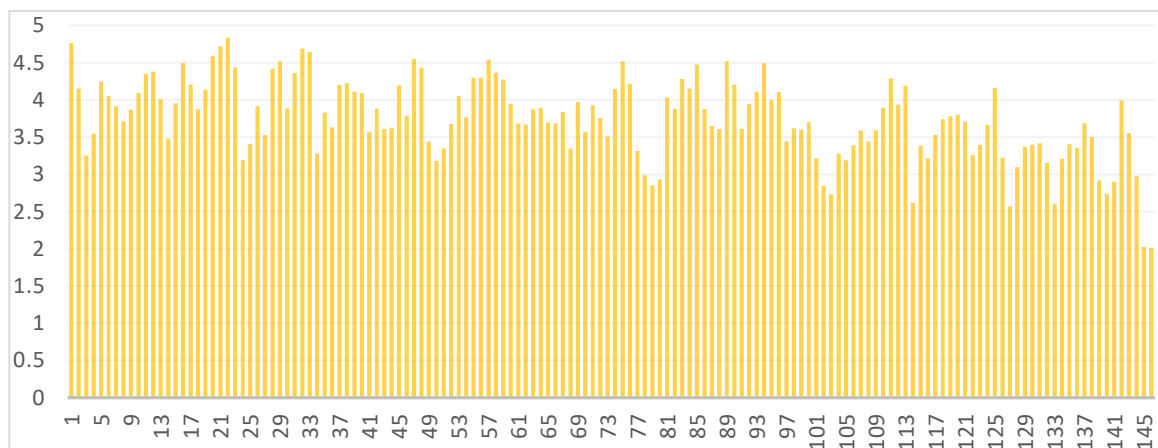


Figura 3- 5: ETo calculada con datos de la Estación Meteorológica de la Universidad Autónoma Chapingo.



Allen *et. al.* (2006) dicen que el valor del coeficiente Kc por la ETo da origen a la ETc, en la metodología del coeficiente dual del cultivo se obtiene por separado la transpiración (Kcb), asociado principalmente a la fenología del cultivo, y el ke que corresponde a la evaporación y es principalmente afectado por las condiciones climáticas de la zona, en la Figura 3-6 se ilustran los valores de cada componente que sumados originaron el coeficiente Kc Dual por tratamiento del experimento.

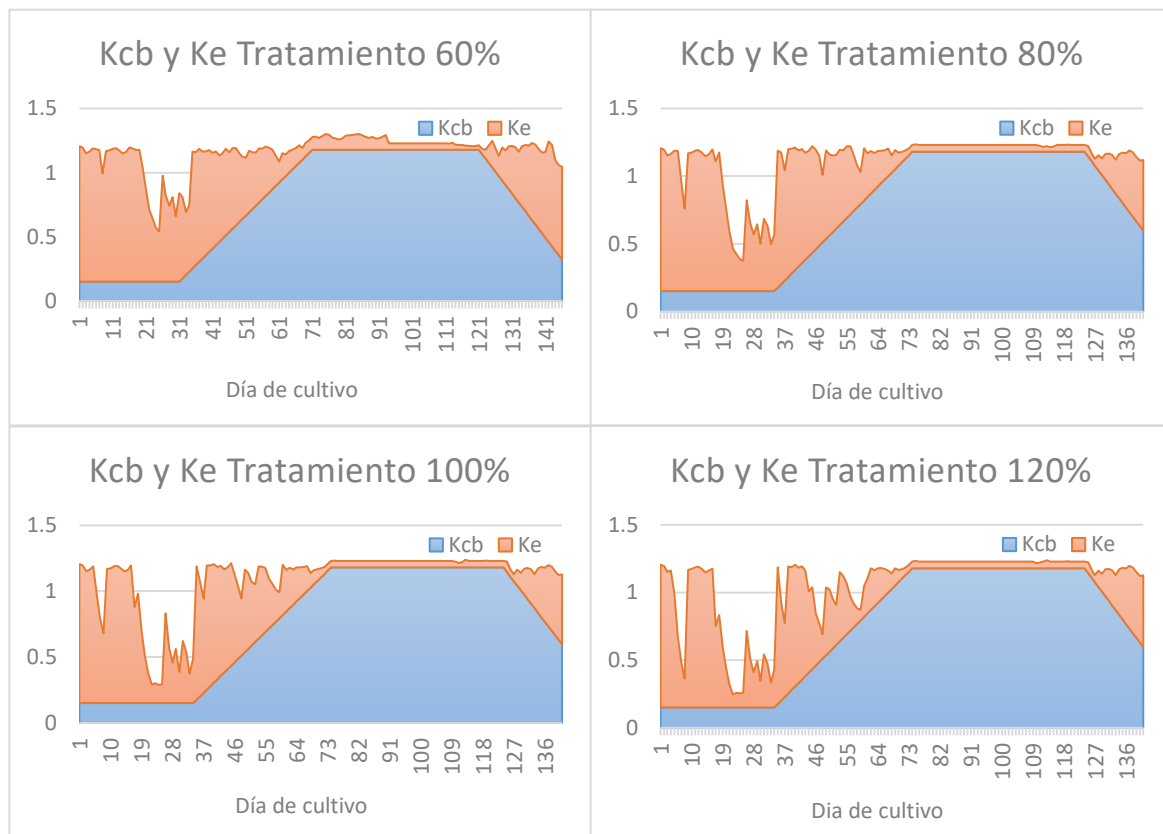


Figura 3- 6: Coeficiente Kcb y Ke.

Se observa en la figura 3-6 que el valor de Kcb no vario en los tratamientos, puesto que se trata en los 4 casos de la misma variedad de maíz por lo que los factores que generan el coeficiente no cambian, por el contrario el valor de Ke que está influenciado por las condiciones climáticas y por la variación en el porcentaje de la ETo cambia su valor en los distintos tratamientos, observando que cuando se maneja el 60% de la ETo el valor del coeficiente Ke es más grande, esto debido al coeficiente de reducción Kr, pues en el Tratamiento del 60% de la ETo se cumplen con las demandas de evaporación y el valor de Kr fue



más cercano a la unidad durante todo el ciclo del cultivo, pero en el Tratamiento del 120% de la ETo el suelo seca de manera más rápida y no se cumplen con las demandas de evaporación por lo que hay una reducción del coeficiente Kr que al estar relacionado de manera directa con el coeficiente Ke también disminuye su valor.

Allen *et. al.* (2006) mencionan que los valores de Kc ya obtenidos pueden sufrir otro ajuste de acuerdo al estrés hídrico por las limitaciones de agua en el suelo, durante los primeras etapas de crecimiento del cultivo, este ajuste aplicado cuando el agua del suelo empieza a ser difícil de absorber por las raíces (para mayor detalle consultar metodología Ks del Boletín 56 de la FAO).

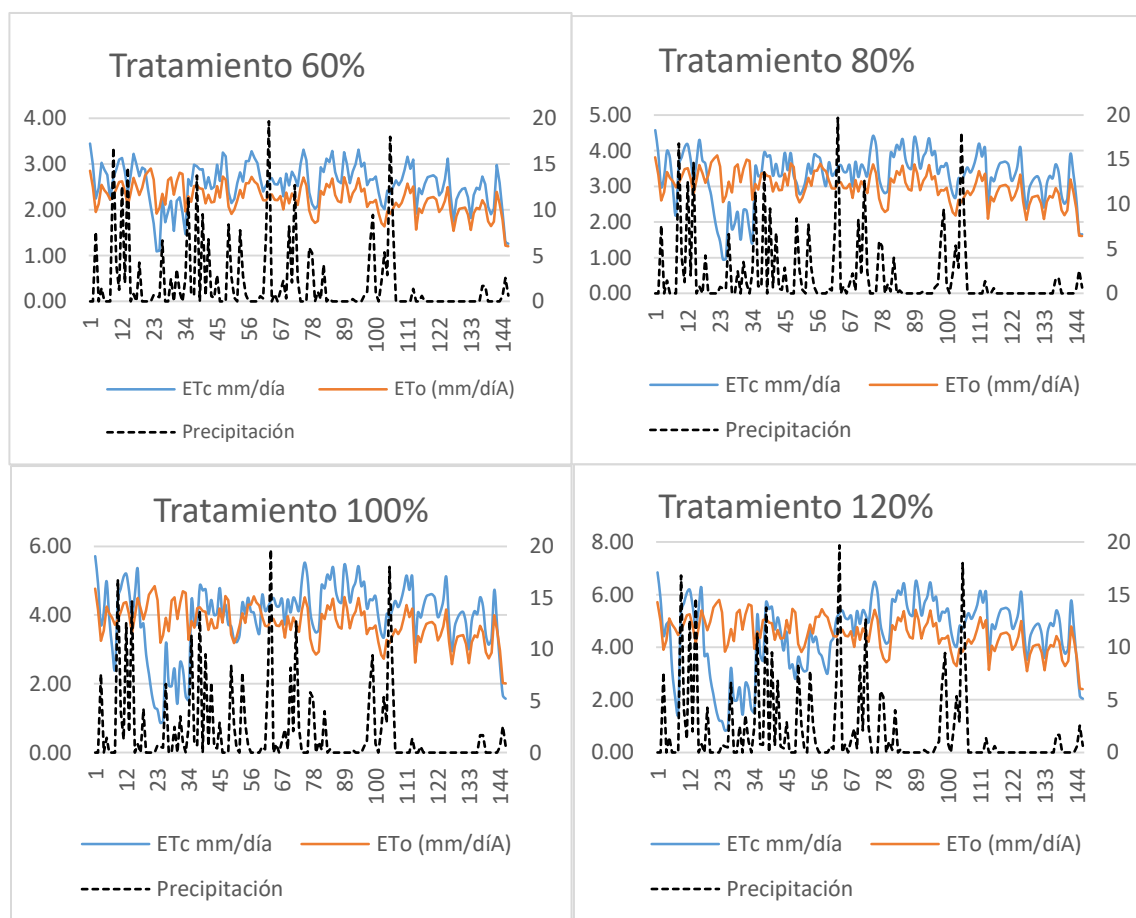


Figura 3- 7: Comparación ETo y ETc.



En la Figura 3-7, se comparan la ETo y la ETc, en la que se aprecia que el valor de la ETc es mayor que la ETo en periodos que corresponden a la época donde no hubo precipitación o no fue la suficiente para cubrir las necesidades del cultivo y el riego no había sido suministrado.

Con el valor de la ETc como parámetro importante en el balance se calculó la lámina de agua a aplicar por tratamiento, en la Figura 3-8 se distingue la diferencia en cuanto a los días que se aplicó riego, el tratamiento del 60% de la ETo tuvo menos días de riego que el de 120% de la ETo que requirió de más láminas de agua durante el ciclo. También se observa que en los días que hubo eventos de lluvia el riego no era necesario o se disminuía el valor de las láminas aplicadas días después de que ocurrieran.

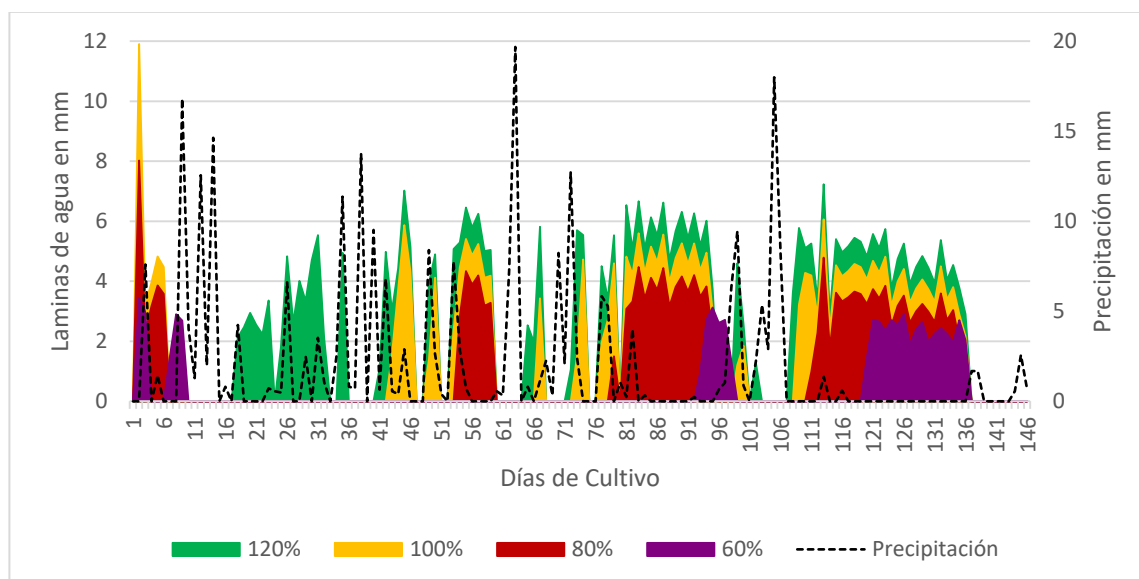


Figura 3- 8: Láminas de agua aplicadas y precipitación.

3.4 Conclusiones

El método del balance y coeficiente dual de la FAO 56 da una idea amplia del funcionamiento separado de evaporación y la transpiración, determinando que el valor de transpiración al ser la misma variedad de maíz fue igual en los 4 tratamientos, mientras que el valor de la evaporación fue distinto de acuerdo a las variaciones recibidas por tratamiento, pudiendo reflexionar sobre los cambios de acuerdo a las condiciones climáticas y falta de riego.



El cambio en el porcentaje aplicado de la ETo por tratamiento se refleja directamente en el valor del coeficiente K_e , que se vio seriamente afectado por el parámetro de reducción de evaporación K_r , originando valores más altos del coeficiente K_e en los tratamientos que empleaban un porcentaje de la ETo menor, puesto que la demanda de evaporación se satisfacía y un K_e más bajo con porcentajes de ETo mayores ya que había mayor pérdida de agua en la superficie del suelo que originaba que no se cumpliera con la demanda de evaporación reduciendo el valor de su coeficiente K_r y por tanto el del coeficiente K_e .

Las láminas de riego como consecuencia de los resultados de la ET_c se aplican de manera esporádica en las parcelas que se regaban al 60% de ETo , pues los eventos de precipitación satisfacían determinadas por el Tratamiento, mientras que al analizar el tratamiento de 120% de la ETo los eventos de riego requeridos fueron más constantes y mayores.



3.5 Literatura Citada

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo. FAO. Roma.
- Catalán Valencia, Ernesto A., Villa Castoreña, Ma. Magdalena, Inzunza Ibarra, Marco A., Román López, A., González Barrios, José L. (2006). Cálculo de demandas de agua y programación del riego de cultivos en Coahuila. Durango, México.
- Mendoza, Edmundo. (2013). Riego por goteo. Centro Forestal de Tecnología Agropecuaria y Forestal. El Salvador.
- Ortega F.S. y C. Acevedo. (1999). Programación del riego usando sistemas meteorológicos automáticos. Curso. Universidad de Talca. Chile.
- López López, Rutilo. (2008) Producción de tomate de cascara (physalis ixocarpa brot.) basado en láminas de riego y acolchado plástico (Tesis Doctoral. Universidad Autónoma Chapingo, México).
- Rosa, R. D., P. Paredes, G. C. Rodrigues, I. Alves, R. M. Fernando, L. S. Pereira, and R. G. Allen. (2012). Implementing the dual crop coefficient approach in interactive software. 1. Background and computational strategy. Agricultural Water Manage. Vol. 103. pp. 8-24.
- Santiago Rodríguez, S., Arteaga Ramírez, R., Sangerman Jarquín, Dora Ma., Cervantes Osornio, R., Navarro Bravo, Agustín. (2012). Evapotranspiración de referencia estimada con Fao-Penman-Monteith, Priestley-Taylor, Hargreaves y RNAREvista Mexicana de Ciencias Agrícolas Vol.3 Núm.8 1 de noviembre - 31 de diciembre, 2012 pp. 1535-1549.
- Santos Pereira, L., de Juan Valero, José Arturo, Picomell Buendía, María Raquel, Tarjuelo Martín-Benito. (2010). El riego y sus tecnologías. Lisboa. Portugal.
- Servín Palestina, Miguel. (2015). Sistema para programar y calendarizar el riego de los cultivos en tiempo real. (Tesis de Maestría, Colegio de Postgraduados. México).



RESUMEN

PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES PARA CÁLCULO DE COBERTURA VEGETAL Y DETERMINACIÓN DE ETAPAS FENOLÓGICAS EN MAÍZ

Esta publicación se enfocó a la aplicación de métodos para Procesamiento de Imágenes por medio de visión por computadora, las imágenes obtenidas a partir de cámaras digitales que fueron tomadas durante todo el ciclo de cultivo de maíz, para poder realizar estas mediciones se empleó un tripie adaptado con bastones Bluetooth donde se conectaba la cámara celular para tomar fotos de un área delimitada por un marco de 1.1x1.1m y así tener control de las plantas y el terreno monitoreado. El conjunto de fotos se sometió a procesamiento en el programa VisualStudio con Open CV para el cálculo de Cobertura Vegetal, estos valores y las secuencias de fotos fueron analizados bajo los criterios del Boletín 56 de la FAO para obtener la duración en días de las Etapas Fenológicas representativas de la zona de estudio, se establecieron 5 tratamientos de maíz basados en el porcentaje de la ETo calculada concluyendo que el Tratamiento de Temporal y 60 % tienen una duración de 145 días, para 80% de la ETo 167 días y para 100% y 120% alcanza los 170 días, por lo que el Tratamiento del 60% recibió más agua de la requerida y 80, 100 y 120% tuvieron un déficit en la lámina aplicada pues la duración de las etapas empleadas es de 150 días.

Palabras Clave: Imagen Digital, Visión, Etapa Fenológica

Tesis de Maestría en Ingeniería, Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo.

Autor: López Rosano Jesús Isaac

Director de Tesis: Dr. Ramón Arteaga Ramírez



ABSTRACT

DIGITAL IMAGE PROCESSING FOR CALCULATION OF VEGETABLE COVERAGE AND DETERMINATION OF PHENOLOGICAL STAGES IN MAIZE

This publication focused on the application of methods for Image Processing through computer vision, the images obtained from digital cameras that were taken during the whole cycle of maize cultivation, in order to make these measurements an adapted tripod was used With Bluetooth sticks where the cellular camera was connected to take photos of an area delimited by a frame of 1.1x1.1m and thus have control of the plants and the ground monitored. The set of photos were processed in the VisualStudio program with Open CV for the calculation of Plant Cover, these values and the photo sequences were analyzed under the criteria of FAO Bulletin 56 to obtain the duration in days of Phenological Stages Representative of the study area, 5 maize treatments were established based on the percentage of ETo calculated, concluding that the Temporal Treatment and 60% had a duration of 145 days, for 80% of the ETo 167 days and for 100% and 120% reached 170 days, so that 60% Treatment received more water than required and 80, 100 and 120% had a deficit in the applied film because the duration of the steps used is 150 days.

Keywords: Digital Image, Vision, Phenological Stage

Thesis, Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo.

Author: López Rosano Jesús Isaac

Advisor: Dr. Ramón Arteaga Ramírez



CAPÍTULO 4: PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES PARA CÁLCULO DE COBERTURA VEGETAL Y DETERMINACIÓN DE ETAPAS FENOLÓGICAS EN MAÍZ

4.1 Introducción

Al conjunto de técnicas y procesos para detectar o hacer resaltar información contenida en una imagen usando como herramienta principal una computadora se le conoce como procesamiento digital de imágenes (PDI), que hoy en día es un área de investigación muy específica en computación y está muy relacionada con el procesamiento digital de señales. Esta relación estriba en el hecho de que en esencia el PDI es una forma muy especial del procesamiento digital de señales en dos o tres dimensiones. El interés en el estudio del PDI se basa en dos áreas de aplicación primordiales de acuerdo a Domínguez (1996):

- El mejoramiento de la calidad de la información contenida en una imagen con el fin de que esta información pueda ser interpretada por los humanos
- El procesamiento de los datos contenidos en un escenario a través de una máquina de percepción autónoma.

En la actualidad los cultivos agrícolas ocupan grandes áreas, por lo cual el mapeo de las plantaciones, la detección de plagas, malas hierbas y determinación de la cobertura vegetal tienen gran complejidad, pero debe ejecutarse con alto rigor para que la producción tenga rendimientos favorables. Debido a esto el hombre se ha dado a la tarea de incorporar en la agricultura técnicas de Teledetección de Alta Resolución y procesamiento de imágenes mediante cómputo. Así, la agricultura actual ha alcanzado un gran desarrollo por lo cual ha surgido el término Agricultura de Precisión (Martínez, 2016).

Lo escrito por Barba (2012) dice que la agricultura de precisión se basa en una ciencia conocida como sensado remoto, la cual consiste en obtener información de algún objeto, superficie o algún fenómeno que sea de interés de investigación



sin la necesidad de contacto físico. Esta ciencia aplicada a la agricultura consiste en la interpretación de imágenes digitales del área de cultivo que posteriormente serán analizadas, modificadas y almacenadas.

En lo referente a la gestión eficiente del agua, el uso de la fotografía digital en la agricultura de precisión permite el monitoreo del crecimiento de las plantas, y así determinar las necesidades de agua de los cultivos con base a variables que están directamente relacionadas con la evapotranspiración. (Fernández, et. al. 2014).

Según Allen, *et. al.* (2006) a medida que el cultivo se desarrolla, tanto el área del suelo cubierta por la vegetación como la altura del cultivo y el área foliar variarán progresivamente. Debido a las diferencias en evapotranspiración que se presentan durante las distintas etapas de desarrollo del cultivo, el valor de Kc correspondiente a un cultivo determinado, también variará a lo largo del período de crecimiento del mismo. Este período de crecimiento puede ser dividido en cuatro etapas: inicial, de desarrollo del cultivo, de mediados de temporada y de final de temporada.

Por tanto en este capítulo se procederá a aplicar técnicas del Procesamiento Digital de Imágenes para calcular el Porcentaje de Cobertura Vegetal (PCV) y determinar las etapas fenológicas en de maíz.

4.2 Materiales y Métodos

El desarrollo del estudio se realizó en el Campo Experimental de la estación meteorológica de la Universidad Autónoma Chapingo, con coordenadas 19° 16' 52" latitud Norte y 99° 39' 0" longitud Oeste, a la que le corresponde un clima Cb (Wo) (W) (i') g, que es para climas templados subhúmedos con lluvias en Verano, una época seca en invierno y con poca oscilación térmica entre 5 y 7 °C. La temperatura media anual es de 15.5 °C y precipitación media anual de 664mm (López, 2008).



