

# Determinación del coeficiente del cultivo y parámetros biométricos basados en imágenes captadas con drone, lisímetros de drenaje y métodos indirectos para el cultivo de papa *Solanum* spp

Determination of crop coefficient and biometric parameters based on images captured drone, drainage lysimeters and indirect methods for growing potato *Solanum* spp

Juan León Ruiz<sup>1</sup>, Néstor Montalvo Arquíñigo<sup>1</sup>, Pamela Paula Alarcón<sup>2</sup>

RECIBIDO: 23/05/2016 - APROBADO: 30/06/2016

## RESUMEN

Con el propósito de determinar los coeficientes del cultivo para el requerimiento hídrico y la influencia en los parámetros biométricos mediante imágenes captadas con drone, lisímetros de drenaje y métodos indirectos para el cultivo de papa *Solanum* spp en Riobamba – Ecuador, se compararon los métodos: lisímetro de drenaje, tanque de evaporación tipo A, fórmula de FAO Penman Monteith, y ortofotos captadas con drone. El estudio se realizó en los predios del Centro Experimental del Riego de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo del cantón Riobamba, provincia de Chimborazo, se utilizó tres estaciones agrometeorológicas digitales completas; se instalaron 3 lisímetros de drenaje. Para medir la humedad del suelo se utilizaron tensiómetros ubicados en la zona radicular a 15 - 30 y 45 cm de profundidad. Para la implementación de la investigación en campo se utilizó un diseño de bloques completamente al azar con tres tratamientos (T1 = aplicación de la lámina de riego medida con lisímetro, T2 aplicación de la lámina de riego medida con tanque tipo A, T3 aplicación de la lámina de riego calculada con fórmula) y tres repeticiones finalizando con un análisis de varianza al 5%. Se logró la comparación del cálculo de la evapotranspiración acumulada para cada día, por los métodos indicados. Los sobrevuelos realizados fueron 4, tomados cada 30 días después de la siembra. Se concluye que el mapa de Kc obtenida mediante detección remota presentan una descripción útil del proceso evapotranspiratorio en los meses estudiados, con una similitud entre las curvas características para su validación con el método directo de lisímetros y valores de referencia encontrados en la literatura. Además existe concordancia entre los valores de Kc presentados por teledetección y las fases de desarrollo y procesos fisiológicos de la planta.

**Palabras clave:** Coeficiente del cultivo, papa, NDVI, drone, lisímetro.

## ABSTRACT

In order to determine water requirements and biometric parameters using images captured drone, lysimeters drainage and indirect methods for growing potato *Solanum* spp in Riobamba Ecuador, methods were compared: lisímetro drain, tank evaporation type A, FAO Penman Monteith formula and orthophotos taken with drone. The study was conducted on the premises of the Experimental Center watering Polytechnic School of Chimborazo Riobamba Canton Province of Chimborazo, 3 agro meteorological stations used complete digital; Three drainage lysimeters were installed. 30 and 45 cm deep - to measure soil moisture tensiometers located in the root zone 15 is used. used a block design for implementation of field research completely randomized with three treatments (T1 = application of irrigation depth measured lysimeter, T2 application of irrigation depth measured with tank type A,

- 1 Mg. Juan Eduardo León Ruiz, Dr. Néstor Montalvo Arquíñigo. Universidad Nacional Agraria La Molina, Programa de Doctorado en Recursos Hídricos. Apdo 12-056 La Molina, Lima, Perú. Teléfono + 51(01)3401180 Central +51 6147800 anexo 140. E-mail: jleon@esPOCH.edu.ec
- 2 Ing. Pamela Andrea. Paula Alarcón. Mg. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Recursos Naturales, Centro Experimental del Riego, Centro de Información Geográfica. Panamericana Sur km 1.5, Riobamba, Ecuador. Teléfono: + 593 (032) 998220. E-mail: ppaula@esPOCH.edu.ec / pamedicar@yahoo.es

T3 application of calculated irrigation sheet formula) and three replications ending with an analysis of variance 5%. comparing the accumulated calculation evapotranspiration for each day, by the methods indicated was achieved. The overflights were 4 taken every 30 days after planting. It is concluded that the map of Kc obtained by remote sensing provide a useful description of evapotranspiratorio process in the months studied, with a similarity between the characteristic curves for validation with the direct method of lysimeters and reference values found in the literature . There is also agreement between the values of Kc presented by remote sensing and development stages and physiological processes of the plant.

**Keywords:** Crop Coefficient, potato, NDVI, Drone, Lisimeter

## I. INTRODUCCIÓN

En diversas partes del mundo ha sido objeto de estudio la estimación de los requerimientos hídricos de los cultivos, a fin de encontrar una expresión que cuantifique este parámetro, se adapte a las condiciones edafoclimáticas de producción potencial del cultivo en consideración y que a la vez, sea fácil su aplicación.

El conocimiento de los valores de la evapotranspiración es importante por las aplicaciones que se pueden derivar. López (1991) y Aguilera y Martínez (1996) indicaron las siguientes aplicaciones: a) Para determinar el área que puede regarse con un determinado volumen de agua disponible. b) Es la base para elaborar calendarios teóricos de riego de cultivos. c) Estimar los volúmenes de agua que sean necesarios para auxiliar a los cultivos en caso de que la lluvia sea insuficiente para su buen desarrollo. d) Para determinar en grandes áreas o cuencas, volúmenes de agua que se requieran drenar. e) Para seleccionar los cultivos más adecuados en zonas de agricultura de temporal. f) Permite determinar la lámina adicional de riego necesaria para la prevención de problemas de ensalamiento de los suelos. g) Permite determinar, en forma general, la eficiencia con la que se está aprovechando el agua y, por lo mismo, planear debidamente el mejoramiento y la superación de todo el conjunto de actividades que se generan en los proyectos de Riego para proporcionar el agua a los cultivos oportunamente.