En el lugar se estableció un cultivo de maíz, de la variedad Aspros 823 de ciclo intermedio precoz, la parcela consta de una superficie de 1.3 Ha, regada por un sistema de goteo automático, a su vez la parcela se dividió en 18 subunidades para el establecimiento de tratamientos los cuales consistieron en temporal, 60%, 80%, 100% y 120% de la aplicación de riego de acuerdo a la ETo, la duración del experimento fue del 18 de Junio de 2017 al 21 de Noviembre de 2017.

Los resultados de los análisis de suelo dieron como resultado para las propiedades físicas del suelo una textura Franca, con Punto de Saturación del 40%, Capacidad de Campo de 21.3%, Punto de Marchitez Permanente del 12.7 %, una Densidad Aparente de 1.03 g/cm³ y una Conductividad Eléctrica de 0.70 ds/m, de acuerdo a los estudios de los laboratorios Fertilab.

Para el desarrollo de las actividades se hizo uso de los siguientes materiales:

Cámara fotográfica de 8 megapíxeles (iPhone 4s)

Tripe para soporte de cámara con bastones Bluetooth con altura de hasta 3.20m.

Adobe Photoshop

Visual Studio con Open CV

Paquetería Office

4.2.1 Toma de fotografías en campo.

Las fotografías se tomaron en el cultivo semanalmente durante todo el ciclo fenológico, la primer foto por parcela se capturo cuando la emergencia de la planta sobrepasaba el 60%, se eligieron lugares donde el 100 % de las plantas germinaron de forma continua, marcando las plantas modelo para darles el seguimiento durante todo el proceso, Figura 4-1.



Figura 4- 1: Seguimiento de plantas de maíz.

Para la toma de las fotografías se trabajó con un tripie que variaba su altura desde 1.3m hasta los 3.2m, al cual se le adaptó un bastón fotográfico con bluetooth en el cual se colocaba el celular, para que al subir el dispositivo a demasiada altura no hubiera problemas para la captura de la fotografía, para obtener un control del área que se estaba fotografiando se armó un marco de 1.1m por 1.1m con el cual se delimitó el terreno y así obtener datos constantes, las alturas para la toma de fotos fueron de 1.7m hasta el mes de agosto y de 3m hasta final de ciclo, cabe mencionar que el marco de control estuvo a nivel del suelo hasta el cambio de alturas del tripie y después se agregó una extensión de 1.40m de altura para seguir llevando un control de la zona Figura 4-2.



Figura 4- 2: Tripie, bastón y marco para seguimiento fotográfico.



La toma de las fotografías se realizó alrededor de las 12 del día para minimizar posteriores problemas a la hora de realizar el procesamiento de las imágenes. Debido a que el método aquí propuesto calcula la cobertura del suelo en forma de porcentaje (más que el número de píxeles), la resolución final de la imagen no afectará a los resultados; el método es, por lo tanto escalainvariante. En otras palabras, ya que el porcentaje divide el número de píxeles de vegetación por el número total de píxeles de la imagen, esta proporción seguirá siendo la misma aunque la imagen se escale (Fernández, et. al. 2014).

4.2.2 Extracción de Porcentaje de Cobertura Vegetal

De acuerdo a Mejía (2005), hay partes fundamentales del procesamiento digital de imágenes aunque no siempre se siguen todos los pasos que este presenta:

- Adquisición de imágenes: Generalmente incluye preprocesamiento.
- Mejora de la imagen: La idea de este paso es obtener detalles que no se veían
- Restauración de la imagen: También mejora la apariencia de la imagen, a diferencia de la mejora de la imagen, subjetiva, la restauración es objetiva.
- Procesamiento del color: Procesamientos especiales para el color.
- Ondeletas: Fundamentalmente utilizadas para representar imágenes en varios grados de resolución. Se utiliza principalmente en compresión.
- Compresión: Reduce el almacenamiento requerido para guardar una imagen.
- Procesamiento morfológico: Herramientas para extraer componentes de la imagen útiles para la representación y descripción de formas.
- Segmentación: Divide una imagen en sus partes constituyentes.
- Representación y descripción: Se toman decisiones tales como si la forma obtenida debe ser tratada como una frontera o una región, y extrae atributos que resultan en información cuantitativa de interés.

Haciendo una revisión del material tomado en campo se decidió hacer correcciones de las fotografías tomadas, pues aunque se trató que las tomas



estuvieran rectas de la mejor manera posible, se presentaban inclinaciones mínimas de los lado verticales y horizontales del marco, además de corrección de la concavidad de la cámara usada (Figura 4-3), el software de fotografía Adobe Photoshop fue un programa que mostró las bondades necesarias para estas tareas, usando el filtro Ancho Largo adaptable, en el módulo de Perspectiva.

Primeramente se carga la imagen en el programa, y se abre el modulo del filtro donde se hacen las correcciones horizontales y verticales, para enderezar la imagen, el segundo paso es la generación de la restricción de polígono la cual hace las correcciones de perspectiva de acuerdo al lente de la cámara, destacando que el programa detecto automáticamente que la cámara de toma de las fotos era un iPhone 4s dando así las características de corrección.

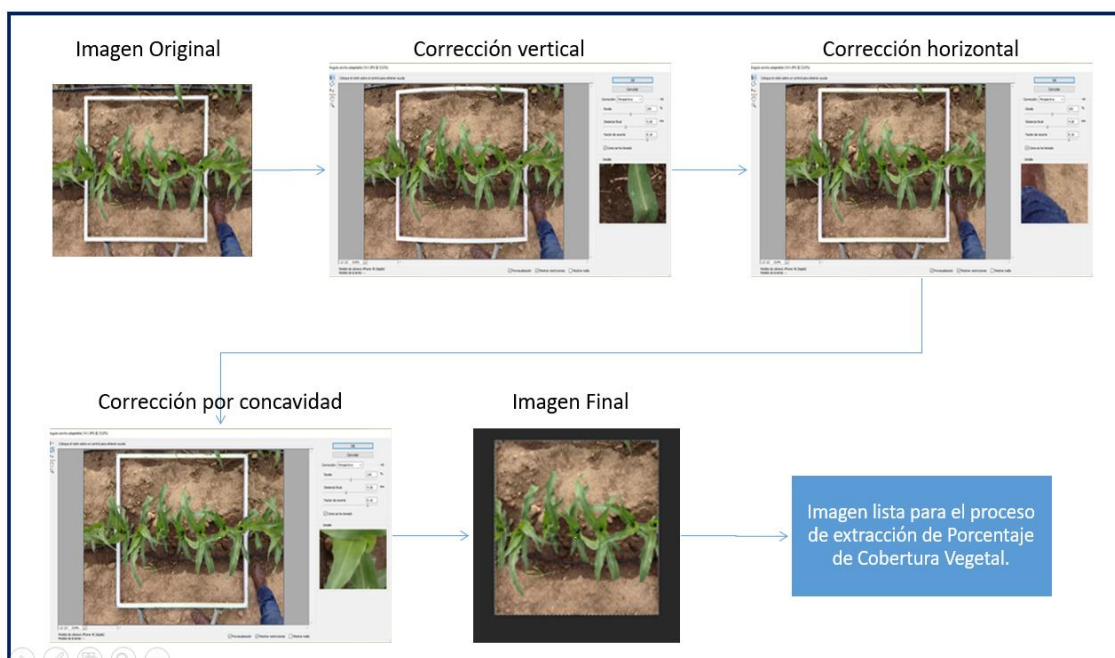


Figura 4- 3: Proceso de corrección de líneas y perspectiva.

El siguiente paso es la obtención de los valores del Porcentaje de Cobertura Vegetal del cultivo, para esta sección se generó un programa de extracción de colores RGB en VisualStudio con Open CV, el programa (Figura 4-4) permite introducir una imagen, elegir el rango de colores que se desea extraer y al final da una imagen blanco y negro y a partir una relación, generar el valor de Porcentaje de Cobertura Vegetal a partir del número de píxeles.

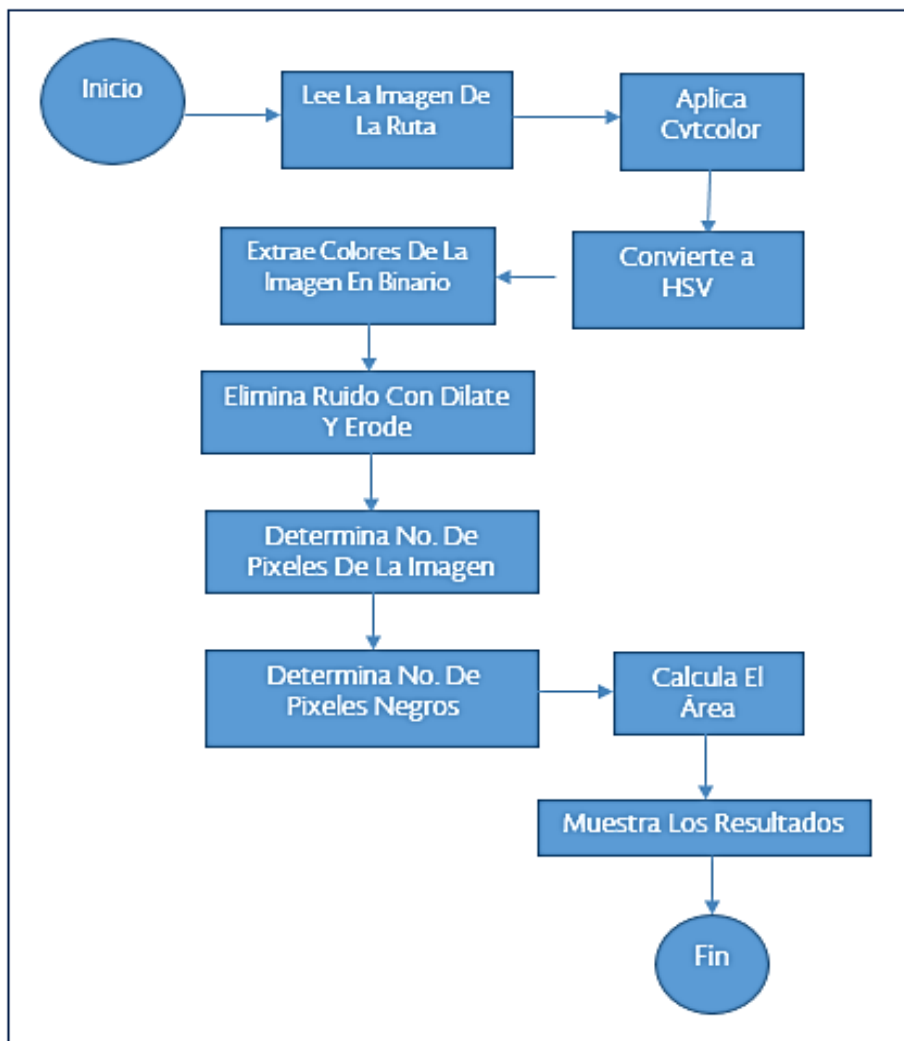


Figura 4- 4: Diagrama de flujo del programa para cálculo de PCV.

Las imágenes tenían un tamaño de 2049x1569, que al ser ocupadas por el programa saldrían incompletas en la pantalla a abrir la imagen en la aplicación de capas, por lo que fueron reducidas de tamaño a 1024x780, o sea el 50%.

El proceso del programa consistió en la generación de máscaras para poder obtener un producto final, que se inició con la inclusión de librerías, los namespace y la ubicación de la imagen a procesar.

```
#include <opencv2\opencv.hpp>
#include < opencv/highgui.h >
#include "LabelingW.h"
using namespace cv;
using namespace std;
```



```
int main()  
{  
Mat img = imread("1.jpg",1);
```

El siguiente paso fue declarar las variables o nombres de las máscaras que fueron obtenidas en el proceso.

```
Mat HSV;  
Mat binaria;  
Mat dilated;  
Mat eroded;
```

Las máscaras que se generaron fueron concebidas mediante La función `cvtColor` que convierte una imagen de entrada de un espacio de color a otro, es decir el canal RGB o BGR.

```
cvtColor(img,HSV, CV_BGR2HSV);
```

La imagen resultante se convirtió en una binaria, es decir pasara a ser blanco y negro, en la cual los pixeles blancos representaron al maíz, esto buscando valores que incluyeran el color verde en la escala BGR hasta antes de la floración, después se amplió la gama de colores del rango para detectar los diversos colores presentados en la planta.

```
inRange(HSV, Scalar(65,55,5), Scalar(180,255,255), binaria);
```

El proceso anterior genero una imagen lista para analizar, pero algunas veces contienen aun ruido el cual se puede eliminar con las herramientas pertinentes como erosión y la dilatación.

```
cv::dilate(binaria,dilated,cv::Mat());  
cv::erode(dilated,eroded,cv::Mat());
```

El siguiente paso es una regla de tres para poder calcular el área el porcentaje, primero se calculó el número total de pixeles, esto multiplicando el número de filas y columnas de la imagen.

```
int TotalNumberOfPixels = img.rows * img.cols;
```



El siguiente fue determinar el número de píxeles en 0, los cuales se obtienen de una resta, de los píxeles totales menos los píxeles blancos o 1 de la imagen ya libre de ruido, ósea la erodada.

```
int ZeroPixels = TotalNumberOfPixels - countNonZero(eroded);
```

Lo siguiente es asignar un área a la fotografía, en este caso en cm²

```
int areatotal = 30; *** en centímetros cuadrados  
int porcentajetotal = 100;
```

Para finalizar con una regla de tres que da el área del maíz.

```
int area = (areatotal*ZeroPixels)/TotalNumberOfPixels;  
int porcentaje = (porcentajetotal*ZeroPixels) / TotalNumberOfPixels;;
```

```
cout<<"Total de pixeles es: " <<TotalNumberOfPixels << endl;  
cout << "Total de pixeles blancos es: " << countNonZero(eroded) <<  
endl;  
cout<<"Total de pixeles negros es: "<<ZeroPixels<<endl;  
cout<<"Por lo tanto el area del producto agrícola es: "<<area<<"  
cm^2"<<endl;  
cout << "Por lo tanto el porcentaje del producto agrícola es: " <<  
porcentaje << "%" << endl;
```

```
imshow("Original", img);  
imshow("HSV",HSV);  
imshow("Binaria", binaria);  
imshow("Erosionada",eroded);  
waitKey(0);  
return 1;  
}
```

Figura 4-5, ya con los rangos de extracción bien definidos por cada imagen se corrió el programa para que proporcionara el valor del Porcentaje de Cobertura Vegetal.

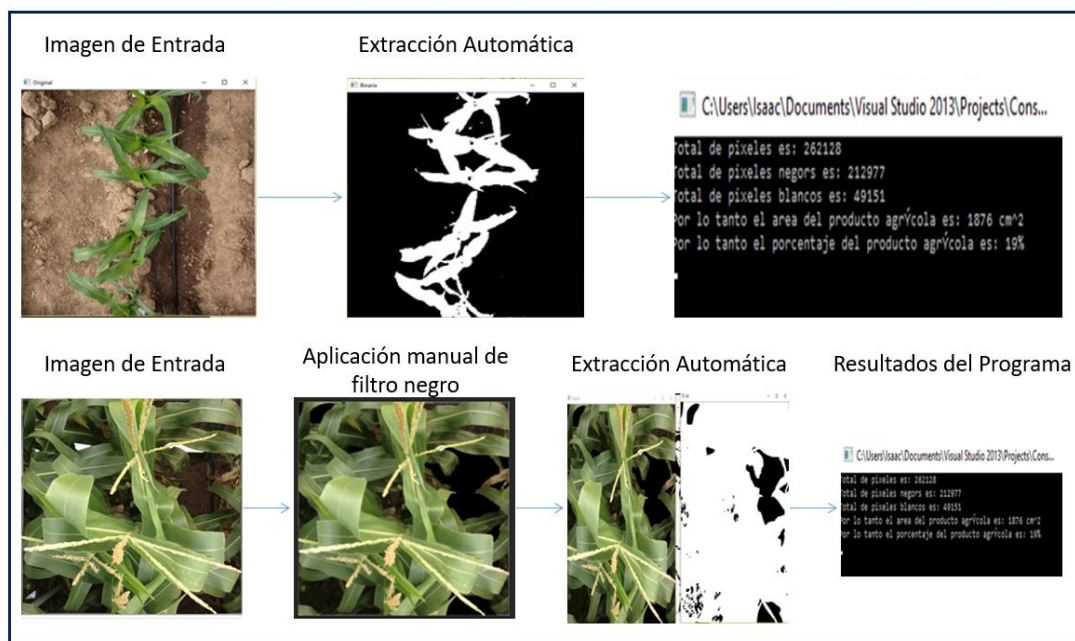


Figura 4- 5: Proceso de extracción de Porcentaje de Cobertura Vegetal.

Ya con los resultados de los valores del Porcentaje de Cobertura Vegetal, se agruparon de acuerdo al tratamiento que se les dio, eliminando valores que causaran una desviación muy grande en los datos por diferentes factores presentados a lo largo del ciclo y se calculó la media y desviación estándar.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$
$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

Donde:

$\bar{x}$: Media

x_i : Observación de cobertura vegetal

N : Número de Observaciones

S : Desviación Estándar



Además se aplicó un Análisis de Varianza completamente al azar (Infante y Zárate, 2011), este se realizó por tratamiento durante todo el ciclo de cultivo (Temporal, 60, 80 100 y 120% de la ETo) para poder comparar el PCV cada semana, y concluir si hay diferencias entre ellas, con un Nivel de significancia $\alpha = 0.05$, en el que las hipótesis planteadas para cada tratamiento fueron:

Hipótesis nula (H_0) es: todas las semanas los PCV son iguales durante el ciclo.

Hipótesis alterna (H_a): al menos en una semana el PCV es diferente a las demás durante el ciclo.

$$H_0: S_I = S_{II} = \dots = S_{20} \text{ vs } H_a: S_i \neq S_j$$

En la semana 19 solo hay cuatro tratamientos y en la 20 tres tratamiento debido a la senescencia del maíz.

También se incluye un análisis de medias evaluado con la prueba de Tukey, puesto que el ANOVA solo deduce si al menos una semana es diferente con esta prueba se podrá saber cuántas semanas son iguales, diferentes y cuales comparten características estadísticas.

4.2.3 Determinación de Etapas de Crecimiento

En esta parte se procedió al uso de las fotografías de cultivos y los datos de Porcentaje de Cobertura Vegetal, Allen *et. al.* (2006) dan diferentes condiciones para la determinación de estas etapas, que se mencionan a continuación y se explica la forma en que se determinaron.

- Inicial

La longitud de la etapa inicial depende en gran medida del tipo de cultivo, la variedad del mismo, la fecha de siembra y del clima. El final de la etapa inicial ocurre cuando la vegetación verde cubre aproximadamente un 10% de la superficie del suelo.



- Desarrollo del cultivo

La etapa de desarrollo del cultivo está comprendida desde el momento en que la cobertura del suelo es de un 10% hasta el momento de alcanzar la cobertura efectiva completa. Para una gran variedad de cultivos, el estado de cobertura completa ocurre al inicio de la floración.

- Medios de temporada

La etapa de mediados de temporada comprende el período de tiempo entre la cobertura completa hasta el comienzo de la madurez. El comienzo de la madurez está indicado generalmente por el comienzo de la vejez, amarillamiento o senescencia de las hojas, caída de las hojas, o la aparición del color marrón en el fruto, hasta el grado de reducir la evapotranspiración del cultivo en relación con la ETo de referencia.

- Finales de temporada

La etapa final o tardía de crecimiento comprende el período entre el comienzo de la madurez hasta el momento de la cosecha o la completa senescencia. Esta etapa por supuesto se tomó a partir del último dato hasta el final del experimento.

Estas etapas determinadas se compararan con las que ya están establecidas por Allen *et. al.* (2006) en el Boletín 56 de la FAO para el cálculo de láminas de riego, las duraciones de las etapas son variadas de acuerdo a diferentes zonas y tipos de cultivo, la Figura 4-6 muestra un extracto de las tablas de duración de cultivo para maíz, en las que se tienen dos tipos de cultivo, diferentes duraciones y las zonas en las que se obtuvieron los datos, en este caso se ocupó Maíz para grano, en cuanto a Condiciones de zona y características de duración de ciclo de la variedad usada se tomaron las la Zona de California E.U. con una duración de 150 días.



Maíz (grano)	30	50	60	40	180	Abril	Este de África (alt.)
	25	40	45	30	140	Dic./Ene.	Clima Árido
	20	35	40	30	125	Junio	Nigeria (húmedo)
	20	35	40	30	125	Octubre	India (seco, frío)
	30	40	50	30	150	Abril	España (prim.ver); Calif. EU
	30	40	50	50	170	Abril	Idaho, EU
Maíz (dulce)	20	20	30	10	80	Marzo	Filipinas
	20	25	25	10	80	May./Junio	Mediterráneo
	20	30	50/80	10	90	Oct./Dic.	Clima Árido
	30	30	30	10	110	Abril	Idaho, EU
	20	40	70	10	140	Ene.	Calif. Desierto, EU

Figura 4- 6: Diferentes etapas de Crecimiento en maíz FAO 56.

4.3 Resultados y Discusión

El resultado de la extracción de Porcentajes de Cobertura Vegetal, arrojó una serie de gráficas, en la figura 4-6 se muestran las tendencias de acuerdo al tratamiento que se estableció. Para el tratamiento de Temporal una de las repeticiones estaba muy desfasada con respecto a las otras dos y fue eliminada para evitar desviaciones extremas al momento de hacer el cálculo de medias, en el caso de la gráfica del 60% alcanzan su máximo y comienzan a descender para tener una etapa de mediados de temporada de entre el 60 y 70% de Cobertura, los tratamientos de 80%, 100% y 120% ya presentan una normalización en cuanto a los valores de la etapa de mediados de temporada con una tendencia casi lineal, obteniendo valores de cobertura vegetal de entre el 75 y 85 % en el tratamiento de 80% , 78 al 90% en el 100% y entre el 80% y 90% para 120% sin alcanzar nunca el 100% de Cobertura Vegetal.

Los datos obtenidos del procesamiento de imágenes para cobertura vegetal se analizaron con fórmulas estadísticas para obtener la Media y la Desviación Estándar, Cuadro 4-1.



Cuadro 4- 1: Media y Desviación Estándar de Porcentaje de Cobertura Vegetal por cada tratamiento.

Día Cultivo	Temporal		60%		80%		100%		120%	
	Media	D.E.	Media	D.E.	Media	D.E.	Media	D.E.	Media	D.E.
3	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.25	0.50
10	3.50	0.71	2.67	0.58	5.33	1.53	6.50	4.20	6.00	1.83
17	11.50	3.54	10.67	1.53	15.00	2.00	13.00	5.10	11.25	0.50
24	21.50	2.12	17.33	3.79	24.33	3.21	21.00	4.69	22.25	3.95
31	42.00	1.41	32.00	6.08	40.67	12.58	42.00	10.55	42.75	3.86
38	69.00	7.07	51.00	7.81	68.67	8.33	58.50	13.80	65.75	9.98
45	77.00	2.83	78.67	3.06	79.33	6.35	74.50	6.76	79.25	11.15
52	80.50	6.36	83.67	2.08	80.67	5.13	78.50	7.59	82.25	4.79
59	84.50	3.54	77.67	2.31	82.33	5.51	84.75	9.29	86.25	7.41
66	83.00	4.24	76.67	3.51	82.33	4.73	83.00	9.56	85.00	5.66
73	79.50	7.78	72.67	7.23	80.67	4.51	82.50	7.68	84.25	3.77
80	79.00	8.49	72.00	9.85	82.67	4.51	83.50	6.95	85.25	3.77
87	79.50	6.36	70.67	9.87	79.67	3.79	82.75	7.80	86.25	3.95
94	78.00	9.90	72.33	11.02	78.67	6.43	81.50	7.59	84.75	3.69
101	70.50	13.44	67.33	16.65	77.67	4.73	81.75	6.40	83.50	3.42
108	71.00	12.73	65.00	17.69	77.00	5.00	82.75	5.38	82.75	4.79
115	67.00	8.49	66.33	16.04	74.67	8.08	81.25	7.80	82.50	6.95
122	61.50	4.95	63.00	14.93	70.67	6.11	72.25	8.88	77.75	3.40
129	-	-	58.33	13.05	68.33	8.08	65.00	7.02	73.50	1.73
136	-	-	48.00	15.56	68.67	6.81	64.25	6.95	70.75	3.95

Las Desviaciones de los datos obtenidos, Figura 4-7, no varían demasiado en los tratamientos elegidos para el análisis, a excepción de la etapa final del tratamiento al 60%, lo que indica que se trabajó de forma homogénea durante el proyecto por lo que los datos son representativos.

También se observa que en la parcela del 60% la desviación de los datos es muy grande a partir del día 73 del cultivo, este fenómeno se explica puesto que a un lado de las parcelas de este tratamiento había zonas de árboles, que afectaron de manera significativa a las repeticiones.

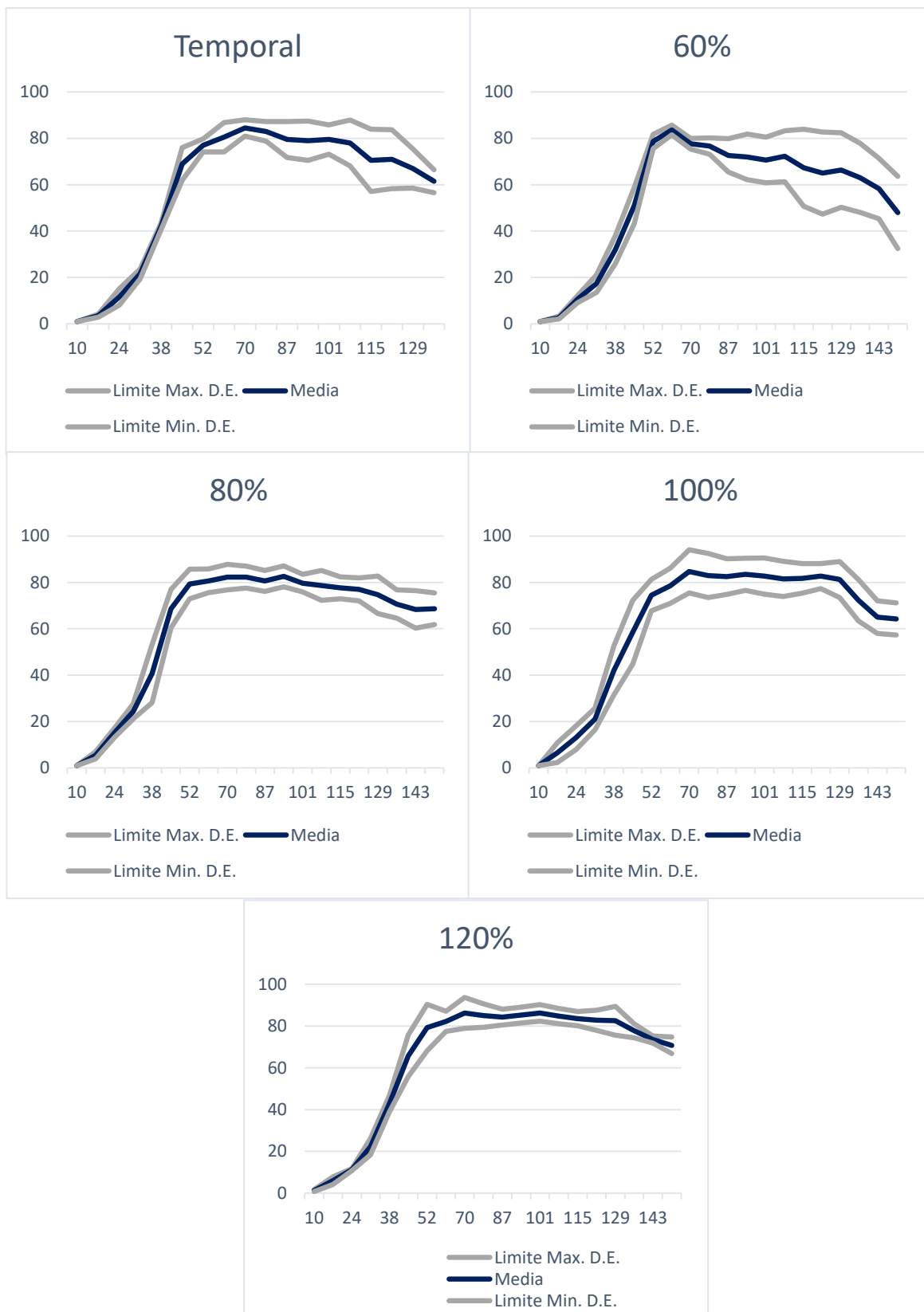


Figura 4- 7: Porcentaje de cobertura vegetal por tratamiento.



El Análisis de Varianza se realizó por tratamiento, en los cuadros 4-2, 4-3, 4-4, 4-5 y 4-6 se observa al aplicar la Prueba de Fisher que la muestra da evidencia estadísticamente significativa para rechazar H_0 (todas las semanas los PCV son iguales) y aceptar H_a por lo que al menos una semana el PCV es diferente a las demás, esto con la Regla de decisión: H_0 se rechaza si $F_o > F$.

Cuadro 4- 2: ANOVA Tratamiento Temporal PCV.

Fuente de variación	GL	Suma de Cuadrados	Cuadrados Medios	F_o	F
Tratamiento	17	28911.8	1700.69	35.66	2.233
Error	18	858.5	47.69		
Total	35	29770.3			

Cuadro 4- 3: ANOVA Tratamiento 60% PCV.

Fuente de variación	GL	Suma de Cuadrados	Cuadrados Medios	F_o	F
Tratamiento	18	40692	2260.68	23.93	1.883
Error	38	3589	94.46		
Total	56	44282			

Cuadro 4- 4: ANOVA Tratamiento 80% PCV.

Fuente de variación	GL	Suma de Cuadrados	Cuadrados Medios	F_o	F
Tratamiento	19	44073	2319.64	64.29	1.853
Error	40	1443	36.08		
Total	59	45517			

Cuadro 4- 5: ANOVA Tratamiento 100% PCV.

Fuente de variación	GL	Suma de Cuadrados	Cuadrados Medios	F_o	F
Tratamiento	19	62745	3302.35	55.9	1.763
Error	60	3544	59.07		
Total	79	662S9			

Cuadro 4- 6: ANOVA Tratamiento 120% PCV.

Fuente de variación	GL	Suma de Cuadrados	Cuadrados Medios	F_o	F
Tratamiento	19	67844	3570.72	132.56	1.763
Error	60	1616	26.94		
Total	79	69460			



Al solo saber que por lo menos una semana es diferente se procedió a aplicar la prueba de Tukey, Cuadro 4-7, que dio como resultado que las primeras 5 semanas en los 5 Tratamientos son un grupo que comparten características solo de una semana a otra o llegan a ser distintas estadísticamente, pues llega a haber de 3 a 4 grupos diferentes, al contrario de las siguientes semanas que corresponden prácticamente al final de la etapa de desarrollo y mediados de temporada, en los que se llegan a estabilizar los grupos y comparten características prácticamente todas las semanas.

Cuadro 4- 7: Prueba de Tukey para PCV.

Temporal		60%		80%		100%		120%	
Semana	Grupo	Semana	Grupo	Semana	Grupo	Semana	Grupo	Semana	Grupo
9	A	8	A	12	A	9	A	13	A
10	A	7	A B	10	A	12	A B	9	A
8	A	9	A B	9	A	10	A B	12	A
13	A	10	A B	11	A	16	A B	10	A
11	A	11	A B	8	A	13	A B	14	A
12	A	14	A B	13	A	11	A B	11	A B
14	A	12	A B	7	A	15	A B	15	A B
7	A	13	A B	14	A	14	A B	16	A B
16	A	15	A B	15	A	17	A B	17	A B
15	A	17	A B	16	A	8	A B C	8	A B
6	A B	16	A B	17	A	7	A B C	7	A B C
17	A B	18	A B	18	A	18	A B C	18	A B C
18	A B	19	A B C	20	A	19	A B C	19	A B C
5	B C	6	B C	6	A	20	B C	20	B C
4	C D	5	C D	19	A	6	C D	6	C
3	D	4	D E	5	B	5	D	5	D
2	D	3	D E	4	B C	4	E	4	E
1	D	2	D E	3	C D	3	E	3	E F
		1	E	2	D	2	E	2	F
				1	D	1	E	1	F

El cálculo de la duración de etapa inicial resultó de manera directa trabajando con los valores el PCV, visualizando la gráfica y haciendo una interpolación para dar con el día que tenga el 10% de cobertura vegetal. Figura 4-8.

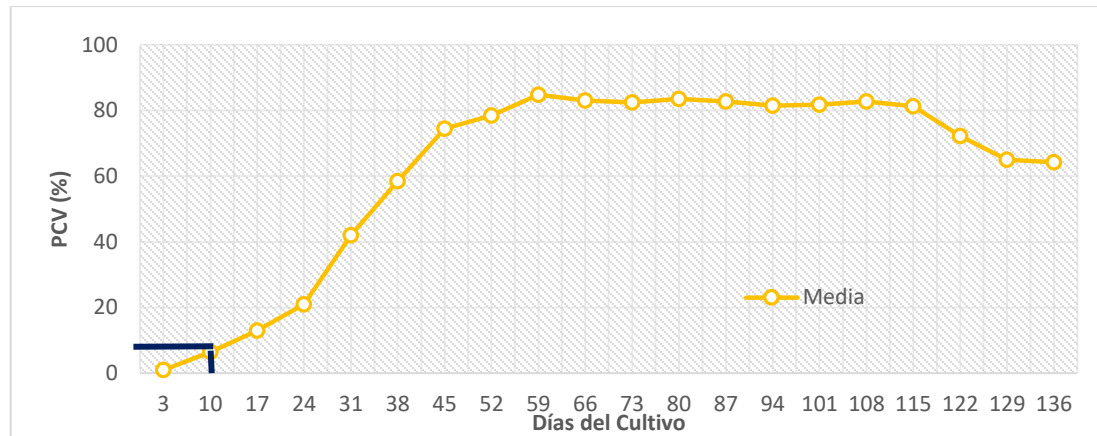


Figura 4- 8: Determinación de Etapa inicial de Crecimiento.

Los resultados de la interpolación lineal aplicada en cada uno de los tratamientos se concentraron en el Cuadro 4-8, la duración ronda los 20 días en todos los casos.

Cuadro 4- 8: Duración de etapa inicial por tratamiento.

Tratamiento	Porcentaje	Día de cultivo
Temporal	10	22.7
60%	10	23.4
80%	10	20.4
100%	10	20.8
120%	10	22.3

La etapa de desarrollo necesita de la revisión de dos características mencionadas por Allen et. al. (2006) para poder obtener los datos, en esta etapa se realizó la búsqueda de la floración en cada uno de los tratamientos para aproximarse a la fecha de floración, además de tomar como referencia la fecha de máximo porcentaje de cobertura para poder obtener el dato de término de la Etapa de Desarrollo, Figura 4-9, puesto que la cobertura al 100% no se dio en los experimentos, de acuerdo a las relaciones establecidas entre variables que se han explicado en los trabajos de Escarabajal et. al. (2015) se tomó como inicio de esta etapa al máximo valor e inicio de la estabilización de los datos posteriores de cobertura vegetal, también se revisaron las tomas de las fotografías para



observar la fecha en que inicio la floración de las plantas, determinando que las fechas eran bastante aproximadas

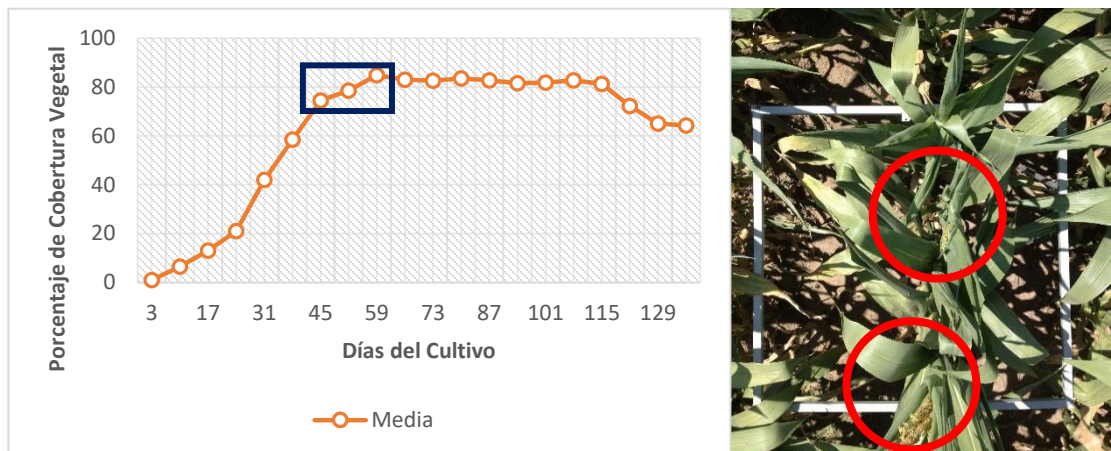


Figura 4- 9: Determinación de la Etapa de Desarrollo de Cultivo.

El cuadro 4-9 muestra los días tanto para floración como el día de estabilización de valores de los cuales se ocupó el promedio como dato del día de término de esta etapa.

Cuadro 4- 9: Día de término de Etapa de Desarrollo.

Parcela	Día de floración	Día de inicio de Estabilización	Promedio
1	80	70	75
2	80	70	75
3	80	70	75
4	80	70	75
5	80	70	75
6	80	70	75
7	87	70	79
8	87	70	79
9	87	70	79
10	87	70	79
11	87	70	79
12	87	70	79
13	87	70	79
14	87	70	79
15	87	70	79
16	87	70	79
17	87	70	79
18	87	70	79



La etapa de desarrollo se definió observando las variaciones de color como indican Allen *et. al.* (2006) buscando síntomas de cambio de color en las hojas del verde característico del maíz a variaciones más opacas y perdida de vigor en las hojas, Figura 4-10, obteniendo los datos de Cuadro 4-10.



Figura 4- 10: Determinación de la etapa de Mediados de Temporada.

Cuadro 4- 10: Día de término de Etapa de Mediados de Temporada.

Tratamiento	Parcela	Día de cambio de color	Promedio tratamiento
Temporal	1	115	115
	3	115	
	6	115	
60%	2	115	115
	4	115	
	5	115	
	7	140	
80%	12	129	137.3
	15	140	
	18	140	
	8	140	
100%	10	140	140
	14	140	
	17	140	
	9	140	
120%	11	140	140
	13	140	
	16	140	



La etapa final se tomó en 30 días, cuando las mazorcas de maíz estaban a un 14% de contenido de humedad para ser cosechadas.

En la figura 4-11 se observa que hay variación en cuanto a las duraciones de las etapas de crecimiento, para la etapa inicial en todos los casos se tiene prácticamente una semana menos de duración con respecto a la etapa elegida del Boletín 56 (Allen *et. al.* 2006) y revisando los datos de las demás condiciones proporcionadas ninguna se acercó a los valores locales obtenidos, la etapa de desarrollo supera en 12 días a la de la FAO para los tratamientos de Temporal y 60% de la ETo, y en un promedio de 18 días a los tratamientos restantes, pero para el caso de la etapa de mediados de temporada los tratamientos de Temporal y 60% tienen 10 días menos que los usados del Boletín 56 y los tratamientos del 80, 100 y 120% de la ETo superan a la etapa teórica por 8, 11 y 11 días respectivamente, la etapa de finales de temporada se ajusta a los 30 días establecidos en el Boletín 56.

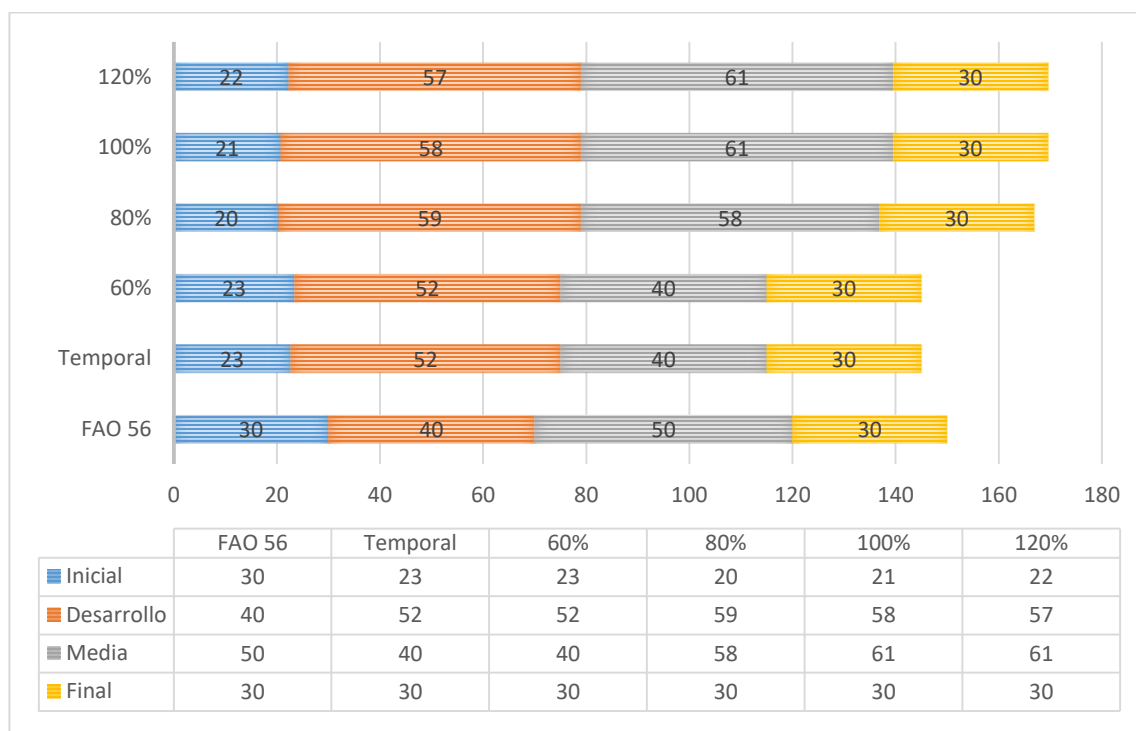


Figura 4- 11: Etapas de Desarrollo en los Diferentes Tratamientos.



4.4 Conclusiones

El procesamiento digital de imágenes es una herramienta que ha venido a la alza en cuanto a su uso en diferentes campos, se comprobaron sus bondades al aplicarse para la extracción de cobertura vegetal, al realizarse de manera sistemática, siguiendo los principios de la técnica mencionados se simplifica en demasía el trabajo, dando la visión para la apertura de estas herramientas para el campo del riego de precisión

El Análisis de Varianza aplicado a los datos de Cobertura Vegetal por tratamiento concluyo en el rechazo de la H_0 por lo que hay diferencias estadísticas entre cada semana del ciclo, la prueba de Tukey amplía la idea de que las primeras semanas hay cambios significativos en el experimento y en la etapa de desarrollo de cultivo cuando no hay cambios significativos en la cobertura se comparten características estadísticas semanales.

En cuanto a la duración de las Etapas de Crecimiento del maíz se pudo observar que es necesario adaptar estos trabajos puesto que los valores propuestos por el Boletín 56 de la FAO no aportan de acuerdo a las condiciones locales del clima, para temporal y 60% de la ETo el ciclo dura 145 días, para 80% de la ETo 167 días y para 100% y 120% alcanza los 170 días.