Aguilera y Martínez (1996) indicaron que existen varios métodos para estimar la evapotranspiración, los cuales se han clasificado en métodos directos e indirectos. Entre estos pueden señalarse, método directo lisímetros; indirectos que proporcionan una estimación del requerimiento de agua a través de todo el ciclo vegetativo mediante la utilización de fórmulas empíricas. En los últimos años se han trabajado en el desarrollo metodologías de teledetección cuantitativa para la determinación del estado hídrico de la vegetación basándose en el desarrollo de un vehículo aéreo no tripulado equipado con sensores de imagen. Varios algoritmos han sido desarrollados en los últimos años, dentro de los cuales se destaca el algoritmo SEBAL ("Surface Energy Balance Algorithm for Land") que fue desarrollado por Bastiaansen en 1995 que permite la obtención de la Evapotranspiración (ET) a través de datos de imágenes de satélite y algunos datos complementarios de superficie. SEBAL utiliza imágenes captadas por el sensor TM Landsat u otro sensor que capture bandas del espectro visible, infrarrojo y termal. El Centro de Investigación del Departamento de Agricultura ubicado en Kimberly, EE.UU., validó los resultados obtenidos con SEBAL, comparándolos con mediciones en lisímetros de precisión (BASTIANSEN 2000). SEBAL es una tecnología emergente que tiene potencial para convertirse en una herramienta importante para la comunidad científica

nacional y global que estudia los recursos hídricos y los mapas de Evapotranspiración (ET) creados con SEBAL o metodologías similares basados en procesamiento de sistemas y sensores remotos, en el futuro se convertirán en información rutinaria que servirán como ingresos mensuales o diarios de modelos de planeamiento y operación de recursos hídricos como operación de reservorios, manejo de aguas subterráneas, planeamiento del agua de riego, regulación de los derechos de agua y estudios hidrológicos. Los parámetros biofísicos son aquellos que permiten describir el estado y los ritmos de cambio de una cubierta vegetal (Calera *et al.*, 2004). La tecnología de los sensores remotos permite dar seguimiento al crecimiento y desarrollo de la vegetación, a través de relaciones empíricas entre las variables biofísicas de los cultivos y los índices de vegetación espectrales (IV) (Gilabert *et al.*, 2002).

Considerando la importancia de los recursos hídricos y la aplicación de tecnologías modernas se ha planteado la siguiente investigación, cuyo objetivo fue: Determinar el coeficiente del cultivo para los requerimientos hídricos y la influencia de parámetros biométricos mediante imágenes captadas con drone, lisímetros de drenaje y métodos indirectos para el cultivo de papa *Solanum* spp en Riobamba - Ecuador.

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

La presente investigación se realizó en el campo del Centro experimental del riego de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo en Riobamba - Ecuador, localizada a una altitud de 2833 msnm, en las coordenadas UTM 17S DATUM WGS84 X:758232 Y:9817776. Los suelos son de textura franco arenosa, capacidad de campo de 14%, punto de marchitez permanente de 7%, Agua Util 7% y densidad aparente de 1.3 g cm<sup>3</sup> Figura N.º 2.

La variedad de papa (*Solanum tuberosum* spp.). Variedad Natividad fue un híbrido experimental, el cual proporcionó el INIAP (Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias) Programa Nacional de Raíces y Tubérculos. La siembra fue directa a una separación entre hileras de 1.0 m y de 0.30 m entre plantas, una semilla por sitio de un peso aproximado de 60 gramos cada una.

El diseño experimental fue de bloques completos al azar, con tres tratamientos y tres repeticiones con un total de 9 parcelas, cada parcela tuvo una dimensión de 10x10m con 333 plantas, en total el experimento tuvo 3.000 plantas Figura N.º 4.

De cada una de las parcelas se seleccionó al azar, 10 plantas para evaluar el contenido de clorofila, altura de la planta, número de tallos y el diámetro de tallos. Y 48 plantas distribuidas al azar para determinar el estado fenológico del cultivo Figuras N.º 1 y 3.