4.5 Literatura Citada

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo. FAO. Roma.
- Barba Escudero, Jorge Enrique. (2012). Registro de imágenes para agricultura de precisión usando lenguaje C. (Tesis Profesional. Pontificia Universidad Católica Del Perú. Lima, Perú).
- Domínguez Torres, Alejandro. (1996). Procesamiento digital de imágenes. Perfiles Educativos, núm. 72, Instituto de Investigaciones sobre la Universidad y la Educación. pp. 1-11.
- Escarabajal Henarejos, D., Molina Martínez, J.M., Fernández Pacheco, D.G., Cavas Martínez, F., García Mateos G. (2015). Digital photography applied to irrigation management of Little Gem lettuce. Agricultural Water Management. 151. pp. 148-157.
- Fernández Pacheco, Daniel, Escarabajal Henajeros, David, Ruiz Canalez, Antonio, Conesa, Julian, Molina Martinez, Jose M. (2014). A digital image-processing-based method for determining the crop coefficient of lettuce crops in the southeast of Spain. Biosystems Engineering 117 pp 23-34.
- Infante Gil, S y Zárate de Lara, G. P. (2011). Métodos Estadísticos: Un enfoque interdisciplinario. Trillas 2° ed. México. pp. 401-426.
- López López, Rutilo. (2008) Producción de tomate de cascara (physalis ixocarpa brot.) basado en láminas de riego y acolchado plástico (Tesis Doctoral. Universidad Autónoma Chapingo, México).
- Martínez Rodríguez, Anniel. (2016). Sistema de procesamiento de imágenes RGB aéreas para agricultura de precisión. (Tesis Profesional, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Santa Clara, Cuba).
- Mejía Vilet, José Ramón. (2005). Procesamiento Digital de Imágenes. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. (1° ed.) UASLP San Luis Potosí, México.



RESUMEN

MODELACIÓN DE CRECIMIENTO DEL MAÍZ PARA LA OBTENCIÓN DE COEFICIENTES DE CULTIVO

Este capítulo busca relaciones entre los datos generados de Porcentaje de Cobertura Vegetal y la altura de planta medida durante el ciclo de cultivo de maíz que se estableció con diferentes Tratamientos de láminas de 60, 80, 100 y 120% de la ETo, de las cuales se encontraron modelos que se dividen en dos etapas, la primer etapa corresponde a la relación de PCV/h, de la cual se obtiene el Porcentaje de cobertura al introducir el dato de la altura del maíz y la segunda etapa que es la relación Kc/PCV que permite calcular el coeficiente Kc de la zona, modelos que se generaron para Kc Único y Dual, dichos modelos se ajustaron a 2 intervalos, el primero corresponde a las etapas inicial y de mediados de temporada del cultivo y el segundo intervalo a la etapa de desarrollo, logrando un mejor ajuste, que se verificó aplicando pruebas estadísticas como r^2 , RMSE e índice E, determinando que la exactitud de los modelos es excelente. Posteriormente se procedió a aplicar los valores de Kc obtenidos de los modelos y las etapas fenológicas calculadas en el capítulo 4 a los calendarios de riego, tomando como referencia los resultados del Kc Dual puesto que reflejan las condiciones observadas en campo, determinado que los tratamientos de 120% y 100% de la ETo debieron ser regados aproximadamente una semana más, el de 80% de la ETo un día más y el de 60% de la ETo debió ser dejado de regar 3 días antes.

Palabras Clave: Modelos, Riego, Coeficiente Kc, Etapa Fenológica, Cobertura Vegetal

Tesis de Maestría en Ingeniería, Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo.

Autor: López Rosano Jesús Isaac

Director de Tesis: Dr. Ramón Arteaga Ramírez



ABSTRACT

DIGITAL IMAGE PROCESSING FOR THE ESTIMATION OF K_c MODELING OF MAIZE GROWTH FOR THE OBTAINING OF CROP COEFFICIENTS

This chapter looks for relationships between the data generated from Percentage of Plant Cover and the height of plant measured during the cycle of maize cultivation that was established with different treatments of sheets of 60, 80, 100 and 120% of the ETo, of which We found models that are divided into two stages, the first stage corresponds to the relation of PCV / h, from which the percentage of coverage is obtained by introducing the data of the height of the maize and the second stage, which is the relation K_c / PCV that allows to calculate the coefficient K_c of the zone, models that were generated for Unique and Dual K_c, these models were adjusted to 2 intervals, the first corresponds to the initial and mid-season stages of the culture and the second interval to the stage Of development, achieving a better adjustment, which was verified applying statistical tests as r², RMSE and index E, determining that the accuracy of the models is excellent. Then, the K_c values obtained from the models and the phenological stages calculated in chapter 4 were applied to the irrigation schedules, taking as reference the results of the Dual K_c as they reflect the conditions observed in the field, determined that the treatments of 120% and 100% of the ETo had to be irrigated for a further week, 80% of the ETo one more day and 60% of the ETo had to be watered 3 days earlier.

Key Words: Models, Irrigation, Coefficient K_c, Phenological Stage, Coverage

Thesis, Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo.

Author: López Rosano Jesús Isaac

Advisor: Dr. Ramón Arteaga Ramírez



CAPÍTULO 5: MODELACIÓN DE CRECIMIENTO DEL MAÍZ PARA LA OBTENCIÓN DE COEFICIENTES DE CULTIVO

5.1 Introducción

El proceso de crecimiento de las plantas de los cultivos es dinámico y se desarrolla en el tiempo. Durante este como en el caso de cualquier otro proceso dinámico existen varios factores que afectan su dinámica. Estos factores se pueden clasificar en dos grupos: El primero consiste de factores cuya naturaleza no están a nuestro alcance, como es el caso del clima. La variación del clima afecta al desarrollo de las plantas de una manera arbitraria; la intensidad e influencia de las variaciones climáticas dependerá del tipo de cultivo, de la zona agrícola y de la agricultura practicada (temporal, riego o protegida). El segundo consiste en los factores cuya aplicación depende de nosotros, como es el caso del riego y de los fertilizantes (Antonio, 2014).

En cuanto al riego, la programación es un proceso de decisión orientado a determinar las cantidades de agua por aplicar y las fechas de aplicación de cada riego para minimizar deficiencias o excesos de humedad en el suelo que pudieran causar efectos adversos sobre el crecimiento, rendimiento y calidad de los cultivos. Con la programación adecuada del riego se pueden lograr objetivos múltiples como ahorrar agua, disminuir costos por ahorro de energía y mano de obra, minimizar estrés hídrico y maximizar rendimiento, así como maximizar calidad, rentabilidad o ingreso (Servín, 2015).

El proceso de programación de riego se rige principalmente por el cálculo de la ET y de acuerdo a Rincón *et. al.* (2011) un gran número de factores afectan significativamente a la evapotranspiración de los cultivos y en particular a la evaporación del suelo y a la transpiración de la planta. Entre ellos caben señalar los parámetros climáticos que expresan la demanda evaporativa de la atmósfera, los parámetros asociados a la disponibilidad de agua en el suelo, manejo del riego y otros.



Según Escarabajal *et. al.* (2015) en lo referente a la gestión eficiente del agua, el uso de la fotografía digital en la agricultura de precisión permite el monitoreo del crecimiento de las plantas, y así determinar las necesidades de agua de los cultivos en base a variables que están directamente relacionadas con la evapotranspiración (ETc), que se calcula multiplicando el coeficiente de cultivo (Kc) por la evapotranspiración de referencia (ETo) (Allen *et al.*, 2006).

Para el cálculo del valor Kc se acepta el método del Coeficiente dual FAO-56 como técnica estándar en ausencia de datos medidos para calcular la demanda de evapotranspiración de cultivos, utilizando un coeficiente de cultivo basal (Kcb) y un coeficiente de evaporación (Ke) (Phogat, *et. al.* 2016).

Actualmente la fotografía digital y las técnicas de procesamiento de imágenes han adquirido gran relevancia y se han convertido en una de las principales fuentes de información en tiempo real sobre diversos parámetros relacionados con el desarrollo y estado hídrico de los cultivos (Lorente *et al.*, 2012). El trabajo de Sakamoto *et. al.* (2012) da un panorama actual de estas técnicas y afirman que la mayoría de las cámaras digitales están diseñadas para funcionar simplemente guardando escenas en forma de fotografías. Pudiendo ser considerados dispositivos de teledetección al tomar evidencia de forma no destructiva, con las ventajas de tener precios bajos y que tienen varias características, incluyen elementos de imagen de alta resolución, alta sensibilidad ISO, bajo consumo de energía, funciones de disparo bajo el agua, gran capacidad de almacenamiento. Estas características permiten a cualquier persona tomar buenas fotos, incluso si no tienen conocimientos especializados o habilidades relacionadas con la fotografía. Aunque la cámara óptica no es compatible con los fotodiodos ópticos, el método, en términos de costo, tiene la ventaja de que la imagen digital en color permite una evaluación visual de la apariencia de la vegetación, como la fracción de vegetación, el color de las hojas y el tipo de planta.

Por todas estas ventajas en los últimos años se ha trabajado con cámaras comerciales aplicándolas en diferentes áreas de la agricultura destacando



trabajos como la identificación de especies vegetales (Meyer *et al.*, 1999), las malas hierbas (Pérez *et al.*, 2000), el diagnóstico de Crecimiento de los cultivos en la fracción vegetativa (Lukina *et al.*, 1999, Woebbecke *et al.*, 1995), cálculo de Índice de Área Foliar (Demarez *et al.*, 2008, Shibayama *et al.*, 2011), color de hojas (Adamsen *et al.*, 1999, Shibayama *et al.*, 2009a), y determinación de nitrógeno (Matsuda *et al.*, 2003, Shibayama *et al.*, 2009b), hasta llegar a la base del presente trabajo con Escarabajal *et al.* (2015) con la determinación de porcentaje de área foliar.

Ya con el cálculo de variables aplicando esta tecnología el siguiente paso corresponde a la modelación, los modelos son definidos por López *et al.* (2005) como descripciones directas de datos que proporcionan relaciones observables entre las variables de un sistema o fenómeno, sin proporcionar alguna explicación de los mecanismos subyacentes. Estos modelos son un poderoso medio para describir y resumir datos, ejemplos de ellos son los modelos de regresión simple y regresión múltiple, redes neuronales, modelos difusos o modelos neuro-difusos.

Por lo que de acuerdo a este contexto el fin de este capítulo es el de buscar relaciones entre las variables tomadas durante el ciclo de cultivo de maíz como Porcentaje de Cobertura Vegetal y altura de la planta para la obtención de modelos que permitan el cálculo del coeficiente de cultivo Kc.

5.2 Materiales y Métodos

La etapa de campo se realizó en el Campo Experimental (Figura 5-1), de la estación meteorológica de la Universidad Autónoma Chapingo, con coordenadas 19° 16' 52" latitud Norte y 99° 39' 0" longitud Oeste, a la que le corresponde un clima Cb (Wo) (W) (i') g, que es para climas templados subhúmedos con lluvias en Verano, una época seca en invierno y con poca oscilación térmica entre 5 y 7 °C. La temperatura media anual es de 15.5 °C y precipitación media anual de 664mm (López, 2008).



Figura 5- 1: Parcela Experimental.

Para cumplir con el objetivo se estableció un cultivo de maíz, de la variedad Aspros 823 de ciclo intermedio precoz, la parcela consta de una superficie de 1.3 Ha, regada por un sistema de goteo automático, a su vez la parcela se dividió en 18 subunidades para el establecimiento de tratamientos, (Figura 5-2), los cuales consistieron en temporal, 60%, 80%, 100% y 120% de la aplicación de láminas de riego de acuerdo a la ETo, la duración del experimento fue del 18 de Junio de 2017 al 21 de Noviembre de 2017.



Figura 5- 2: Tratamiento al 80% de la ETo.



Para el desarrollo de las actividades se hizo uso de los siguientes materiales:

Cámara fotográfica de 8 megapíxeles (iPhone 4s)

Tripe para soporte de cámara con bastones Bluetooth con altura de hasta 3.20m.

Visual Studio con Open CV

Paquetería Microsoft Office

Matlab R2015

5.2.1 Toma de Datos en Campo

Durante el ciclo del cultivo de maíz se tomaron los datos necesarios para poder realizar los modelos, como fueron las fotografías para el cálculo de Porcentaje de Cobertura Vegetal (PCV), para las cuales se empleó un tripie con bastones Bluetooth sobre el cual se colocaba la cámara fotográfica que dio seguimiento a un área definida por un marco de 1.1 x 1.1m, obteniendo fotografías que fueron procesadas por medio de un programa ejecutado en VisualStudio con OpenCV y así se obtuvieron los datos, otra variable ocupada fueron los valores de coeficiente KC Único y Kc Dual estos calculados a partir de la metodología propuesta por Allen *et. al.* (2006), destacando que a partir de los coeficientes Duales se realizó el calendario de riego del cultivo, finalmente otro dato medido durante la etapa experimental fue la altura de planta cada semana a las mismas plantas. (Figura 5-3).



Figura 5- 3: Toma de datos en campo.



5.2.2 Procesamiento de Datos Experimentales

Los datos empleados fueron los de PCV y altura de la planta (Figura 5-4 y 5-5), se les saco la media y la desviación estándar aplicando las siguientes formulas:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

Donde:

$\bar{x}$: Media

x_i : Observación de altura de la planta

N: Número de Observaciones

S: Desviación Estándar

También se realizó un Análisis de Varianza a los valores obtenidos, para el caso del Porcentaje de Cobertura Vegetal el análisis de puede consultar en el Capítulo 4.

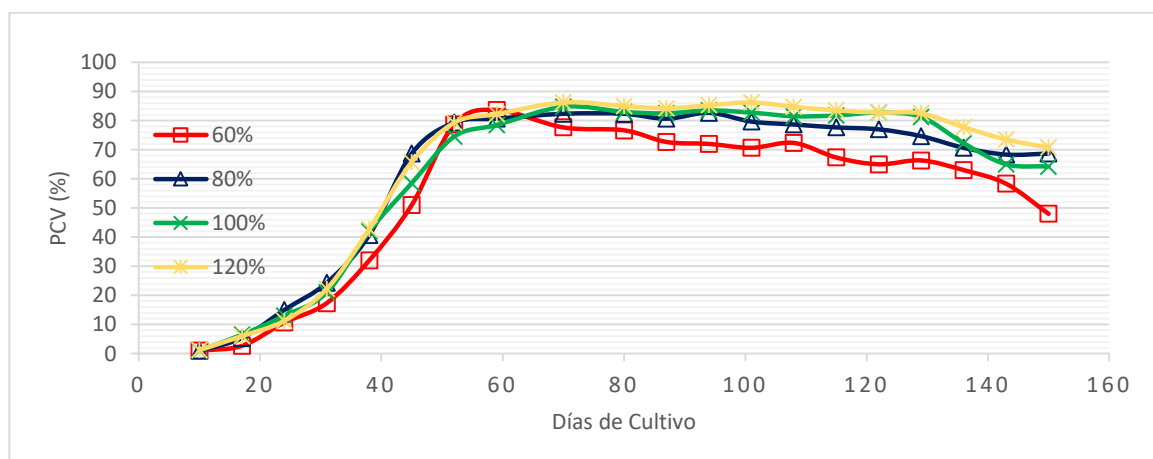


Figura 5- 4: Porcentaje de Cobertura Vegetal de tratamientos.

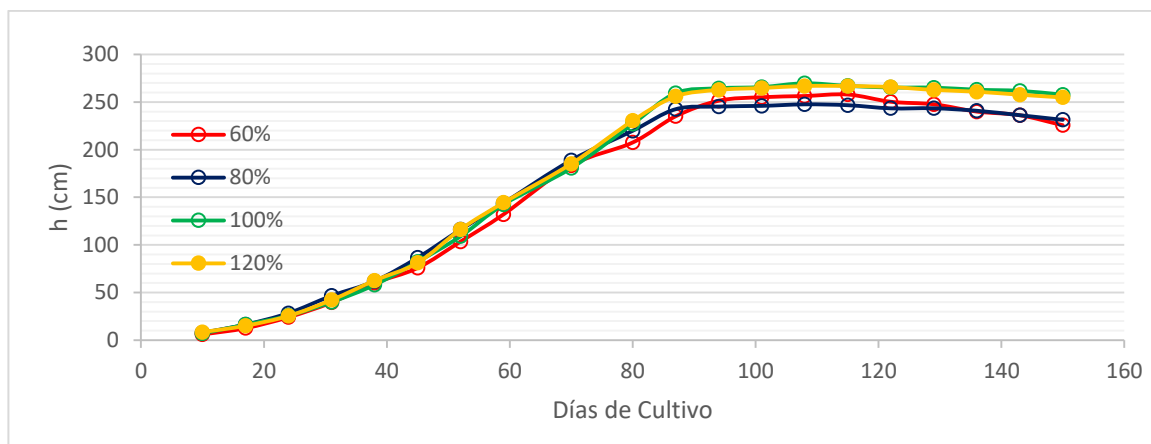


Figura 5- 5: Altura de planta de tratamientos.

De igual manera que con la cobertura vegetal se realizó el Análisis de Varianza completamente al azar para la altura de la planta por tratamiento durante todo el ciclo del cultivo para comparar cada semana, con un Nivel de significancia $\alpha = 0.05$ (Infante y Zárate, 2011), en el que las hipótesis planteadas para cada tratamiento fueron:

Hipótesis nula (H_0): en todas las semanas las alturas de la planta son iguales durante el ciclo de cultivo.

Hipótesis alterna (H_a): al menos una semana la altura de la planta es diferente a los demás durante el ciclo de cultivo.

$$H_0: S_I = S_{II} = \dots = S_{20} \text{ vs } H_a: S_i \neq S_j$$

En la semana 19 solo hay cuatro tratamientos y en la 20 tres tratamiento debido a la senescencia del maíz. Se incluye también una prueba de Tukey, pues el ANOVA aplicado solo afirma que hay por lo menos una semana distinta y con esta prueba se sabrá que semanas son iguales, diferentes o comparten características estadísticas.

Para la generación de modelos se ocuparon los valores de los coeficientes Kc Único y Dual calculados de acuerdo al método del Boletín 56 de la FAO de Allen et. al. (2006), figuras 5-6 y 5-7.



Los valores del coeficiente Kc Único se obtuvieron de acuerdo a lo establecido por Allen *et. al.* (2006):

- Kc inicial: Mediante el empleo de la Figura 30 del Boletín 56 y con la fórmula:

$$K_{c\text{inic}} = K_{c\text{ini}}(1) + \frac{(I - 10)}{(40 - 10)} * (K_{c\text{ini}}(2) - K_{c\text{ini}}(1))$$

- Kc ini(1): valor de Kc ini correspondiente al caso 1 (figura 30 Boletín 56),
- Kc ini(2): valor de Kc ini correspondiente al caso 2 (figura 30 Boletín 56),
- I: lámina infiltrada promedio ([mm]).

- Kc medio

$$K_{c\text{med}} = K_{c\text{med}}(Cua) + [0.04(u_2 - 2) - 0.004(HR_{\text{min}} - 45)]\left(\frac{h}{3}\right)^{0.3}$$

Donde:

- Kc med (Cua): valor de Kc med obtenido del Cuadro 11 del Boletín 56.
- u₂: valor medio diario de la velocidad del viento a 2 m de altura sobre pasto para la etapa de mediados de temporada (m/s), con 1 m/s ≤ u₂ ≤ 6 m/s,
- HR_{min}: valor medio diario de humedad relativa mínima durante la etapa de mediados de temporada (%), para 20% ≤ HR_{min} ≤ 80%,
- h: altura media de las plantas durante la etapa de mediados de temporada (m) para 0,1 m < h < 10 m.

- Kc final:

$$K_{c\text{fin}} = K_{c\text{fin}}(Cua) + [0.04(u_2 - 2) - 0.004(HR_{\text{min}} - 45)]\left(\frac{h}{3}\right)^{0.3}$$

Donde:

- Kc fin (Cua) valor de Kc fin obtenido del Cuadro 11 del Boletín 56.
- u₂ valor promedio de la velocidad diaria del viento a 2 m de altura sobre el pasto durante la etapa final de crecimiento (m/s), para 1 m/s ≤ u₂ ≤ 6 m/s,
- HR_{min} valor de humedad relativa mínima diaria durante la etapa final (%), para 20% ≤ HR_{min} ≤ 80%,



-h altura promedio de la planta durante la etapa final [m], para $0,1 \text{ m} \leq h \leq 10 \text{ m}$.

La ecuación es aplicable solamente en los casos donde los valores tabulados de K_c fin sean mayores a 0,45, característico de cultivos que son cosechados verdes o antes de morir y secarse por completo (ósea, $K_c \text{ fin} \geq 0.45$).

Estas ecuaciones son la usadas de forma general para el cálculo del coeficiente Único, para un mayor detalle en el procedimiento consultar el Boletín 56 de Allen *et. al.* (2006).

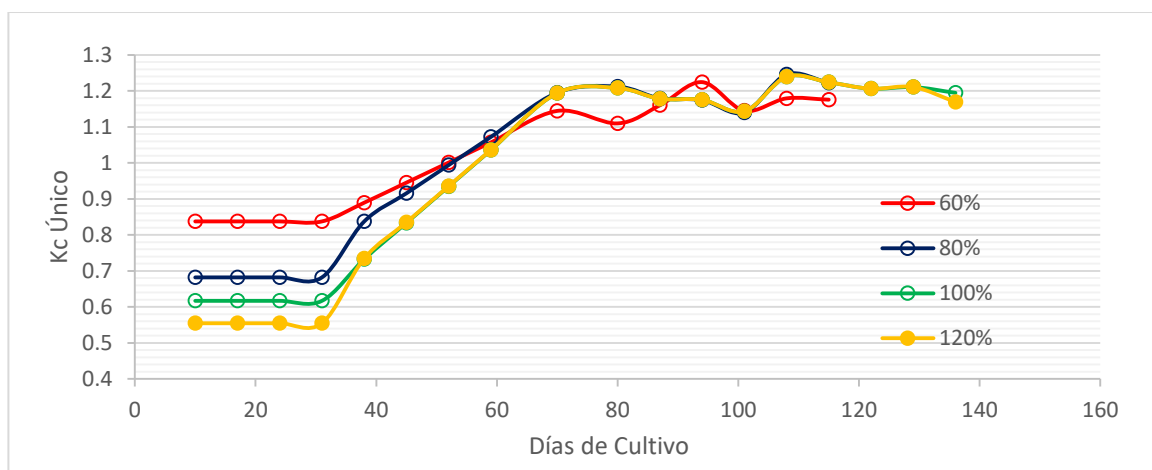


Figura 5- 6: Valores de Kc Único por tratamientos.

Recordando que para el coeficiente dual de acuerdo a Allen *et. al.* (2006) (Calculado en el Capítulo 3) se consideran por separado los eventos de transpiración y evaporación, la transpiración está en función de distintos parámetros que se consideran de acuerdo a la fenología del cultivo por que el valor será el mismo en todos los tratamientos, por otra parte la evaporación del suelo depende de las condiciones climáticas locales por lo que este parámetro determinado como K_e define el valor del coeficiente dual de cultivo, destacando que los datos de K_e de todo el ciclo se promedian para obtener un único valor que se suma al valor de la transpiración (K_{cb}) y así se genera el valor del Coeficiente Dual de Cultivo.

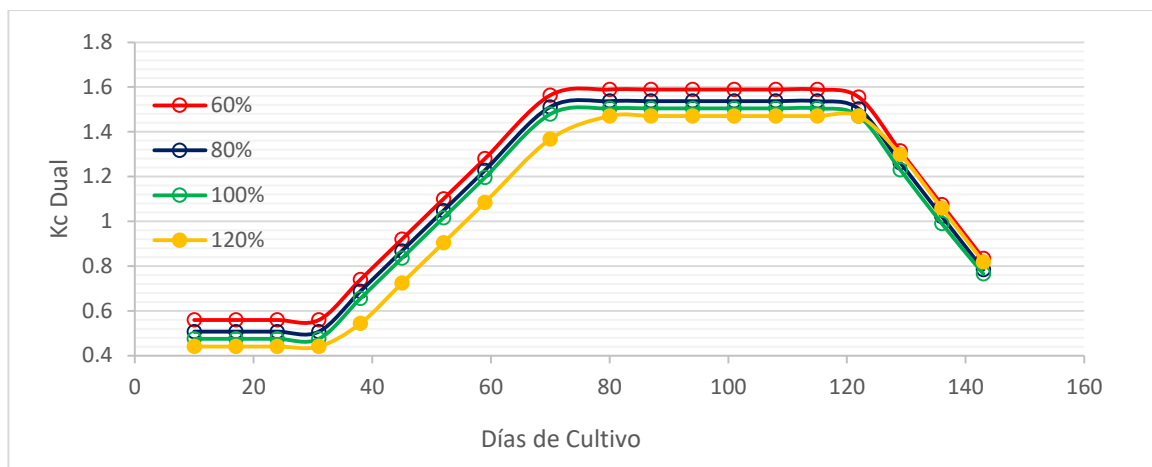


Figura 5- 7: Valor de Kc Dual por tratamientos.

Con estos coeficientes se calcularon requerimientos hídricos y los planes de riego, los cuales se diferenciaron de manera notoria por cada tratamiento que se estableció en el experimento (Figura 5-8).



Figura 5- 8: De izquierda a derecha, tratamiento de 60%, Temporal y 100% de la ETo.

Para generar los modelos se trabajó con la app Curve Fitting del programa Matlab, primeramente se realizó el modelo que muestra la relación entre la altura y el porcentaje de cobertura vegetal, para este modelo se calculó el Ln de las dos variables pues daba un mejor ajuste y el siguiente modelo corresponde a la relación entre los coeficientes Kc y el PCV en los que los valores de los datos se tomaron con sus unidades originales.



Para tener un mejor ajuste de los datos se graficaron las variables que se querían relacionar para observar su comportamiento definiendo que se emplearían dos intervalos de modelos, uno para parte inicial y de mediados de temporada de los cultivos y otro para la etapa de desarrollo. Quedando con la siguiente estructura:

Para la relación PCV(f(x)) vs altura(x)

$$\text{Para } 60\% \text{ de } 0 \geq \text{Días de cultivo} < 70 \rightarrow f(x) = a * (\ln * x) - b$$

$$70 \geq \text{Días de cultivo} \leq 115 \rightarrow f(x) = p1 * x + p2$$

$$\text{Para } 80\% \text{ de } 0 \geq \text{Días de cultivo} < 60 \rightarrow f(x) = a * (\ln * x) - b$$

$$60 \geq \text{Días de cultivo} \leq 115 \rightarrow f(x) = p1 * x + p2$$

$$\text{Para } 100\% \text{ de } 0 \geq \text{Días de cultivo} < 60 \rightarrow f(x) = a * (\ln * x) - b$$

$$60 \geq \text{Días de cultivo} \leq 122 \rightarrow f(x) = p1 * x + p2$$

$$\text{Para } 120\% \text{ de } 0 \geq \text{Días de cultivo} < 70 \rightarrow f(x) = a * (\ln * x) - b$$

$$70 \geq \text{Días de cultivo} \leq 122 \rightarrow f(x) = p1 * x + p2$$

Para la relación Kc Único (f(x)) vs PCV (x)

$$\text{Para } 60\% \text{ de } 0 \geq \text{Días de cultivo} < 80 \rightarrow f(x) = a * \exp(b * x)$$

$$60 \geq \text{Días de cultivo} \leq 115 \rightarrow f(x) = p1 * x + p2$$

$$\text{Para } 80\% \text{ de } 0 \geq \text{Días de cultivo} < 80 \rightarrow f(x) = a * \exp(b * x)$$

$$80 \geq \text{Días de cultivo} \leq 115 \rightarrow f(x) = p1 * x + p2$$

$$\text{Para } 100\% \text{ de } 0 \geq \text{Días de cultivo} < 70 \rightarrow f(x) = a * \exp(b * x)$$

$$70 \geq \text{Días de cultivo} \leq 122 \rightarrow f(x) = p1 * x + p2$$

$$\text{Para } 120\% \text{ de } 0 \geq \text{Días de cultivo} < 70 \rightarrow f(x) = a * \exp(b * x)$$

$$70 \geq \text{Días de cultivo} \leq 122 \rightarrow f(x) = p1 * x + p2$$



Para la relación Kc Dual (f(x)) vs PCV (x)

Para 60% de $0 \geq \text{Días de cultivo} < 70 \rightarrow f(x) = a * \exp(b * x)$

$70 \geq \text{Días de cultivo} \leq 115 \rightarrow f(x) = p1 * x + p2$

Para 80% de $0 \geq \text{Días de cultivo} < 70 \rightarrow f(x) = a * \exp(b * x)$

$70 \geq \text{Días de cultivo} \leq 115 \rightarrow f(x) = p1 * x + p2$

Para 100% de $0 \geq \text{Días de cultivo} < 70 \rightarrow f(x) = a * \exp(b * x)$

$70 \geq \text{Días de cultivo} \leq 122 \rightarrow f(x) = p1 * x + p2$

Para 120% de $0 \geq \text{Días de cultivo} < 70 \rightarrow f(x) = a * \exp(b * x)$

$70 \geq \text{Días de cultivo} \leq 122 \rightarrow f(x) = p1 * x + p2$

Con los modelos ya definidos se procedió a la calibración que de acuerdo a Cabrera (2013) y Finger (2011) usualmente se enfoca en un “criterio de exactitud”, el cual se apoya en la cuantificación de la bondad de ajuste del modelo. Para este fin, se hace uso de diferentes “medidas de bondad de ajuste”, entre las cuales se mencionan:

- **Coeficiente de determinación r^2** , es decir el cuadrado del coeficiente de correlación:

$$r^2 = \frac{\text{cov}(o, m)^2}{\text{sd}(o)\text{sd}(m)}$$

Donde:

o: Observaciones del experimento

m: Valores obtenidos de la modelación

cov: Covarianza

sd: Desviación Estándar

Es el más utilizado, oscila entre 0 y 1 y representa el porcentaje de varianza en los datos observados y explicado por el modelo.



- **Raíz del error cuadrático medio (RMSE):** La raíz del error cuadrático medio permite cuantificar la magnitud de la desviación de los valores simulados respecto a los observados. Se formula como:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_1^n (o - m)^2}{n}}$$

Donde:

o: Observaciones del experimento

m: Valores obtenidos de la modelación

n: Número de observaciones

El rango de valores que puede tomar va desde 0 hasta el infinito (positivo). El 0 corresponde a un ajuste perfecto mientras que valores más grandes indican un menor ajuste.

- **Eficiencia de Nash-Sutcliffe (E):** Se define como:

$$E = 1 - \frac{\sum_1^n (o - m)^2}{\sum_1^n (o - \bar{m})^2}$$

Donde:

o: Observaciones del experimento

m: Valores obtenidos de la modelación

Mide cuánto de la variabilidad de las observaciones es explicada por la simulación. Si la simulación es perfecta, E=1; si se intentase ajustar las observaciones con el valor promedio, entonces E=0. Algunos valores sugeridos por Finger (2011) para la toma de decisiones son resumidos en el cuadro 5-1.

Cuadro 5- 1: Criterios de ajuste para eficiencia Nash-Sutcliffe.

E	Ajuste
<0.2	Insuficiente
0.2-0.4	Satisfactorio
0.4-0.6	Bueno
0.6 -0.8	Muy bueno
>0.8	Excelente



Estos parámetros se aplicaron a los modelos finales para evaluar la exactitud de los datos que generan.

Con los modelos calibrados se procedió a realizar un nuevo cálculo de los calendarios de riego con dos criterios:

- Empleando Kc Único y Kc Dual generados por los modelos.

En esta evaluación se sustituyeron únicamente los valores de los coeficientes de cultivo Kc Único y Dual en los calendarios de riego que se generaron en el Capítulo 3 para el riego de los tratamientos.

- Empleando Kc Único y Kc Dual generados por los modelos y etapas fenológicas locales.

En esta evaluación además de sustituir los valores de los coeficientes de cultivo Kc Único y Dual se emplearon las duraciones de etapas fenológicas obtenidas por tratamiento en el capítulo 4 en los calendarios de riego.

Estas evaluaciones se realizaron con el fin de verificar los cambios de las láminas de riego aplicadas usando lo recomendado por el Boletín 56 de la FAO (Allen et. al. 2006) con respecto a los resultados obtenidos de la modelación. Con los volúmenes conocidos y las características de los emisores del sistema de riego por goteo se determinaron los tiempos de riego que faltaron o sobraron por tratamiento y criterio usado

5.3 Resultados y Discusión

Los Cuadros 5-1 y 5-2 muestran los valores medios y la desviación de la cobertura vegetal y altura de la planta empleados en el modelado.

Cuadro 5- 2: Media y Desviación Estándar de Porcentaje de Cobertura Vegetal por tratamiento.

Día Cultivo	60%		80%		100%		120%	
	Media	D.E.M.	Media	D.E.M.	Media	D.E.M.	Media	D.E.M.
10	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.25	0.50
17	2.67	0.58	5.33	1.53	6.50	4.20	6.00	1.83



POSGRADO DE INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA
PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES PARA LA ESTIMACIÓN DE COEFICIENTE KC
Y ETAPAS FENOLÓGICAS EN MAÍZ



24	10.67	1.53	15.00	2.00	13.00	5.10	11.25	0.50
31	17.33	3.79	24.33	3.21	21.00	4.69	22.25	3.95
38	32.00	6.08	40.67	12.58	42.00	10.55	42.75	3.86
45	51.00	7.81	68.67	8.33	58.50	13.80	65.75	9.98
52	78.67	3.06	79.33	6.35	74.50	6.76	79.25	11.15
59	83.67	2.08	80.67	5.13	78.50	7.59	82.25	4.79
70	77.67	2.31	82.33	5.51	84.75	9.29	86.25	7.41
80	76.67	3.51	82.33	4.73	83.00	9.56	85.00	5.66
87	72.67	7.23	80.67	4.51	82.50	7.68	84.25	3.77
94	72.00	9.85	82.67	4.51	83.50	6.95	85.25	3.77
101	70.67	9.87	79.67	3.79	82.75	7.80	86.25	3.95
108	72.33	11.02	78.67	6.43	81.50	7.59	84.75	3.69
115	67.33	16.65	77.67	4.73	81.75	6.40	83.50	3.42
122	65.00	17.69	77.00	5.00	82.75	5.38	82.75	4.79
129	66.33	16.04	74.67	8.08	81.25	7.80	82.50	6.95
136	63.00	14.93	70.67	6.11	72.25	8.88	77.75	3.40
143	58.33	13.05	68.33	8.08	65.00	7.02	73.50	1.73
150	48.00	15.56	68.67	6.81	64.25	6.95	70.75	3.95

Cuadro 5- 3: Media y Desviación Estándar de altura de planta por cada tratamiento.

Día Cultivo	60%		80%		100%		120%	
	Media	D.E.M.	Media	D.E.M.	Media	D.E.M.	Media	D.E.M.
10	5.97	1.54	7.75	1.21	7.10	0.98	8.45	1.47
17	12.60	3.82	16.37	0.78	16.30	3.04	15.10	2.29
24	24.10	2.96	28.33	0.51	25.70	2.70	25.45	1.14
31	39.50	6.44	46.53	3.46	40.00	7.92	42.18	2.81
38	60.00	1.68	61.90	2.23	57.98	9.03	62.60	2.02
45	75.77	1.38	86.53	4.85	82.30	6.66	81.18	5.56
52	103.53	5.25	116.07	12.91	109.03	11.29	116.35	14.79
59	132.13	10.97	143.93	3.31	142.50	10.41	144.40	14.82
70	183.43	18.71	188.83	3.96	180.68	18.03	185.20	4.09
80	207.53	7.85	219.80	14.15	227.08	7.88	230.40	11.94
87	235.07	11.89	242.50	3.93	259.28	18.78	255.93	17.55
94	251.40	17.85	245.27	4.84	264.43	21.03	262.83	17.53
101	255.10	21.15	246.00	5.29	265.75	20.42	264.75	17.13
108	256.33	20.50	247.60	5.41	269.70	18.71	266.85	17.76
115	257.93	20.16	246.70	3.57	266.98	22.67	266.88	18.30
122	250.30	23.78	243.40	8.39	265.28	22.32	265.80	16.66
129	247.67	23.80	243.47	9.24	265.15	22.98	262.75	17.15
136	240.00	19.66	240.87	6.73	262.93	25.01	260.85	16.85
143	236.17	21.75	236.20	8.43	261.75	26.23	257.70	17.34
150	225.65	26.09	231.33	15.67	257.75	25.75	254.83	16.18



El Análisis de Varianza se realizó por tratamiento para comparar cada semana, en los cuadros 5-4, 5-5, 5-6 y 5-7 se observa que al aplicar la Prueba de Fisher que la muestra da evidencia estadísticamente significativa para rechazar H_0 (en todas las semanas las alturas de las plantas son iguales son iguales) y aceptar H_a por lo que al menos en una semana la altura de la planta es diferente a las demás, esto con la Regla de decisión: H_0 se rechaza si $F_o > F$.

Cuadro 5- 4: ANOVA Tratamiento 60% de altura de planta.

Fuente de variación	GL	Suma de Cuadrados	Cuadrados Medios	Fo	F
Tratamiento	18	516579	28698.8	125.16	1.883
Error	38	8713	229.3		
Total	56	525292			

Cuadro 5- 5: ANOVA Tratamiento 80% de altura de planta.

Fuente de variación	GL	Suma de Cuadrados	Cuadrados Medios	Fo	F
Tratamiento	19	721470	37972.1	143.39	1.763
Error	60	15889	264.8		
Total	79	737359			

Cuadro 5- 6: ANOVA Tratamiento 100% de altura de planta.

Fuente de variación	GL	Suma de Cuadrados	Cuadrados Medios	Fo	F
Tratamiento	19	813749	42828.9	145	1.763
Error	60	17723	295.4		
Total	79	831472			

Cuadro 5- 7: ANOVA Tratamiento 120% de altura de planta.

Fuente de variación	GL	Suma de Cuadrados	Cuadrados Medios	Fo	F
Tratamiento	19	791901	41679	229.83	1.763
Error	60	10881	181.3		
Total	79	802782			

La prueba de Tukey para altura de planta, Cuadro 5-8, al igual que en el porcentaje de cobertura muestra que durante las primeras semanas cuando el crecimiento de la planta aumenta rápidamente los grupos dejan de presentar similitudes estadísticas, pero ya entrando a la semana de la etapa de desarrollo



comienzan a compartir similitudes estadísticas dejando en evidencia que la altura comenzó a ser constante.

Cuadro 5- 8: Prueba de Tukey para altura de planta.

60%		80%		100%		120%	
Sem.	Grupo	Sem.	Grupo	Sem.	Grupo	Sem.	Grupo
15	A	14	A	14	A	15	A
14	A	15	A	15	A	14	A
13	A	13	A	13	A	16	A
12	A B	12	A	16	A	13	A B
16	A B	16	A	17	A	12	A B
17	A B	17	A	12	A	17	A B
18	A B	11	A	18	A	18	A B
19	A B	18	A	19	A	19	A B
11	A B	19	A	11	A	11	A B
10	B C	20	A	20	A	20	A B
9	C	10	A B	10	A	10	B
8	D	9	B C	9	B	9	C
7	D E	8	C D	8	B C	8	D
6	E F	7	D E	7	C D	7	D E
5	E F G	6	E F	6	D E	6	E F
4	F G H	5	F G	5	E F	5	F G
3	G H	4	F G H	4	E F G	4	G H
2	H	3	G H	3	F G	3	H
1	H	2	H	2	F G	2	H
		1	H	1	G	1	H

Las relaciones de los valores generados en campo ayudaron a obtener ecuaciones que ayudaran a realizar el cálculo de coeficientes Kc fácilmente y con las adecuaciones para que representen las condiciones locales.

De acuerdo a la metodología establecida por Escarabajal *et. al.* (2015) para poder generar los modelos que ayuden en el cálculo de coeficientes locales se trabaja con dos etapas.



5.3.1 Etapa 1: Relación PCV/h

En esta etapa se trabaja para obtener un modelo que de él valor del Porcentaje de Cobertura Vegetal, con la finalidad de que en posteriores establecimientos de cultivo no se deban sacar las fotografías para poder obtener el valor del porcentaje.

Buscando un mejor ajuste se aplicó logaritmo natural a los datos obtenidos solo para el modelo de relación PCV/h puesto que el ajuste era más adecuado. A continuación se muestran las figuras de la 5-9 a 5-16 las líneas de tendencia, ecuación y R^2 de los modelos obtenidos. Cabe destacar que para poder emplear los modelos la variable x de estos se define como $x = \ln(h \text{ en cm})$ y el resultado $y = \ln(\text{PCV en } \%)$.

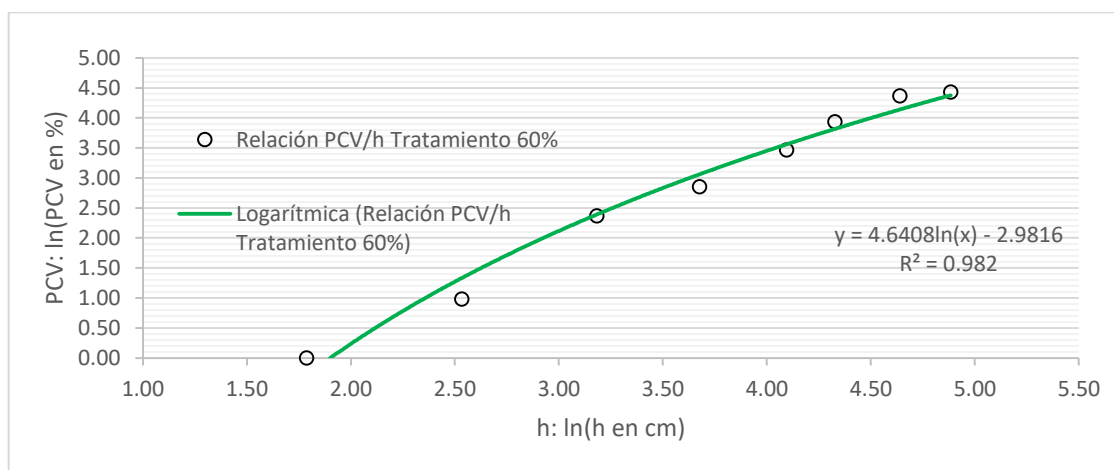


Figura 5- 9: Modelo PCV/h tratamiento 60%.

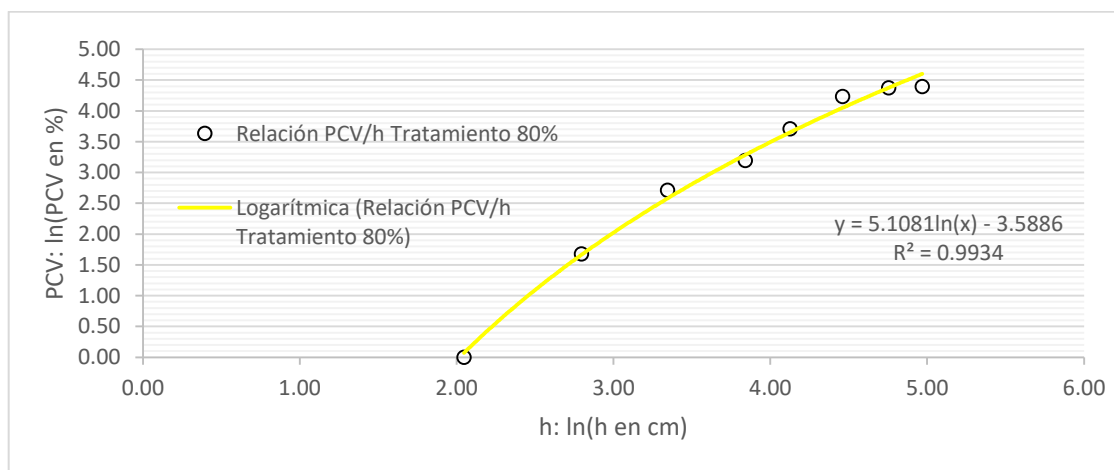


Figura 5- 10: Modelo PCV/h tratamiento 80%.

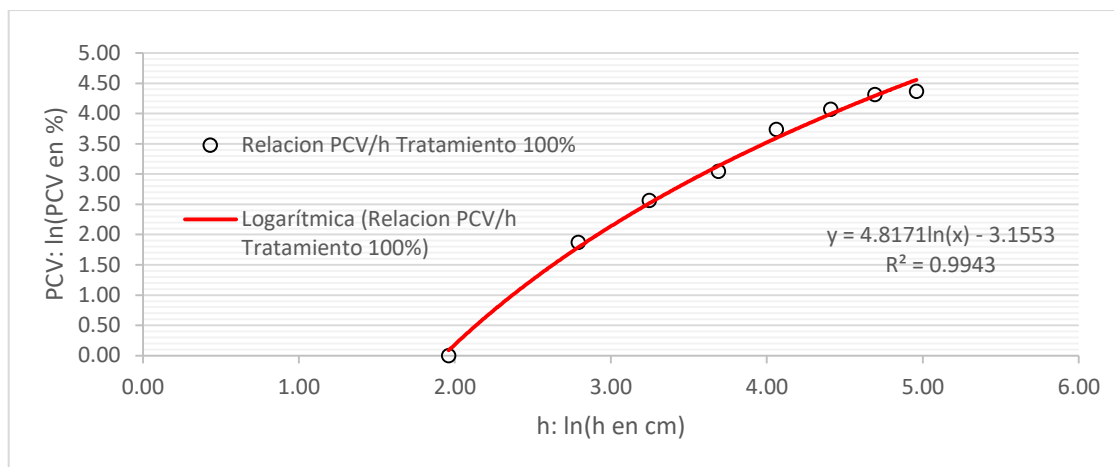


Figura 5- 11: Modelo PCV/h tratamiento 100%.