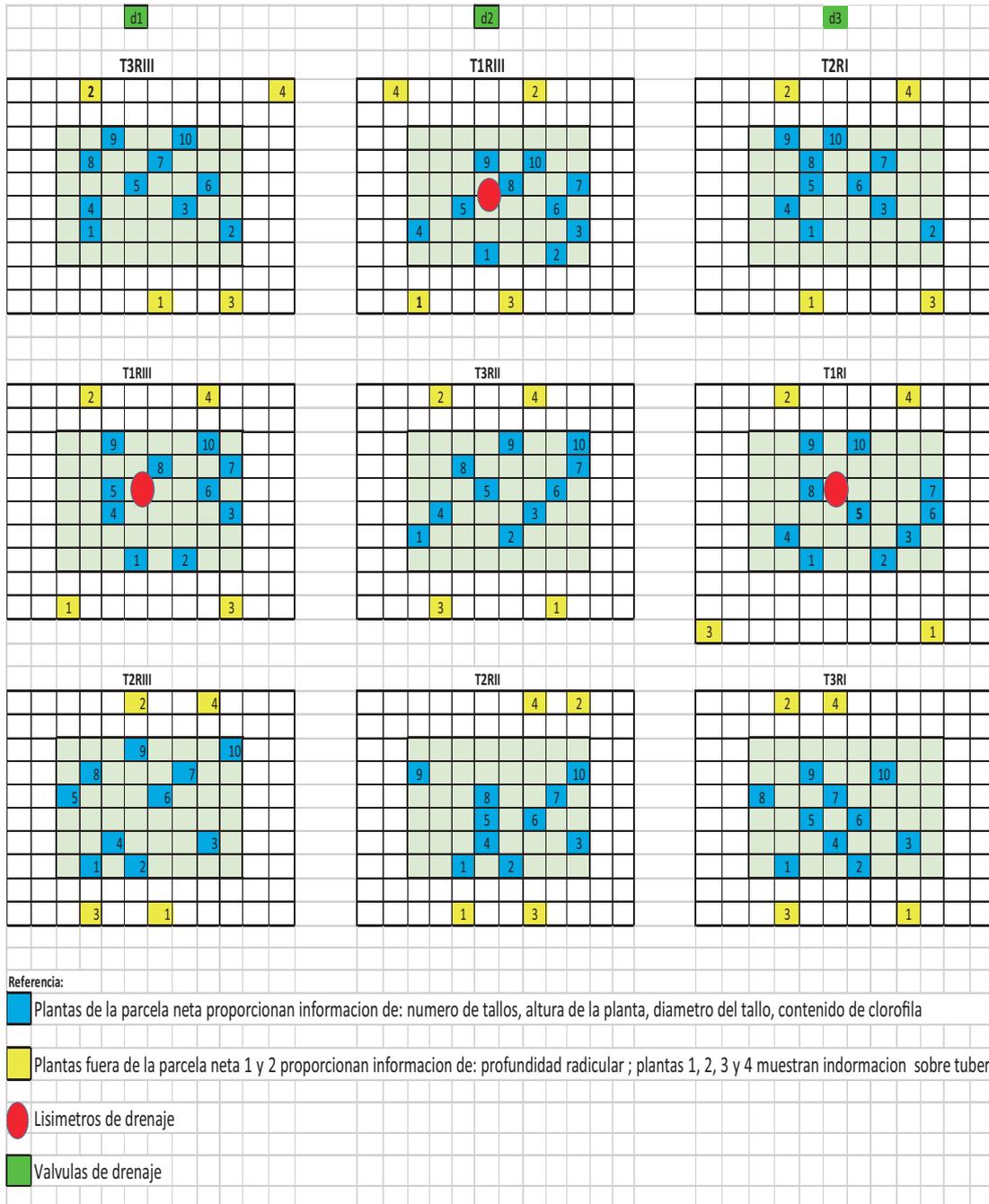


Figura N.º 1. Distribución de las plantas en el campo a las que se registró los datos en cada parcela.  
Fuente: Ing. Juan León Ruiz

El ciclo del cultivo siembra cosecha fue de 151 días, se sembró el 17 de marzo, se cosechó el 15 de agosto del 2015, en este período de observación se efectuaron las mediciones fenológicas, fisiológicas en forma semanal, mientras que las mediciones agrometeorológicas fueron diarias en forma secuencial, los sobrevuelos del dron para la captura de fotografías con sensor infrarrojo, se realizaron desde el primer mes de siembra en forma secuencial cada 30 días, siendo un total de cuatro sobrevuelos.

La evapotranspiración se midió con 3 lisímetros de drenaje cilíndricos a una profundidad 0.8 m con una área 0.26 m<sup>2</sup> y un volumen de 0,208 m<sup>3</sup> en los cuales están rellenos con perfil de suelo inalterado, en capas de cada 20 cm

definiendo su compactación con un penetrómetro, en la base de los lisímetros se encuentran instalados accesorios y tuberías de 50 mm con una válvula colocada al final de la tubería para controlar el agua de drenaje.

Para el riego se utilizó cinta de riego 16 mm auto compensada colocada superficialmente una línea por cada surco en la parte superior del lomo, la reposición de agua al suelo se realizó diariamente la lámina de riego se definió por cada tratamiento, para medir la tensión de humedad del suelo se utilizaron tensiómetros colocados en cada parcela a profundidades de 15 – 30 y 45 cm respectivamente.

## 2.1 Estaciones meteorológicas

Se utilizaron tres estaciones meteorológicas pertenecientes y ubicadas en los predios de la ESPOCH a 2840 msnm. Una estación meteorológica portátil se instaló en el área del cultivo. La segunda estación meteorológica automática ubicada a 520 metros de distancia del cultivo. La tercera estación agrometeorológica de la Facultad de Recursos Naturales ubicada a 490 metros de distancia del cultivo en estudio.

### 2.1.1 La recolección, organización y procesamiento de datos:

#### i.-Medición de la Evapotranspiración con el Lisímetro de Drenaje

La evapotranspiración se calculó a través del balance hídrico. Utilizando la ecuación (1)

$$V_a = (ET_p * ND * A_l) c \quad (1)$$

Esta prueba tiene como finalidad obtener un mapa de evapotranspiración del cultivo ( $ET_c$ ) instantánea como resultado de la aplicación de la ecuación (2) mencionada en (Allen, Pereira, Raez, & Smith, 2006, pág. 89):

$$K_c = \frac{ET_c}{ET_0} \quad (2)$$

La Evapotranspiración potencial ( $ET_0$ ) de la zona de estudio fue obtenida con la información arrojada de la estación agrometeorológica de la Facultad de Recursos Naturales de la ESPOCH con los que se determinaron los valores de evaporación del Tanque Evaporímetro Tipo A ( $E_{pan}$ ), para posteriormente calcular la  $ET_0$  mediante la aplicación de la ecuación (3).

### III. MEDICIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN TANQUE EVAPORÍMETRO TIPO A

El tanque tipo A nos permite determinar la evaporación en forma manual en unidades de mm/día, cuyo valor se utiliza en la fórmula mencionada por (Allen, Pereira, Raez, & Smith, 2006, pág. 79):

$$ET_0 = K_p * E_{pan} \quad (3)$$

### IV. MEDICIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DE FORMA INDIRECTA.

La ecuación de FAO Penman-Monteith es una representación clara, precisa y simple de los factores físicos y fisiológicos que gobiernan el proceso de la evapotranspiración. Empleamos la ecuación (4) mencionada por (Allen, Pereira, Raez, & Smith, 2006, pág. 25) para determinar la  $ET_0$ :

$$ET_0 = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)} \quad (4)$$

## V. OBTENCIÓN DE IMÁGENES

Para la obtención de las imágenes se utilizó un cuadricóptero equipado con una cámara fotográfica de alta resolución marca Canon SX260 HS con un intervalómetro incorporado para la toma secuencial de fotos, con una resolución de 12 megapíxeles y un GPS de 1 m de precisión.



Figura N.º 2. Localización de la zona de estudio.

Fuente: Melo, P. (2015). Levantamiento de fotografía e índices de vegetación parcelas EsPOCH Centro Experimental del Riego. Quito: Dron and Gis.



Figura N.º 3. Área del ensayo, instalado el sistema de riego a goteo y postes de georeferencia.

Fuente: Juan León Ruiz

## VI. OBTENCIÓN DEL COEFICIENTE DE CULTIVO MEDIANTE FOTOGRAFÍAS AÉREAS.

El  $K_c$  fue obtenido mediante la aplicación de la ecuación (5), para la obtención del valor en la fase inicial, desarrollo y media del cultivo (Cuesta, Montorro, Jochum, & Calera, 2005, pág. 218):

$$K_c = 1,25 * NDVI - 0,2 \quad (5)$$

Para la fase final se aplicó la ecuación (6) (Cuesta, Montorro, Jochum, & Calera, 2005, pág. 218):

$$K_c = 1,5625 * NDVI - 0,05 \quad (6)$$

Para la obtención del Índice de Vegetación Normalizado (NDVI), ecuación (7):

$$NDVI = \frac{(NIR-Red)}{(NIR+Red)} \quad (7)$$

Dónde NIR y RED son las reflectancias en el infrarrojo cercano y en la banda del rojo. Para la obtención de las bandas NIR y RED, se realizaron toma fotográfica del cultivo en estos rangos del espectro electromagnético. Se generó un set de fotos aéreas con geolocalización de las parcelas, correspondientes a diferentes fases del cultivo. Con esta información se realizó el cálculo de un mapa de NDVI de las parcelas de estudio mediante una combinación de bandas NIR y RED en ARCGIS, y con este mapa a su vez se obtuvo el mapa de Kc.

**VII. EN ESTE ESTUDIO SE HAN SELECCIONADO LOS SIGUIENTES PARÁMETROS BIOFÍSICOS:**

Fracción de radiación fotosintéticamente absorbida por la cubierta: corresponde a la proporción de la radiación incidente en el rango entre 400 y 700 nm que es absorbida por las plantas (Asrar *et al.*, 1992)). La fortaleza de esta relación radica en su relación directa con el crecimiento de las plantas ya que evalúa la energía consumida en el proceso fotosintético.

Índice de área foliar (IAF): corresponde al cociente entre el área total de las hojas verdes (cara superior) y el área donde crecen. El sentido físico de esta medida es de una medida aproximada de la superficie foliar verde por unidad de radiación solar disponible.

Fracción de cobertura vegetal verde (Fc): definida como la fracción ocupada por la cubierta verde o la proporción de la superficie de suelo que es interceptada por la proyección vertical de la vegetación. Su alta relación con el crecimiento de la vegetación le confiere utilidad en la definición de etapas en la metodología kc-ETo.

La distribución de estos tratamientos en la parcela se presenta en la figura 4.



Figura N.º 4: Ortofotomosaico de las parcelas estudiadas, las etiquetas hacen referencia al número de tratamiento y a la repetición asignada, a la base válvulas de drenaje de los tratamientos.

Fuente: Ing. Pamela Paula Censig Espoch

**VIII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Luego de realizar el ordenamiento y tabulación de la información se presentan los resultados de cálculos de ETo y Kc de los tratamientos Lisímetros, tanque de evaporación tipo A, fórmulas empíricas y las imágenes en el infrarrojo cercano y rojo obtenidas mediante fotografía digital aérea, se logró definir 4 mapas de ETc, correspondientes a cada sobrevuelo, los parámetros biométricos, las fechas de sobrevuelo con espaciamiento de 30 días calendario que fueron: 17 de abril 2015, 17 de mayo 2015, 17 junio 2015 y 17 de julio 2015. Figura N.º 5



Figura N.º 5: Altura de planta en cada fecha de sobrevuelo

Fuente: Juan León Ruiz/Pamela Paula

Tabla N.º 1: Análisis de varianza y rango de altura de planta en cm

TRATA	17/04/2015	17/05/2015	17/06/2015	17/07/2015
LISIMETRO	19.81 A	45.49 A	82.84 A	105.85 A
TANQUE A	11.68 B	36.52 B	66.09 B	86.68 B
FORMULA	14.91 A - B	35.94 B	65.57 B	96.24 A - B

Como podemos observar en la Tabla N.º 1. En el análisis estadístico realizado podemos mencionar que la altura de la planta para el primer sobrevuelo (17 de abril) que estadísticamente para las repeticiones es no significativo, mientras que la comparación entre los tratamientos es significativo, liderando la aplicación de la lámina de riego medida con el lisímetro alcanzando una altura de 19.81 cm con un coeficiente de variación del 15,53%.

De igual manera podemos anotar que la altura de la planta para el segundo sobrevuelo (17 de mayo) encontramos que para las repeticiones estadísticamente es no significativo, mientras que para los tratamientos es significativo y altamente significativo cuando comparamos altura de plantas aplicadas la lámina de riego de acuerdo a la medida que nos da el lisímetro logrando una altura de 45.49 cm, vs las láminas aplicadas con la medida del tanque de evaporación tipo A y las fórmulas empíricas que alcanzan 36,52 y 35,94 cm respectivamente, en este periodo podemos determinar un coeficiente de variación del 7,22%.

Para el tercer sobrevuelo (17 de junio) podemos determinar que entre las repeticiones estadísticamente es no significativo, mientras que es altamente significativo para los tratamientos cuando comparamos las láminas aplicadas medidas con el lisímetro que alcanzan un altura de 82,84 cm, versus las láminas aplicadas y medidas con el tanque tipo A y fórmulas empíricas, en este análisis nos encontramos un coeficiente de variación de 5,03%.

Para el cuarto sobrevuelo (17 julio) estadísticamente nos demuestra que entre repeticiones es no significativo, mientras que es altamente significativo para los tratamientos así como cuando compramos las láminas aplicadas con medida del lisímetro que alcanzan un altura de 105,85 cm, versus las láminas aplicadas y medidas con el tanque tipo A y fórmulas empíricas que están por debajo de este rango, en este análisis nos encontramos un coeficiente de variación de 3,74%. Figura N.º 6.