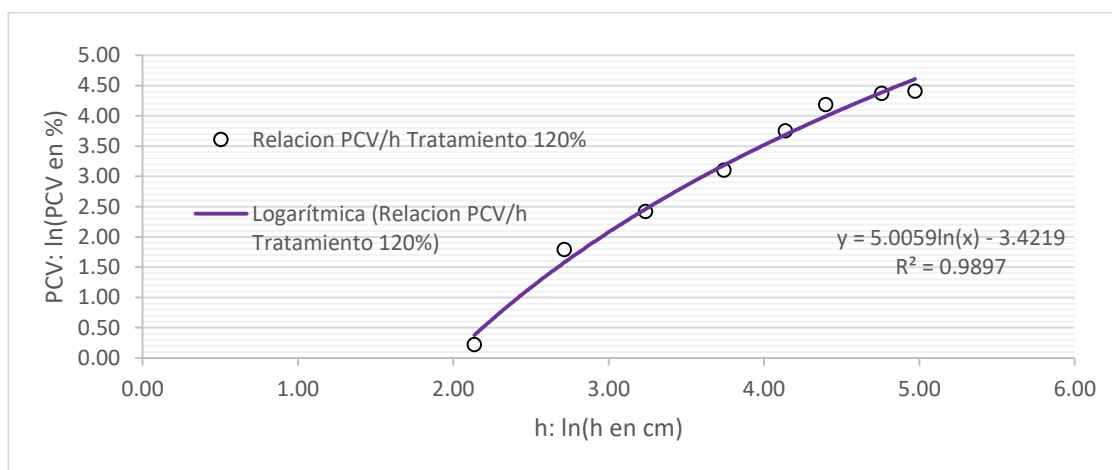


Figura 5- 12: Modelo PCV/h tratamiento 120%.

El segundo intervalo aunque no tiene un r^2 cercano a 1 es aceptado puesto que la variación de los datos siendo lineal no varía, porque lo que los modelos reflejan de manera correcta los valores estimados.

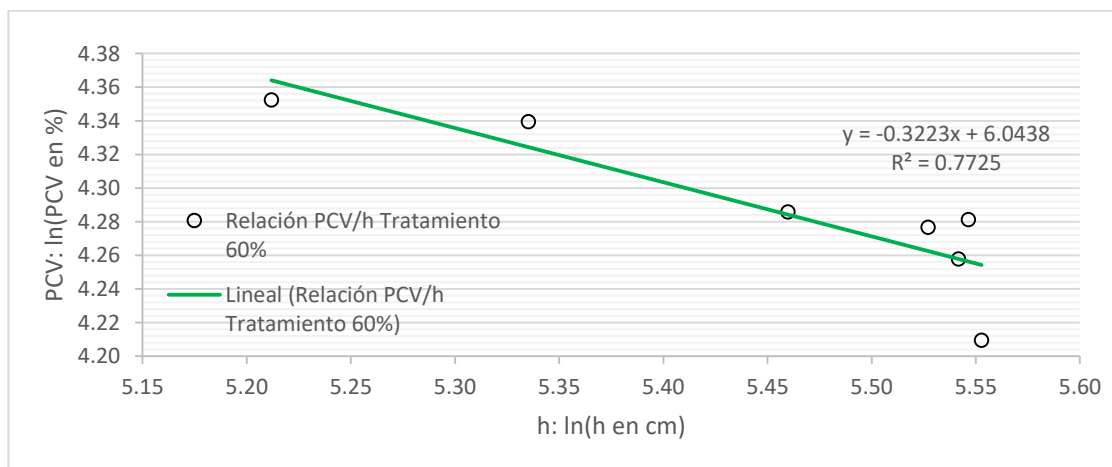


Figura 5- 13: Modelo 2 PCV/h tratamiento 60%.

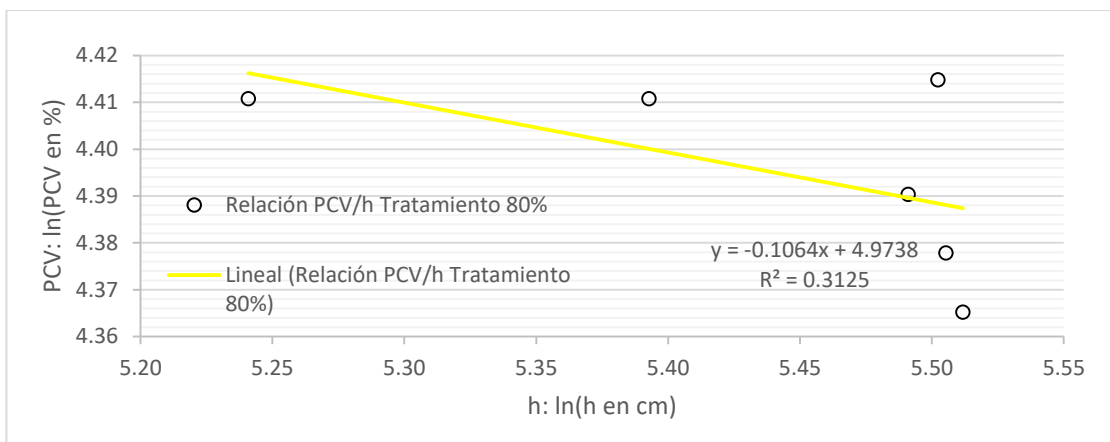


Figura 5- 14: Modelo 2 PCV/h tratamiento 80%.

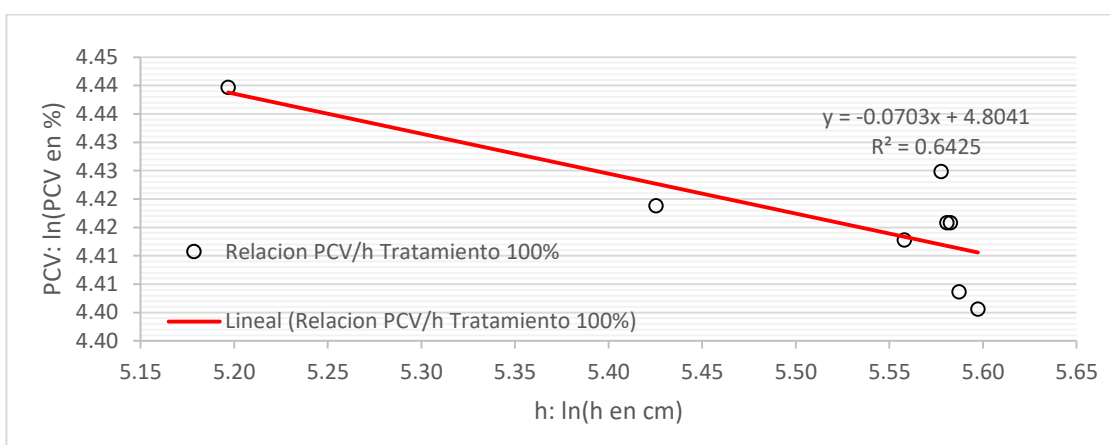


Figura 5- 15: Modelo 2 PCV/h tratamiento 100%.

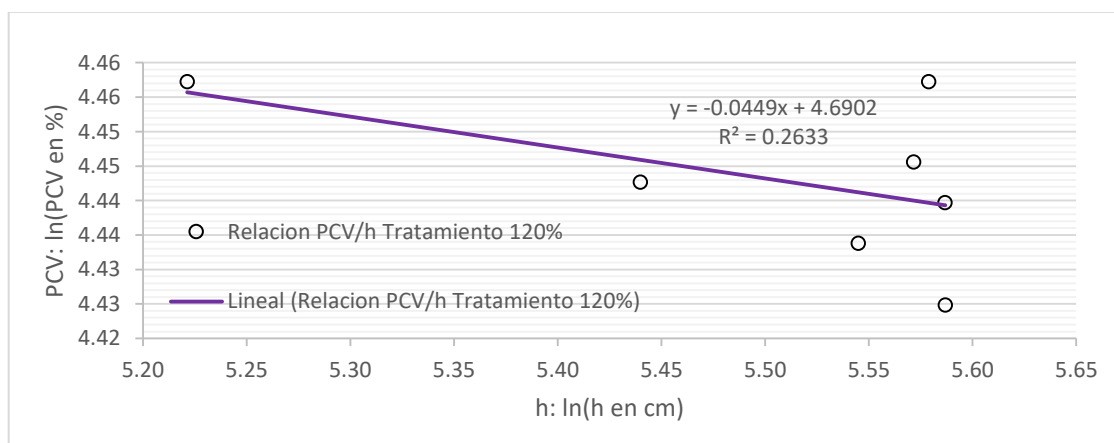


Figura 5- 16: Modelo 2 PCV/h tratamiento 120%.

Con los modelos bien calibrados, se generaron los valores de PCV (Figura 5-17), para ver la calidad de los datos observándose similitud y un buen ajuste.

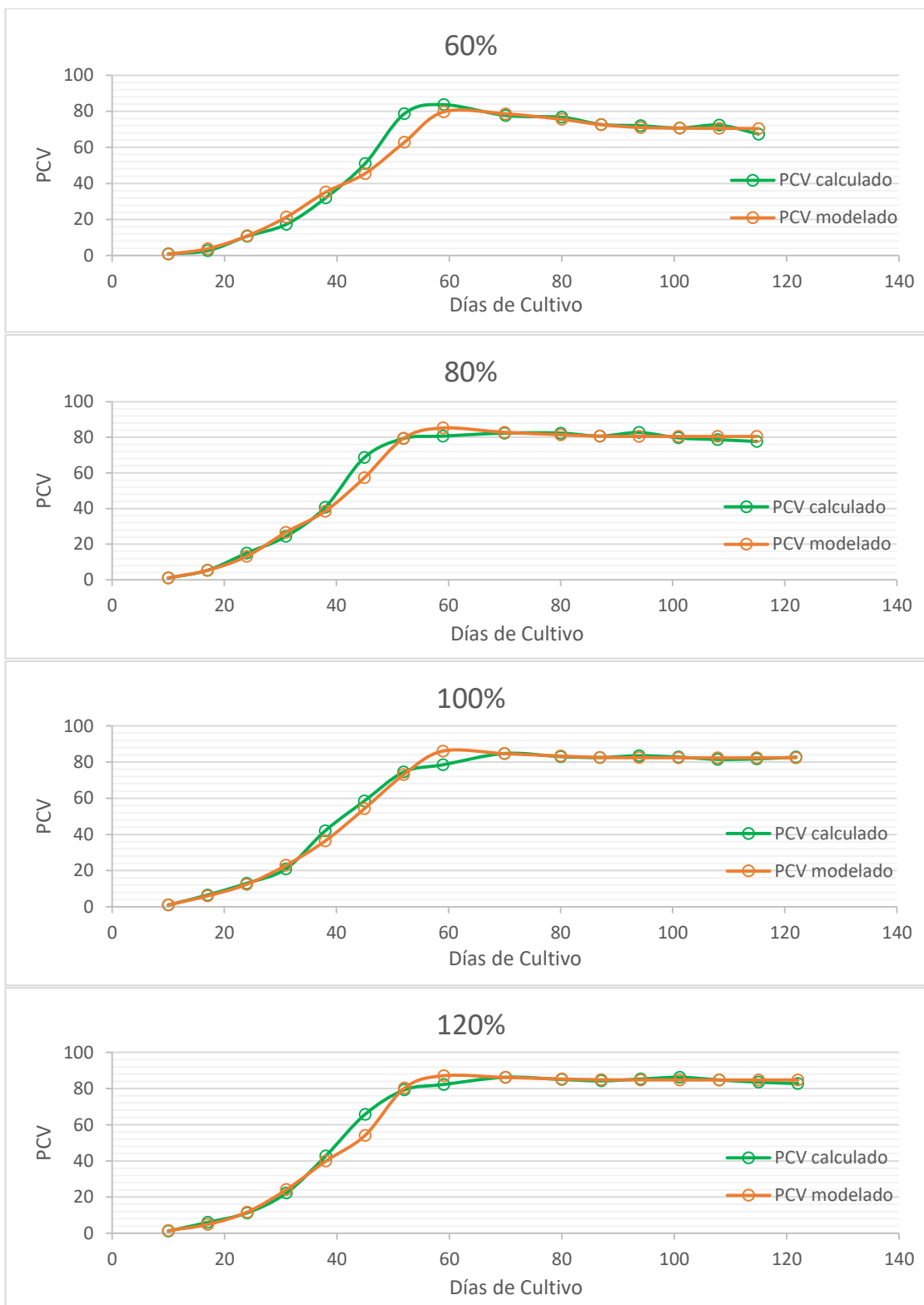


Figura 5- 17: Valores Porcentaje de Cobertura Vegetal obtenidos de los modelos.



5.3.2 Etapa 2: Relación Kc/PCV

Ya con los modelos que ayudaran al cálculo del PCV a partir de la altura de la planta se procedió a realizar la determinación de un segundo modelo que relacione el coeficiente de cultivo Kc con el PCV. Destacando que se revisaron dos metodologías una con el Kc único y la otra con el Kc dual que fue el empleado para el cálculo de los calendarios de riego en el cultivo.

Los intervalos en los dos casos se centran principalmente en la estabilización del PCV a partir del cual se realizaron los mejores ajustes para los modelos.

5.3.3 Kc único

De igual manera se realizaron dos intervalos, el primer intervalo corresponde a modelos exponenciales, usando valores de las variables con unidades originales.

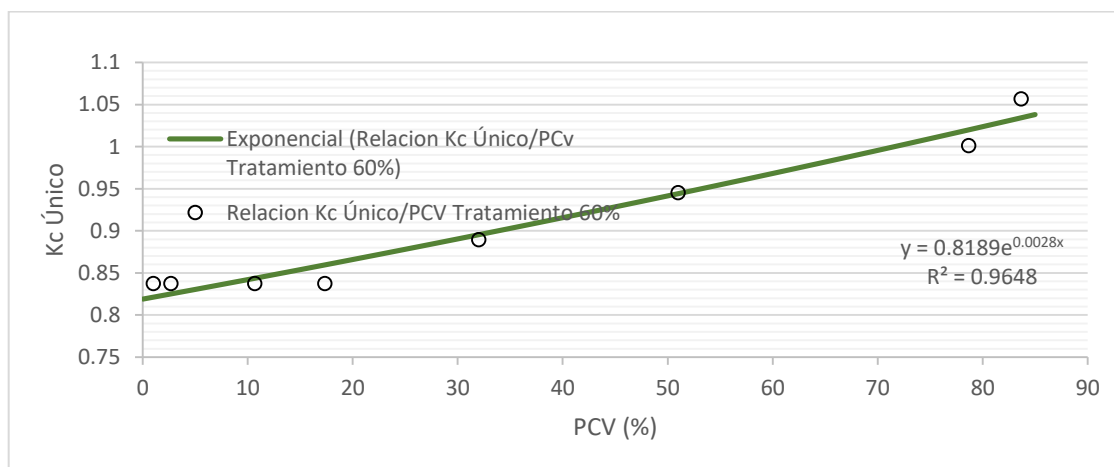


Figura 5- 18: Modelo Kc Único/PCV tratamiento 60%.

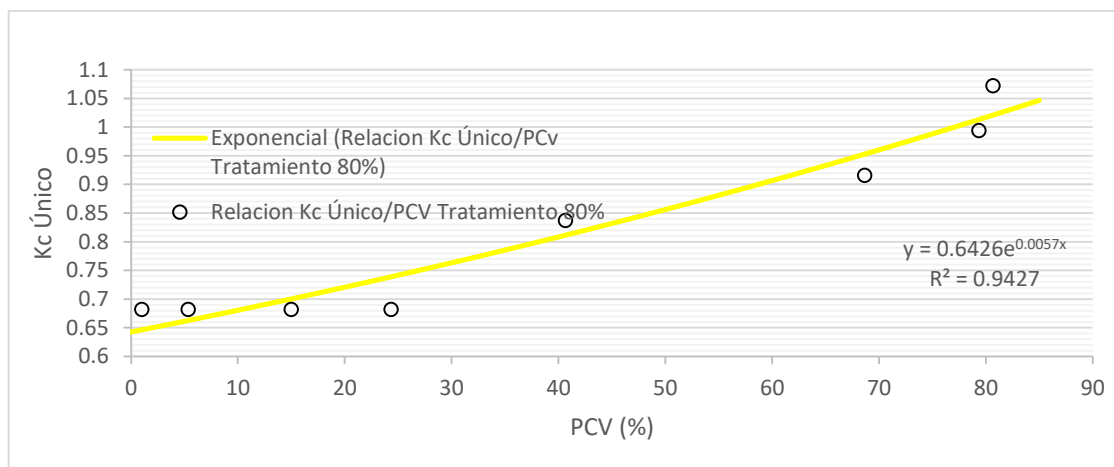


Figura 5- 19: Modelo Kc Único/PCV tratamiento 80%.

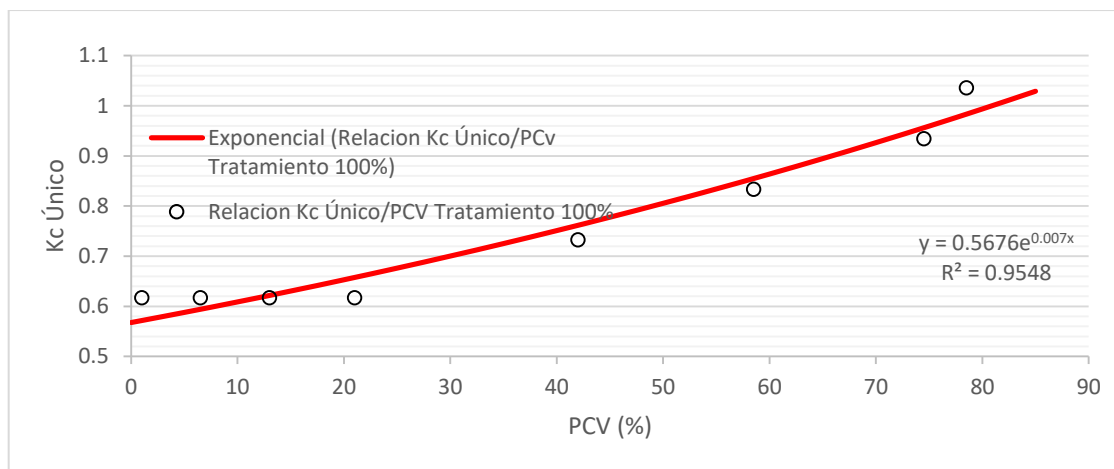


Figura 5- 20: Modelo Kc Único/PCV tratamiento 100%.

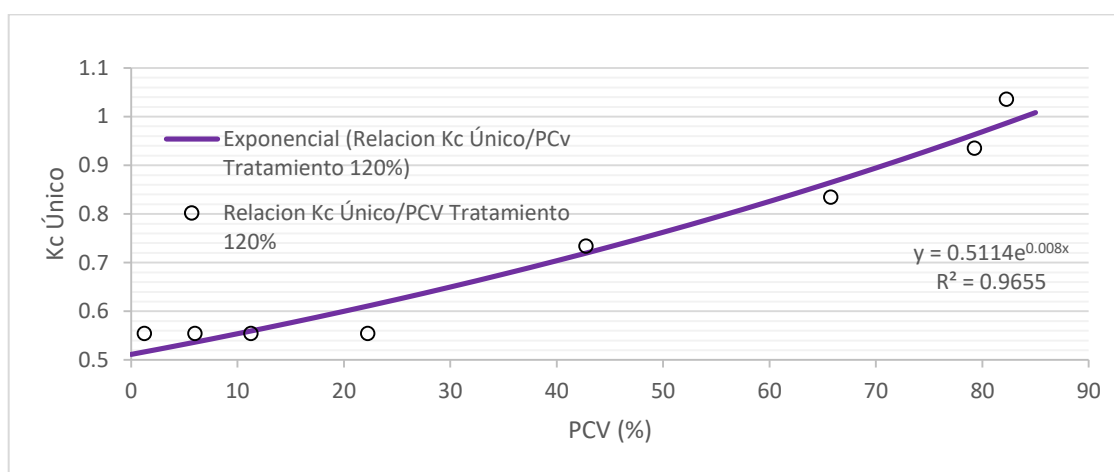


Figura 5- 21: Modelo Kc Único/PCV tratamiento 120%.

El segundo intervalo corresponde a ajustes lineales, que como en el caso anterior aunque tienen un R^2 demasiado bajo por ser una serie de puntos prácticamente iguales tiene validez.

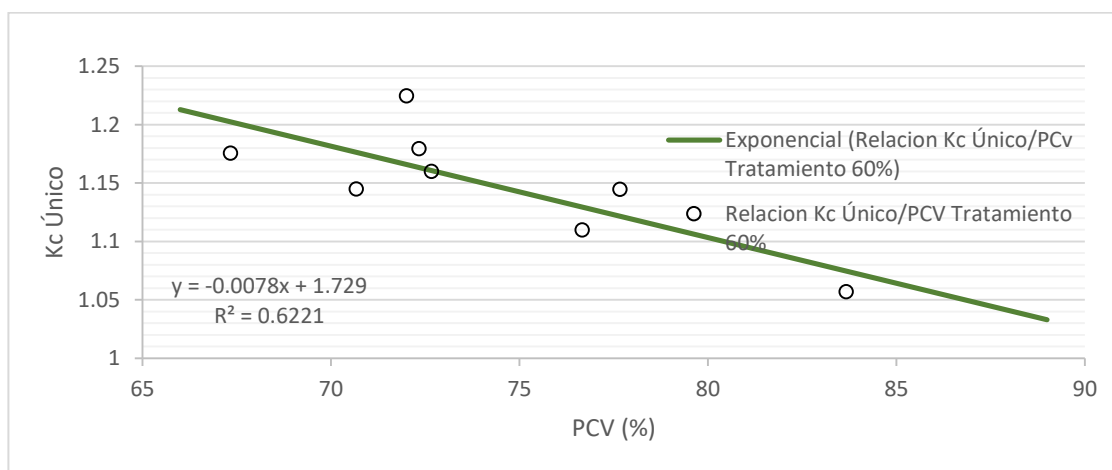


Figura 5- 22: Modelo 2 Kc Único/PCV tratamiento 60%.