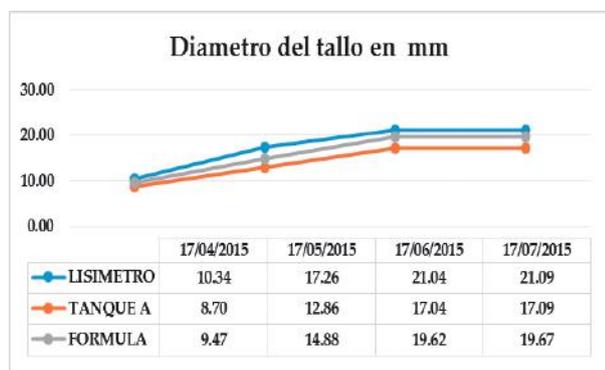


Figura N.º 6: Diámetro del tallo en cada fecha de sobrevuelo  
Fuente: Juan León Ruiz/Pamela Paula

Tabla N.º 2: Análisis de varianza y rango de diámetro del tallo en mm

TRATA	17/04/2015	17/05/2015	17/06/2015	17/07/2015
LISIMETRO	10.34 A	17.26 A	21.04 A	21.09 A
TANQUE A	8.70 B	12.86 C	17.07 B	17.09 B

Como podemos observar en la Tabla N.º 2. En el análisis estadístico realizado podemos mencionar que para el primer sobrevuelo (17 de abril) para el parámetro de diámetro del tallo encontramos estadísticamente para las repeticiones es no significativo, mientras que entre los tratamientos es significativo y altamente significativo la comparación entre los tratamientos liderando la aplicación de la lámina de riego medida con el lisímetro alcanzando un diámetro de 10,34 mm, encontrándose un coeficiente de variación del 3,90%.

De igual manera podemos anotar que el diámetro del tallo la planta para el segundo sobrevuelo (17 de mayo) encontramos que para las repeticiones estadísticamente es no significativo, mientras que para los tratamientos es altamente significativo liderando el tratamiento de la lámina aplicada con la medida del lisímetro alcanzando un diámetro de 17,26 mm, en este periodo podemos determinar un coeficiente de variación del 3,09%.

Para el tercer sobrevuelo (17 de junio) podemos determinar que entre las repeticiones estadísticamente es no significativo, mientras que es altamente significativo para los tratamientos liderando el tratamiento de aplicación de la lámina de riego medida con el lisímetro alcanzando 21,04 mm , en este análisis nos encontramos un coeficiente de variación de 3,36%.

Para el cuarto sobrevuelo (17 julio) estadísticamente nos demuestra que entre repeticiones es no significativo, mientras que es altamente significativo para los tratamientos, el tratamiento aplicado con el lisímetro llegó a obtener un diámetro de 21,09 mm, en este análisis nos arroja un coeficiente de variación de 3,35%. Figura N.º 7

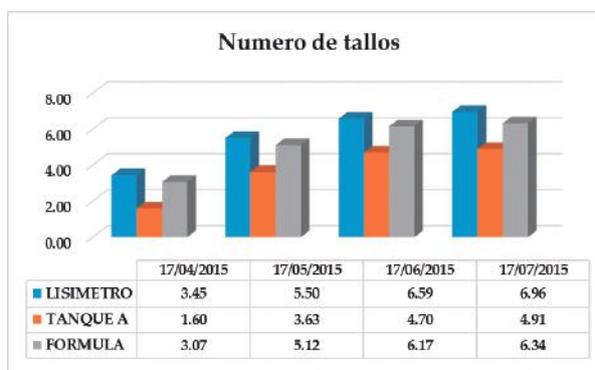


Figura N.º 7: Número de tallos en cada fecha de sobrevuelo  
Fuente: Juan León Ruiz/Pamela Paula

Tabla N.º 3: Análisis de varianza y rango de número de tallos

TRATA	17/04/2015	17/05/2015	17/06/2015	17/07/2015
LISIMETRO	3.45 A	5.5 A	6.59 A	6.96 A
TANQUE A	1.60 B	3.63 B	4.70 B	4.91 B
FORMULA	3.07 A	5.12 A	6.17 A	6.34 A - B

Como podemos observar en la Tabla N.º 3. En el análisis estadístico realizado para el número de tallos podemos mencionar que para el primer sobrevuelo (17 de abril) encontramos que estadísticamente es no significativo entre las repeticiones, mientras que entre los tratamientos y demás comparaciones son significativos, encontrándose un coeficiente de variación del 15,45%.

De igual manera podemos anotar que el número de tallo de la planta para el segundo sobrevuelo (17 de mayo) encontramos que para las repeticiones estadísticamente es no significativo, mientras que para los tratamientos y demás comparaciones es significativo, en este periodo podemos determinar un coeficiente de variación del 8,50%.

Para el tercer sobrevuelo (17 de junio) podemos determinar estadísticamente que entre las repeticiones es no significativo, mientras que para los tratamientos y demás comparaciones es significativo, en este análisis nos encontramos un coeficiente de variación de 7,13%.

Para el cuarto sobrevuelo (17 julio) estadísticamente nos demuestra que entre repeticiones es no significativo, mientras que es significativo para los tratamientos y demás comparaciones, en este análisis se obtiene un coeficiente de variación de 8,34%. Figura N.º 8

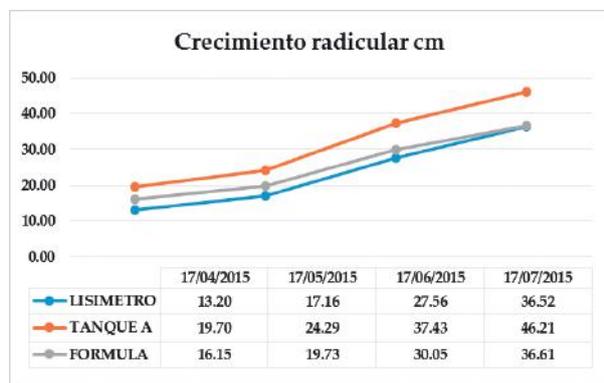


Figura N.º 8: Crecimiento radicular en cada fecha de sobrevuelo

Fuente: Juan León Ruiz/Pamela Paula

Tabla N.º 4: Análisis de varianza y rango de crecimiento radicular.

TRATA	17/04/2015	17/05/2015	17/06/2015	17/07/2015
LISIMETRO	13.20 B	17.16 B	27.56 B	36.52 B
TANQUE A	19.70 A	24.29 A	37.43 A	46.21 A
FORMULA	16.15 A - B	19.73 A - B	30.05 B	36.61 B

Como podemos observar en la Tabla N.º 4. En el análisis estadístico realizado para el crecimiento radicular podemos mencionar que para el primer sobrevuelo (17

de abril) encontramos que estadísticamente para las repeticiones es no significativo, mientras que para los tratamientos es significativo, con un coeficiente de variación del 8,22%.

El crecimiento radicular para el segundo sobrevuelo (17 de mayo) encontramos que estadísticamente para las repeticiones es no significativo, mientras que para los tratamientos y demás comparaciones es significativo, en este periodo podemos determinar un coeficiente de variación del 9,41%.

Para el tercer sobrevuelo (17 de junio) podemos determinar que estadísticamente entre las repeticiones es no significativo, mientras que es altamente significativo para los tratamientos y demás comparaciones, y un coeficiente de variación de 4,16%.

Para el cuarto sobrevuelo (17 julio) estadísticamente nos demuestra que entre repeticiones es no significativo, mientras que es altamente significativo para los tratamientos, y un coeficiente de variación de 4,15%. Figura N.º 9

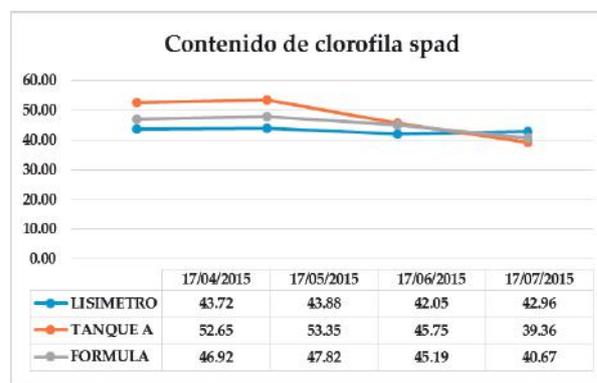


Figura N.º 9: Contenido de clorofila en cada fecha de sobrevuelo

Fuente: Juan León Ruiz/Pamela Paula

Tabla N.º 5: Análisis de varianza y rango de contenido de clorofila en spad

TRATA	17/04/2015	17/05/2015	17/06/2015	17/07/2015
LISIMETRO	43.72 C	43.88 B	42.05 B	42.96 A
TANQUE A	52.65 A	53.35 A	45.75 A	39.36 B
FORMULA	46.92 B	47.82 A - B	45.19 A	40.67 A - B

Como podemos observar en la Tabla N.º 5. En el análisis estadístico realizado para el contenido de clorofila podemos mencionar que para el primer sobrevuelo (17 de abril) encontramos que estadísticamente es no significativo para las repeticiones, mientras que para los tratamientos y demás comparaciones son altamente significativos, el tratamiento de aplicación de lámina de riego medida con el tanque de evaporación tipo A alcanzó el contenido máximo de clorofila con 48,53 spad, y un coeficiente de variación del 1,48%.

Para el contenido de clorofila en la planta para el segundo sobrevuelo (17 de mayo) encontramos que estadísticamente para las repeticiones es no significativo, mientras que para los tratamientos es significativo, el tratamiento de la aplicación de la lámina medida con el tanque de evaporación tipo A alcanzó su mayor contenido con 53,35 spad, con un coeficiente de variación del 6,43%.

Para el tercer sobrevuelo (17 de junio) podemos determinar que entre las repeticiones estadísticamente es no significativo, mientras que para los tratamientos es significativo, la aplicación de la lámina medida con el tanque de evaporación A alcanzó el mayor rango con 45,75 spad, y un coeficiente de variación de 2,27%.

Para el cuarto sobrevuelo (17 julio) estadísticamente nos demuestra que entre repeticiones es no significativo, mientras que es significativo para los tratamientos y demás comparaciones, en este análisis nos encontramos un coeficiente de variación de 2,41%.

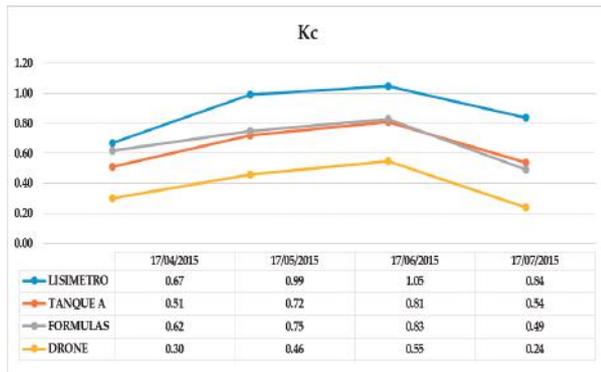


Figura N.º 10: valores de Kc de los tratamientos en cada sobrevuelo.

Fuente: Juan León Ruiz/Pamela Paula

Como podemos observar en el Figura N.º 10. El resultado final la relación encontrada del coeficiente del cultivo para la papa comparando los métodos del lisímetro de drenaje, tanque de evaporación, tipo A, fórmulas empíricas y fotografías tomadas con el drone podemos indicar que se nota claramente la distribución de los Kc en las etapas, de cada uno de los tratamientos tienen tendencias

similares, por lo cual se requiere hacer ajuste con un coeficiente que relacione directamente el lisímetro con las fotografías del drone.

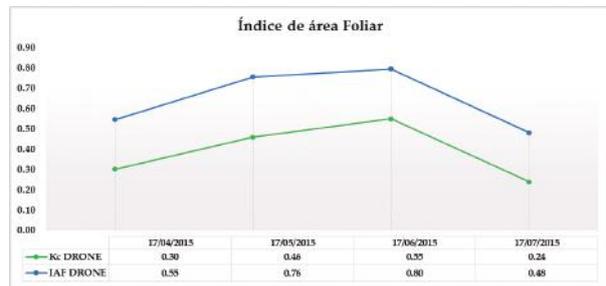


Figura N.º 11: Comparativo entre Kc ajustada e índice de vegetación.

Fuente: Juan León Ruiz/Pamela Paula

Como podemos observar en la Figura N.º 11. El resultado final la relación encontrada del coeficiente del cultivo para la papa comparando con el índice de área foliar en cada una de las etapas tienen tendencias similares, por lo cual se requiere hacer ajuste con un coeficiente que relacione directamente el índice de vegetación captado con las fotografías del drone y el Kc calculado y ajustado.