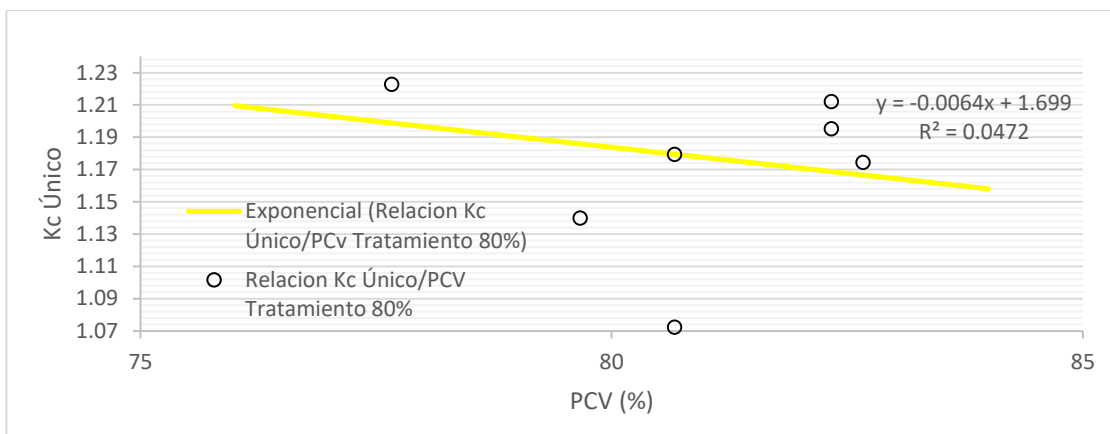


Figura 5- 23: Modelo 2 Kc Único/PCV tratamiento 80%.

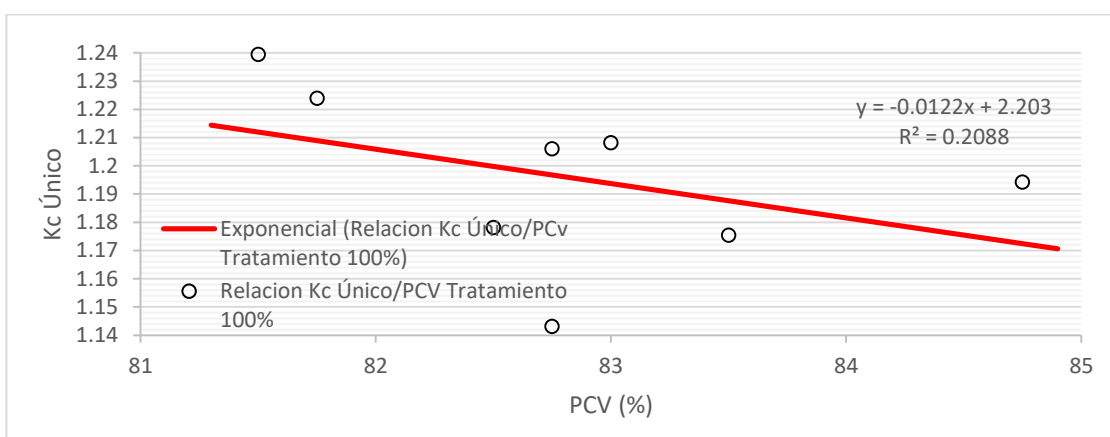


Figura 5- 24: Modelo 2 Kc Único/PCV tratamiento 100%.

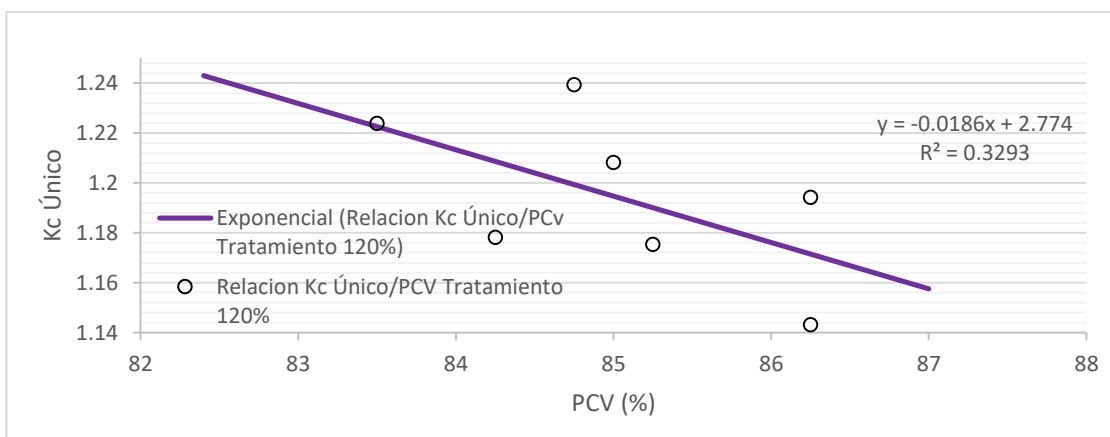


Figura 5- 25: Modelo 2 Kc Único/PCV tratamiento 120%.

En la Figura 5-26 se observa que los resultados de los valores dados por los modelos generados se ajustan de manera satisfactoria a los valores Kc del Boletín 56 (Figura 5-6), corroborando que los modelos son adecuados.

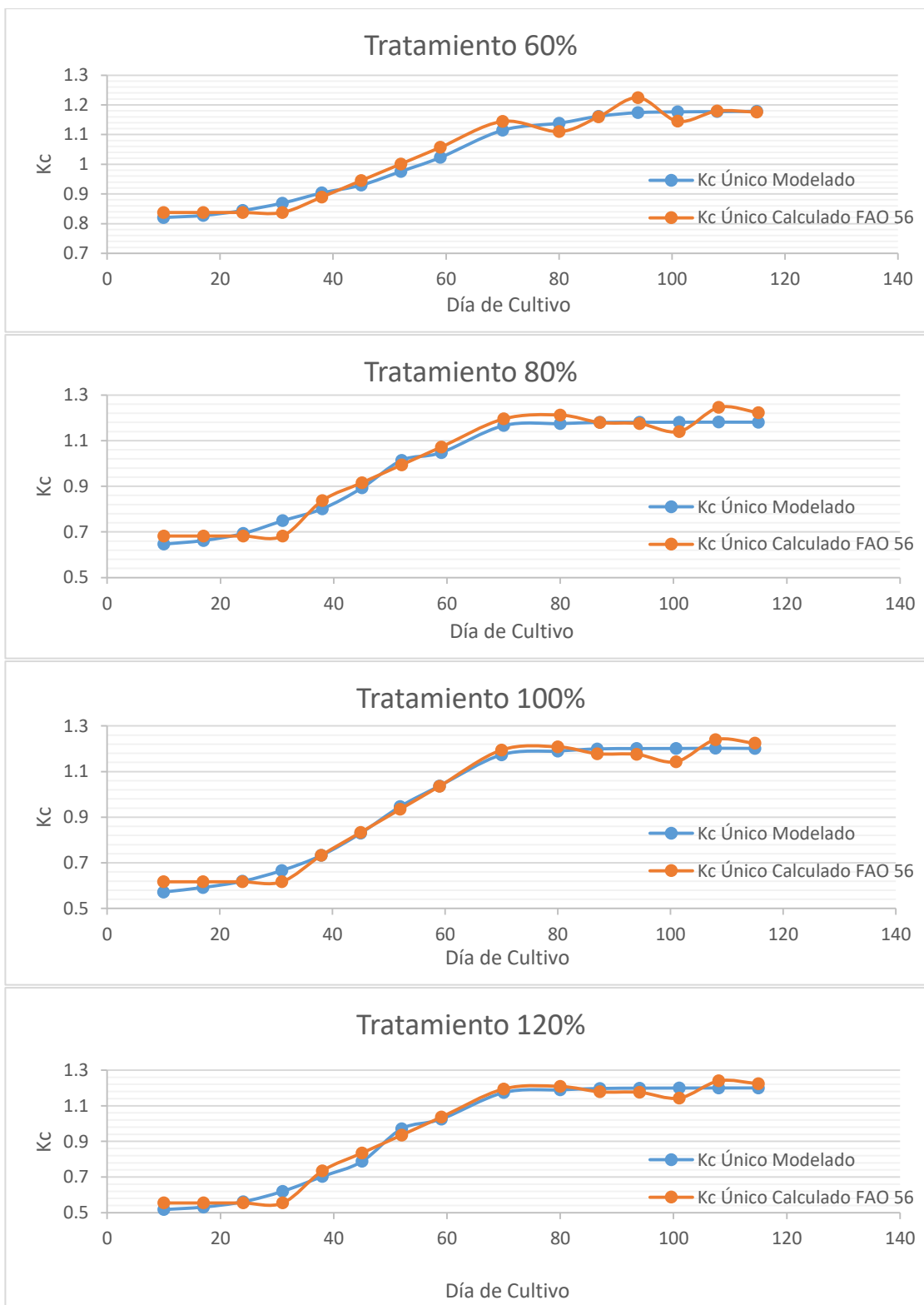


Figura 5- 26: Valores Kc Único obtenidos de los modelos.



5.3.4 Kc Dual

La otra variación de la relación Kc/PCV se generó con el coeficiente Kc Dual de Cultivo. Los intervalos se centran principalmente en la estabilización del PCV a partir del cual se realizaron los mejores ajustes para los modelos.

El coeficiente dual fue evaluado de manera prioritaria pues Allen *et. al.* (2006) lo recomiendan para trabajos de investigación y como se esperaba presentó un mejor comportamiento.

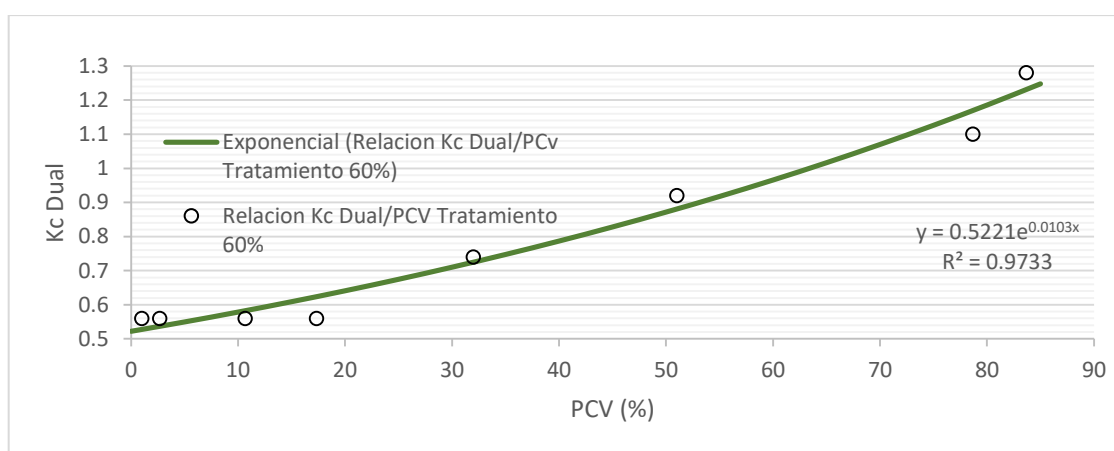


Figura 5- 27: Modelo Kc Dual/PCV tratamiento 60%.

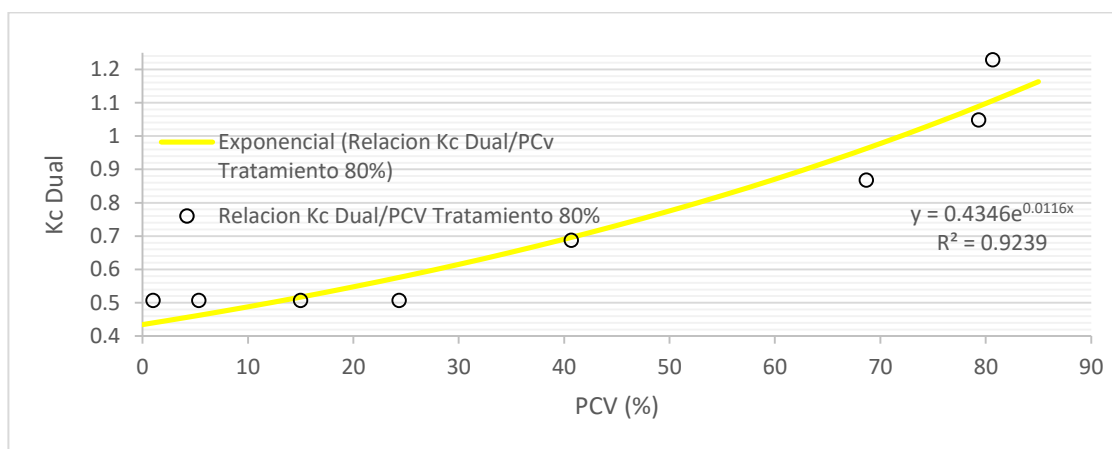


Figura 5- 28: Modelo Kc Dual/PCV tratamiento 80%.

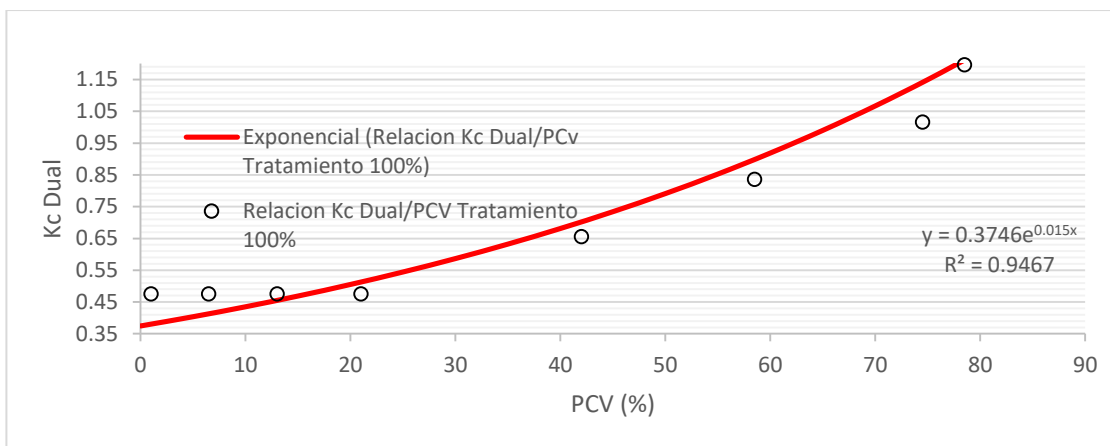


Figura 5- 29: Modelo Kc Dual/PCV tratamiento 100%.

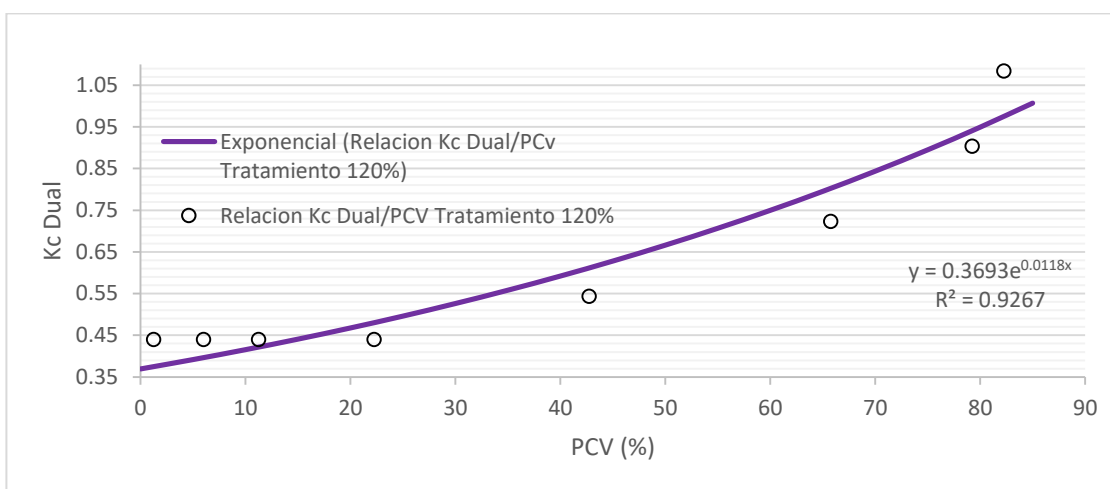


Figura 5- 30: Modelo Kc Dual/PCV tratamiento 120%.

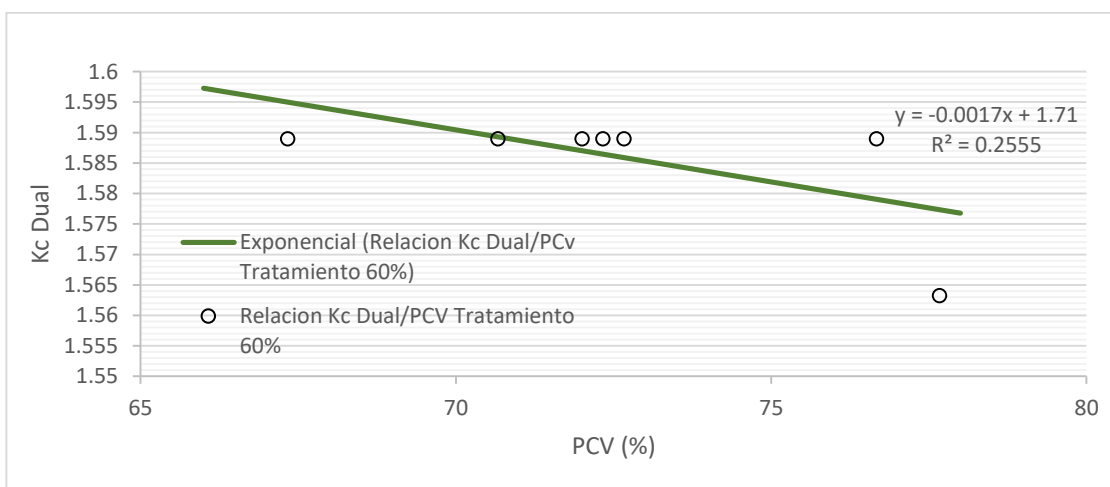


Figura 5- 31: Modelo 2 Kc Dual/PCV tratamiento 60%.

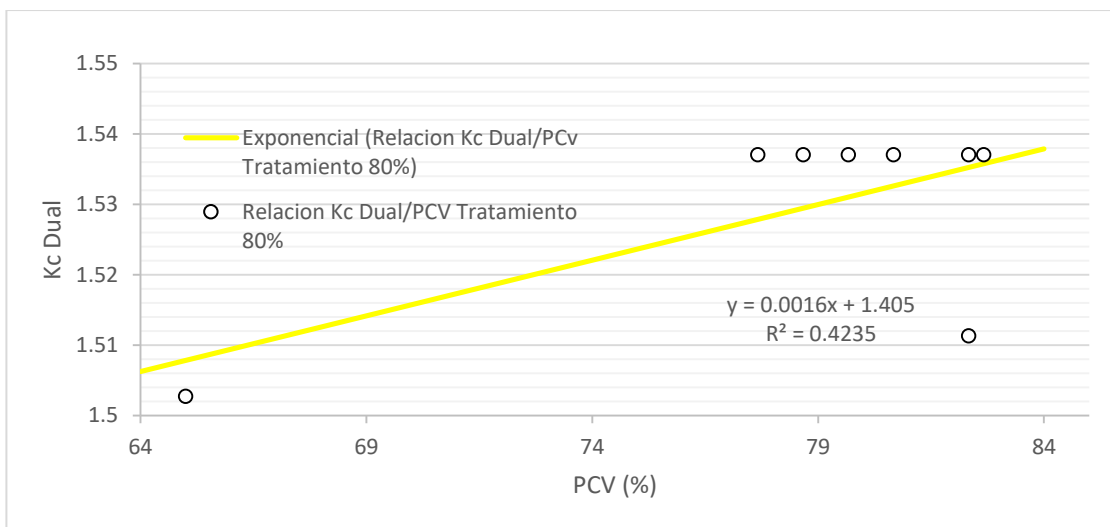


Figura 5- 32: Modelo 2 Kc Dual/PCV tratamiento 80%.

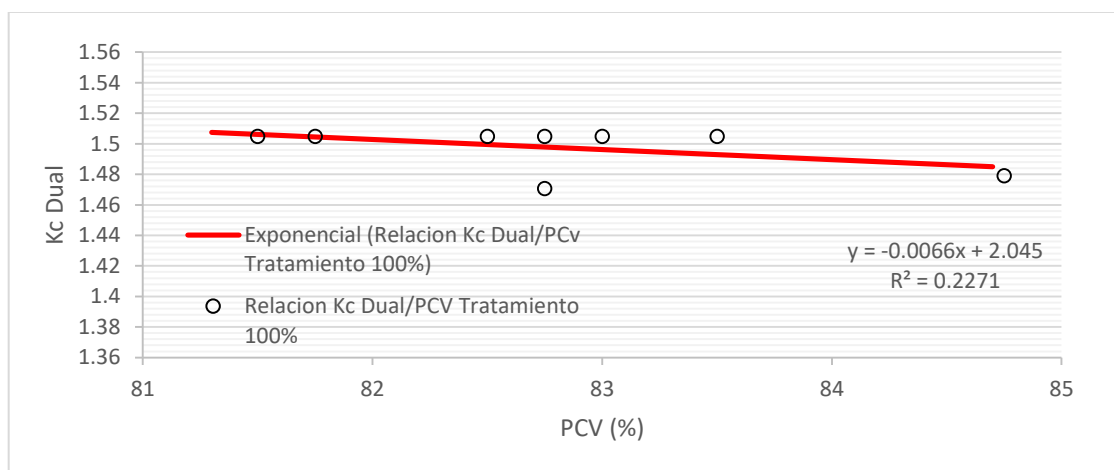


Figura 5- 33: Modelo 2 Kc Dual/PCV tratamiento 100%.