**Resultados mediante detección remota**

Luego de realizar el procesamiento de las imágenes en el infrarrojo cercano y rojo, obtenidas mediante fotografía digital aérea, se logró definir cuatro mapas de coeficiente del cultivo (Kc) correspondientes a cada sobrevuelo, los cuales proveen importante información para la determinación de requerimientos hídricos del cultivo.

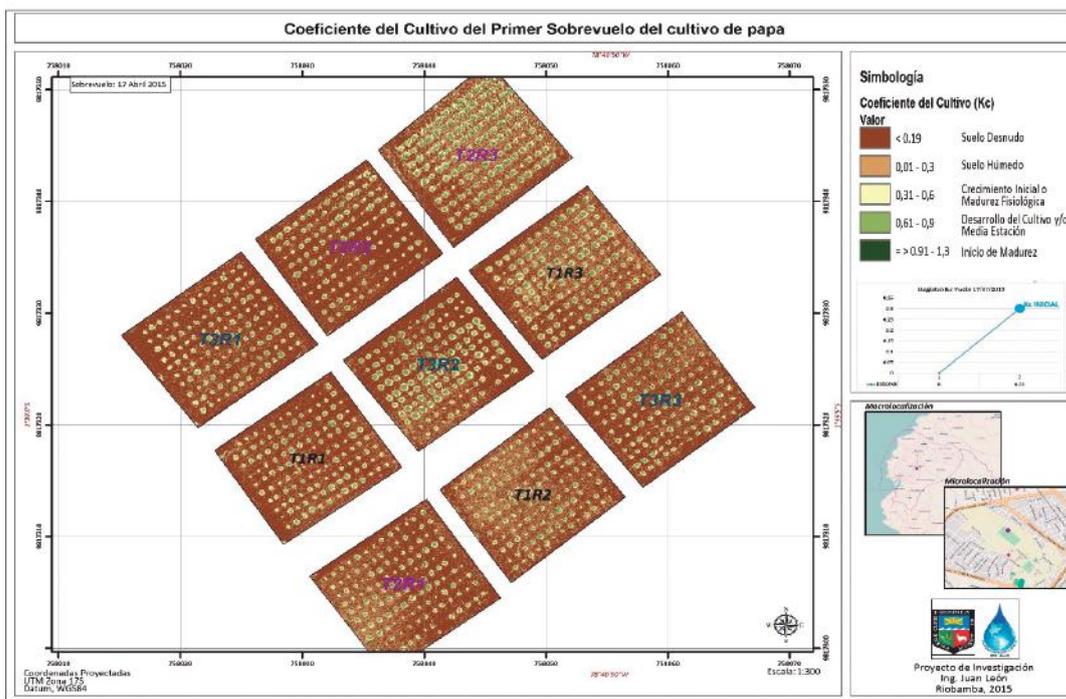


Figura N.º 12: Mapa de coeficiente del cultivo determinado mediante detección remota 17 de abril de 2015.

Fuente: Ing. PAMELA PAULA – ING JUAN LEON RUIZ

Del sobrevuelo del día 17 de abril presentamos el mapa de Kc en la Figura 5, para la parcela de estudio, se presentan amplias regiones de baja evapotranspiración interpretadas como evaporación del suelo que representan el 57,45% de los píxeles involucrados en este análisis, las regiones de transpiración por su parte representan el porcentaje restante. Para el día en que ha sido hecha esta primera toma el cultivo tiene 30 días de haber sido sembrado, el valor promedio del Kc es de 0,3, un valor bajo comparado con los sobrevuelo 2 y 3 que registran valores promedio de 0,46 y 0,55 respectivamente, según (Allen, Pereira, Raez, & Smith, 2006) en este día el cultivo se encuentra en la etapa inicial, comparando con la curva ETC / día mostrada en un estudio realizado en México para un cultivo de papa sembrado en el ciclo otoño invierno de autoría de (Íñiguez, Ojeda, & Rojano, 2011)

De la segunda toma realizada el día 17 de mayo de 2015 se obtuvo el mapa de Kc de cultivo mostrado en la Figura 6, donde se evidencia el crecimiento del cultivo corroborado por la mayor área ocupada por píxeles que representan transpiración del cultivo siendo en esta imagen el 87,95%. El Kc promedio para esta toma es de 0,46 correspondiente a la etapa de desarrollo (Allen, Pereira, Raez, & Smith, 2006) que atraviesa nuestro cultivo a los 61 días luego de la siembra, muy similar al comportamiento descrito en la curva ETC / día mostrado en el estudio realizado por (Íñiguez, Ojeda, & Rojano, 2011). Al relacionar estos datos con información fenológica, vemos que para el 16 de mayo toda la muestra de 45 plantas presentó floración, el inicio de la tuberización inició el 6 de mayo con un 3 % de 36 plantas tuberizadas y para el 18 del mismo mes, el 100 % de la muestra presentó tubérculos en sus raíces. Para el día 16 de mayo, un día antes del segundo sobrevuelo se contó con un 89 % de plantas tuberizadas.