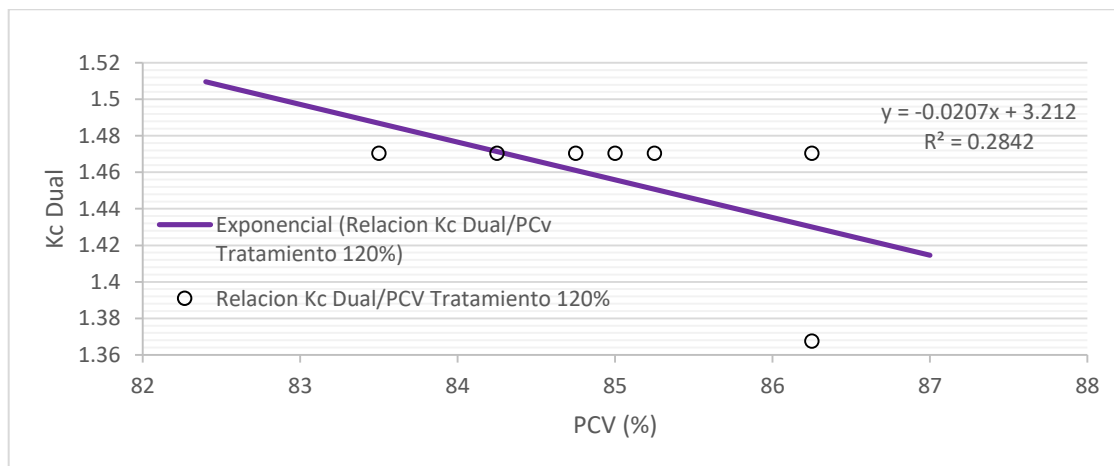


Figura 5- 34: Modelo 2 Kc Dual/PCV tratamiento 120%.

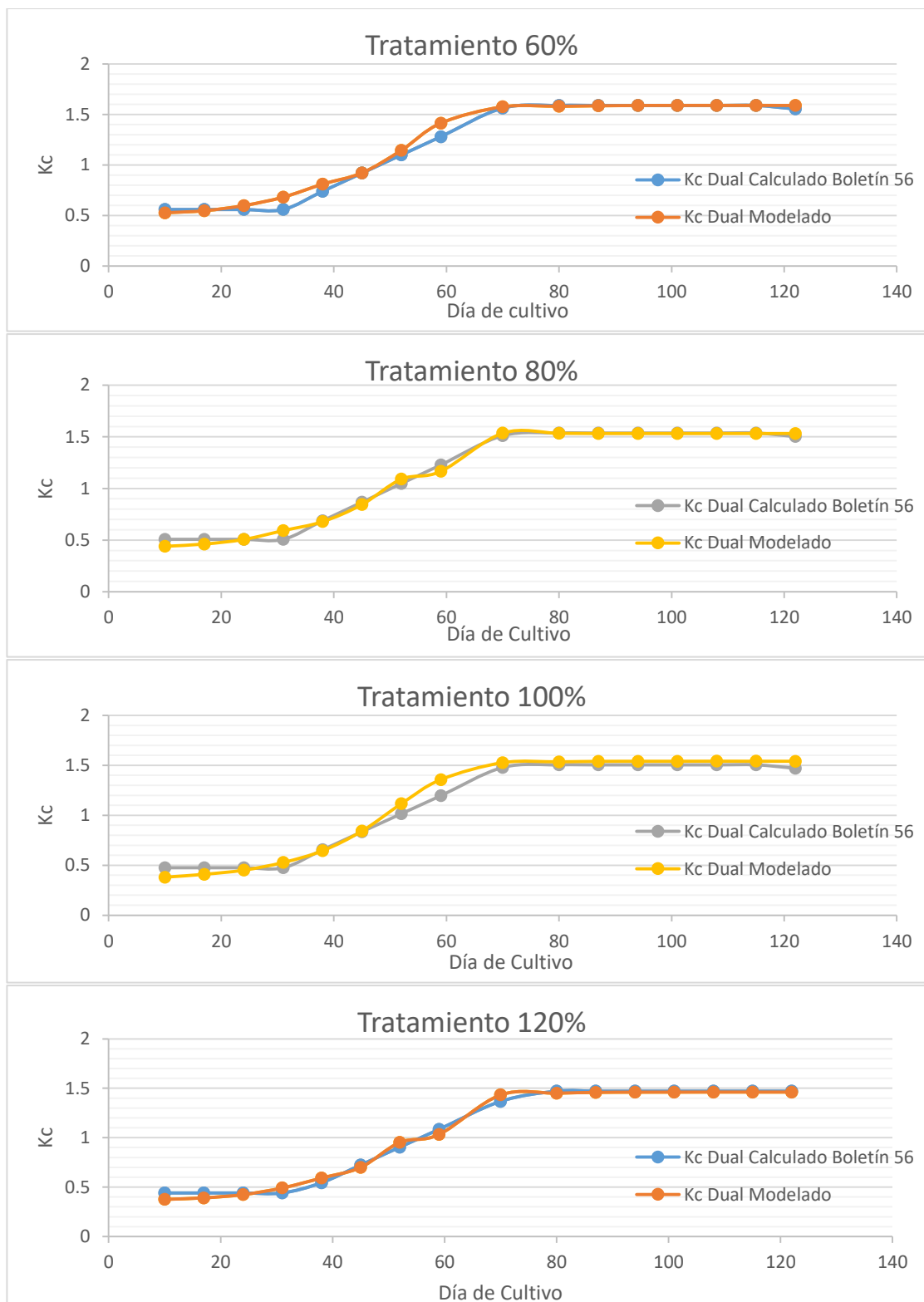


Figura 5- 35: Valores K_c Dual obtenidos de los modelos.



Al observar la Figura 5-35 los resultados de los Kc obtenidos con de los modelos en la parte de Inicio de temporada y de desarrollo del presentan una tendencia más uniforme en la determinación del coeficiente Dual, la etapa de mediados de temporada presenta variaciones mínimas, además de la uniformidad de datos tanto medidos como estimados.

Para dar una mejor validación a los modelos se aplicaron pruebas estadísticas como: r^2 , RMSE y de Nash-Sutcliffe (E), en el Cuadro 5-9 se observa que en cuanto al coeficiente de determinación todos los valores están cercanos a 1 por lo que son buenos modelos, el RMSE es considerado correcto cuando los valores son cercanos a cero por lo que este parámetro de igual manera se cumple, y el índice E de acuerdo a la evaluación tiene un ajuste excelente, comprobando que los modelos tienen una buena exactitud.

Cuadro 5- 9: Pruebas de calibración de Modelos.

Kc	T	Modelo 1	Modelo 2	r^2	RMSE	E
Único	60%	$Kc=0.8189e^{0.0028PCV}$	$Kc=-0.0078PCV+1.729$	0.97	0.02	0.97
Dual		$Kc=0.5221e^{0.0103h}$	$Kc=-0.0017PCV+1.71$	0.99	0.05	0.99
Único	80%	$Kc=0.6426e^{0.0057PCV}$	$Kc=-0.0064PCV+1.699$	0.97	0.03	0.97
Dual		$Kc=0.4346e^{0.0116h}$	$Kc=0.0016PCV+1.405$	0.99	0.04	0.99
Único	100%	$Kc=0.5676e^{0.007PCV}$	$Kc=-0.0122PCV+2.203$	0.99	0.03	0.99
Dual		$Kc=0.3746e^{0.015h}$	$Kc=-0.0066PCV+2.045$	0.98	0.10	0.98
Único	120%	$Kc=0.5114e^{0.008PCV}$	$Kc=-0.0186PCV+2.774$	0.98	0.03	0.98
Dual		$Kc=0.3693e^{0.0118h}$	$Kc=-0.0207PCV+3.212$	0.99	0.04	0.99

5.3.5 Uso de coeficientes modelados en Calendarios de Riego

Con los valores de Kc determinados se procedió a emplearlos en los calendarios de riego que se generaron para el maíz durante la fase experimental.

En la Figura 5-36 se observa que al emplear las duraciones de las etapas de cultivo ofrecidas por la FAO en el Boletín 56, (Allen *et. al.* 2006), con los valores de Kc modelados las cantidades de agua totales empleadas por tratamiento se ven disminuidas con respecto a las aplicadas durante el experimento, a excepción del tratamiento del 60% en cuanto al Kc Dual, mientras que el coeficiente Kc único en todos los casos determinó volúmenes de agua menores.

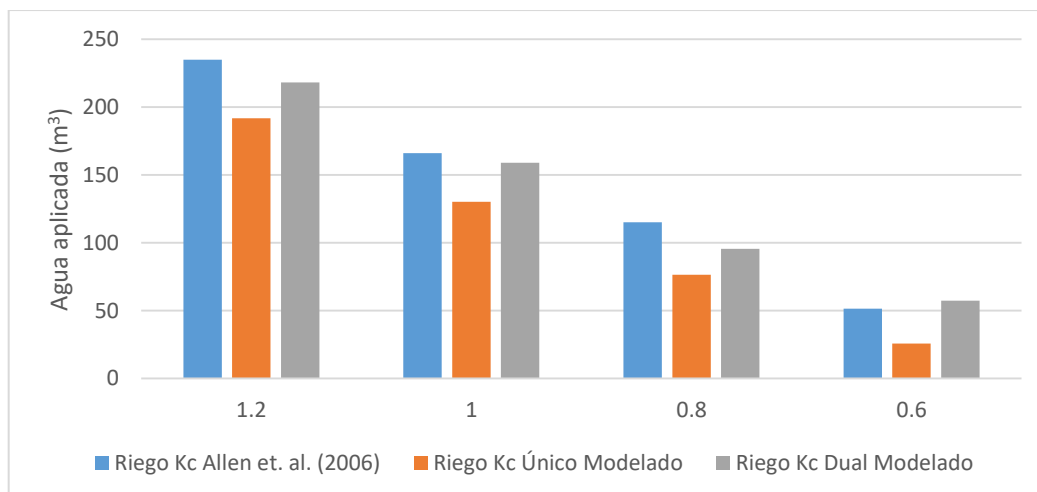


Figura 5- 36: Volúmenes de agua con etapas FAO 56.

De acuerdo a lo que se notó durante la fase experimental los cultivos requerían de más agua por lo que el uso de los valores modelados de Kc en los calendarios resulta insuficiente por tanto se aplicaron las duraciones de las Etapas de Cultivo del Capítulo 4 en los calendarios de riego.

En la Figura 5-37 se observa que esta vez lo esperado en cuanto a falta de agua es correcto con el Kc Dual, pues al aplicar las duraciones de las etapas de cultivo locales (Capítulo 4) se prolongaron los días de los tratamientos de 80, 100 y 120%, por lo que se hace evidente que al hacer la modificación en las fechas de comienzos y finales de etapas hubo un déficit en cuanto a la aplicación de agua, en el caso particular del tratamiento del 60% que al tener una etapas de menos días en comparación a FAO 56 disminuye la cantidad de agua requerida.

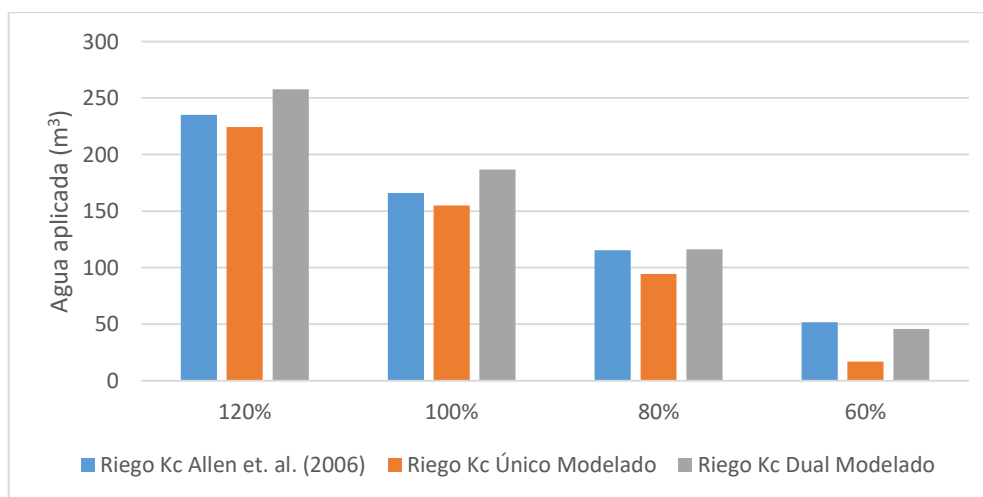


Figura 5- 37: Volúmenes de agua con etapas determinadas a partir fotografías.



Con las características de los emisores del sistema y los volúmenes de agua obtenidos de la aplicación de los Kc modelados y etapas fenológicas, se determinó que los tratamientos de 120% y 100% de la ETo debieron ser regados aproximadamente una semana más, el de 80% de la ETo un día más y el de 60% de la ETo debió ser dejado de regar 3 días antes en el cuadro 5-10 se muestran en rojo los minutos que faltaron regar por tratamiento y en negro los minutos que sobraron al riego.

Cuadro 5- 10: Tiempos de riego calculados.

Tratamiento	Kc Modelado	Etapas Locales		Etapas FAO 56	
		Tiempo en min	Tiempo en h	Tiempo en min	Tiempo en h
120%	Único Modelado	83.0	1.4	338.1	5.6
	Dual Modelado	-178.0	-3.0	131.3	2.2
100%	Único Modelado	92.1	1.5	294.9	4.9
	Dual Modelado	-169.1	-2.8	58.4	1.0
80%	Único Modelado	248.4	4.1	460.5	7.7
	Dual Modelado	-10.7	-0.2	233.8	3.9
60%	Único Modelado	239.4	4.0	177.8	3.0
	Dual Modelado	40.4	0.7	-40.6	-0.7

5.4 Conclusiones

Los resultados de los modelos fueron satisfactorios, observándose un buen ajuste de los datos hasta el final de la etapa de desarrollo, pero en dos intervalos, uno desde la etapa de inicio de temporada hasta la estabilización de h para modelos h/PCV y PCV para los modelos Kc/PCV que es prácticamente al inicio de la etapa de desarrollo y el segundo intervalo que corresponde a un comportamiento lineal durante toda la etapa de desarrollo.

Para realizar este tipo de investigación el mejor procedimiento corresponde al cálculo de coeficiente Dual de cultivo, puesto que los ajustes y el comportamiento de los datos son más específicos y se pueden analizar por separado los diversos componentes del proceso de la ET.

Al emplear los valores de Kc Dual y Etapas fenológicas locales de acuerdo a lo determinado se concluyó que los parámetros ofrecidos por el Boletín 56 de la



FAO son insuficientes pues de acuerdo al clima de la zona los volúmenes de agua aplicados al cultivo son menores con respecto a lo que la planta requería para los tratamientos de 120%, 100% y 80% de la ETO,

Las técnicas de visión son métodos precisos que ayudan al mejoramiento del cálculo de requerimientos hídricos de la planta, destacando que no es necesario de una gran inversión pues la cámara empleada en este experimento es prácticamente de uso común.



5.5 Literatura citada

- Adamsen, F.J., Pinter, P.J., Barnes, E.M., LaMorte, R.L., Wall, G.W., Leavitt, S.W., Kimball, B.A. (1999). Measuring wheat senescence with a digital camera. *Crop Science* 39(3). pp. 719–724.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo*. FAO. Roma.
- Antonio Velázquez, Carolina. (2014). *Detección no destructiva de los periodos críticos del maíz*. (Tesis de Maestría, Instituto Politécnico Nacional. Ciudad de México, México).
- Demarez, V., Duthoit, S., Baret, F., Weiss, M., Dedieu, G. (2008). Estimation of leaf area and clumping indexes of crops with hemispherical photographs. *Agricultural and Forest Meteorology* 148(4). pp. 644–655.
- Escarabajal Henarejos, D., Molina Martínez, J.M., Fernández Pacheco, D.G., Cavas Martínez, F., García Mateos G. (2015). Digital photography applied to irrigation management of Little Gem lettuce. *Agricultural Water Management*. 151. España. 148-157.
- Infante Gil, S y Zárate de Lara, G. P. (2011). *Métodos Estadísticos: Un enfoque interdisciplinario*. Trillas 2° ed. México. pp. 401-426.
- López Cruz, I. L., Ramírez Arias, A., Rojano Aguilar, A. (2005). Modelos matemáticos de hortalizas en invernadero: trascendiendo la contemplación de la dinámica de cultivos. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 11(2). pp. 257-267.
- López López, Rutilo. (2008) *Producción de tomate de cascara (physalis ixocarpa brot.) basado en láminas de riego y acolchado plástico* (Tesis Doctoral. Universidad Autónoma Chapingo, México).
- 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 Bioprocess Technol.* 5, pp. 1121–1142.
- Lukina, E.V., Stone, M.L., Rann, W.R. (1999). Estimating vegetation coverage in wheat using digital images. *Journal of Plant Nutrition* 22 (2). pp. 341–350.
- Matsuda, M., Ozawa, S., Hosaka, Y., Kaneda, K., Yamashita, H. (2003). Estimation of plant growth in paddy field based on proximal remote sensing-measurement of leaf nitrogen contents by using digital camera. *Journal of The Remote Sensing Society of Japan* 23(5). pp. 506–515.
- Meyer, G.E., Hindman, T.W., Laksmi, K., (1999) *Machine Vision Detection Parameters for Plant Species Identification*. SPIE, Boston, MA, USA. pp. 327–335.



- Rincón, L., Centeno, E., Abadía, A. (2011). Evaluación de la evapotranspiración y los coeficientes de cultivo y su relación con el porcentaje de suelo sombreado en un cultivo de lechuga con riego por goteo. pp. 164-169. Murcia, España.
- Pérez, A.J., Lopez, F., Benlloch, J.V., Christensen, S. (2000). Colour and shape analysis techniques for weed detection in cereal fields. *Computers and Electronics in Agriculture* 25(3). pp. 197–212.
- Phogat, V., Simunek, J., Skewes, M.A., Cox, J.W., McCarthy, M.G. (2016). Improving the estimation of evaporation by the FAO-56 dual crop coefficient approach under subsurface drip irrigation. *Agricultural Water Management* 178. Australia. pp. 189–200.
- Sakamoto, T., Gitelsonb, Anatoly A., Nguy-Robertsonb, Anthony L., Arkebauer, Timothy J., Wardlowb, Brian D., Suyker, Andrew E., Verma, Shashi B., Shibayama, Michio. (2012). An alternative method using digital cameras for continuous monitoring of crop status. *Agricultural and Forest Meteorology* 154– 155. Japón. pp. 113– 126
- Servín Palestina, Miguel. (2015). Sistema para programar y calendarizar el riego de los cultivos en tiempo real. (Tesis de Maestría, Colegio de Postgraduados. México).
- Shibayama, M., Sakamoto, T., Homma, K., Okadai, S., Yamamoto, H. (2009a). Daytime and nighttime field spectral imagery of ripening paddy rice for determining leaf greenness and 1000-grain weight. *Plant Production Science* 12 (3). pp. 307–318.
- Shibayama, M., Sakamoto, T., Takada, E., Inoue, A., Morita, K., Takahashi, W., Kimura, A., (2009b). Continuous monitoring of visible and near-infrared band reflectance from a rice paddy for determining nitrogen uptake using digital cameras. *Plant Production Science* 12(3). pp. 293–306.
- Shibayama, M., Sakamoto, T., Takada, E., Inoue, A., Morita, K., Takahashi, W., Kimura, A. (2011). Estimating paddy rice leaf area index with fixed point continuous observation of near infrared reflectance using a calibrated digital camera. *Plant Production Science* 14(1). pp. 30–46.
- Woebbecke, D.M., Meyer, G.E., Vonbargen, K., Mortensen, D.A. (1995). Color indexes for weed identification under various soil, residue, and lighting conditions. *Transactions of the ASAE* 38(1). pp. 259–269.



CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES GENERALES.

El método del balance hídrico por medio del coeficiente de cultivo K_c dual de la FAO 56, es factible para poder entender por separado las características de la evaporación y la transpiración, determinando que el valor de transpiración al ser la misma variedad de maíz fue igual en los 4 tratamientos, mientras que el valor de la evaporación fue distinto, afectado por el parámetro de reducción de evaporación K_r , relacionado con el cambio en porcentaje de la ETo empleada.

La variación de la ETo en los tratamientos generó diferentes láminas de riego, aplicando láminas de manera esporádica a las parcelas que se regaban al 60% de ETo , pues los eventos de precipitación satisfacían las demandas determinadas por el Tratamiento y aumentando la lámina de riego y el número de días de aplicación del mismo con el aumento del porcentaje empleado de la ETo .

El procesamiento digital de imágenes es una herramienta que agilizó la extracción de cobertura vegetal, destacando que se empleó tecnología poco sofisticada y se obtuvieron resultados satisfactorios, por lo que el desarrollo de este procedimiento permite que se trabaje en temas de riego de precisión sin la necesidad de invertir grandes sumas de dinero.

Las Etapas de Crecimiento del maíz obtenidas con los resultados del procesamiento digital de imágenes cambiaron su duración en días, para temporal y 60% de la ETo el ciclo dura 145 días, para 80% de la ETo 167 días y para 100% y 120% alcanza los 170 días, valores que fueron determinantes al recalcular los calendarios de riego empleados en el experimento.

La relación de variables para la generación de modelos PCV/h y K_c/PCV fue satisfactoria, estos modelos se trabajaron en dos intervalos, el primero corresponde a las etapas inicial y de desarrollo del cultivo y el segundo a la etapa de mediados de temporada, puesto que en el primer intervalo el comportamiento de los datos es exponencial y para el segundo no hay cambios significativos en los datos de una semana a otra dando como resultado un ajuste lineal del modelo,



al ser evaluados mediante pruebas estadísticas como r^2 , RMSE e índice E fueron calificados como modelos con excelente ajuste por lo que calculan de forma confiable los valores de PCV y Kc Único y Dual.

Al emplear los valores de Kc Dual obtenidos de los modelos y Etapas fenológicas locales se concluyó que los valores recomendados por el Boletín 56 de la FAO no satisfacían los volúmenes de agua requeridos pues las láminas aplicadas en los tratamientos de 80%, 100% y 120% de la ETO aplicadas fueron menores con respecto a lo propuesto por la modelación.