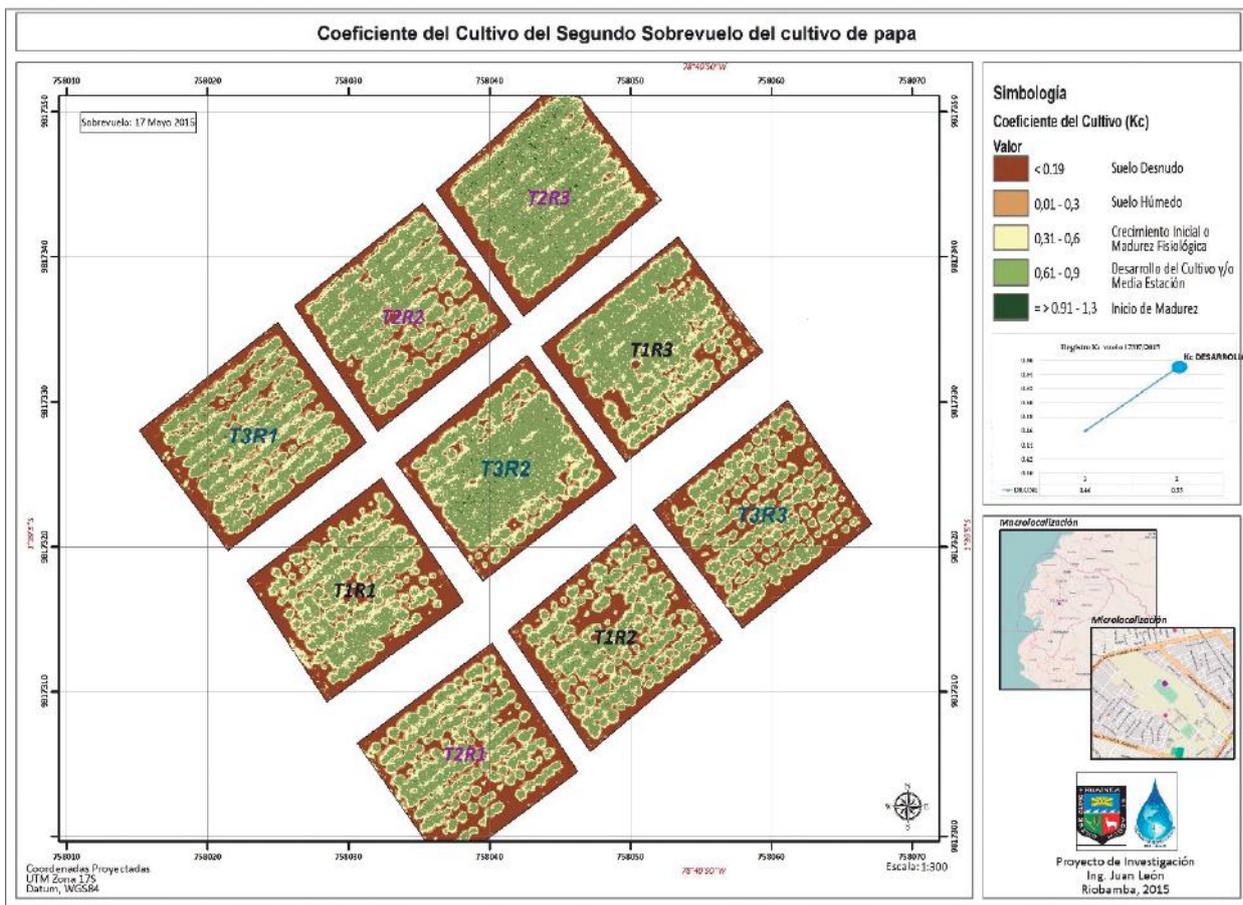


Figura N.º 13. Mapa del coeficiente del cultivo determinado mediante detección remota 17 de mayo de 2015. Fuente: Ing. PAMELA PAULA – ING JUAN LEON RUIZ

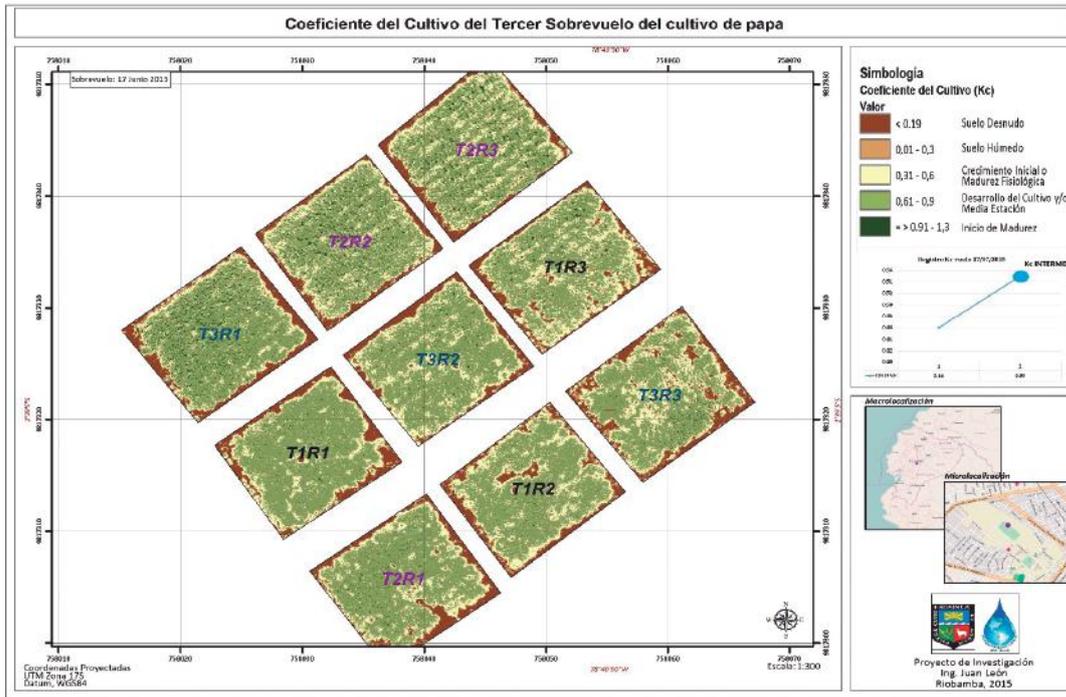


Figura N.º 14: Mapa del coeficiente del cultivo determinado mediante detección remota 17 de junio de 2015.  
Fuente: Ing. Pamela Paula – Ing Juan León Ruiz

La Figura 7 muestra la etapa de mayor actividad fisiológica en el cultivo, lo cual se evidencia con un 97,56% de píxeles de la imagen involucrados en la transpiración del vegetal con valores de Kc que alcanzan 0,55 el mayor registrado en todo el ciclo, valores altos en relación a la

etapa inicial y de desarrollo descritos anteriormente. A los 92 días desde la siembra nuestro cultivo se encuentra en el inicio de la etapa intermedia de desarrollo según Allen, Pereira, Raez, & Smith (2006).

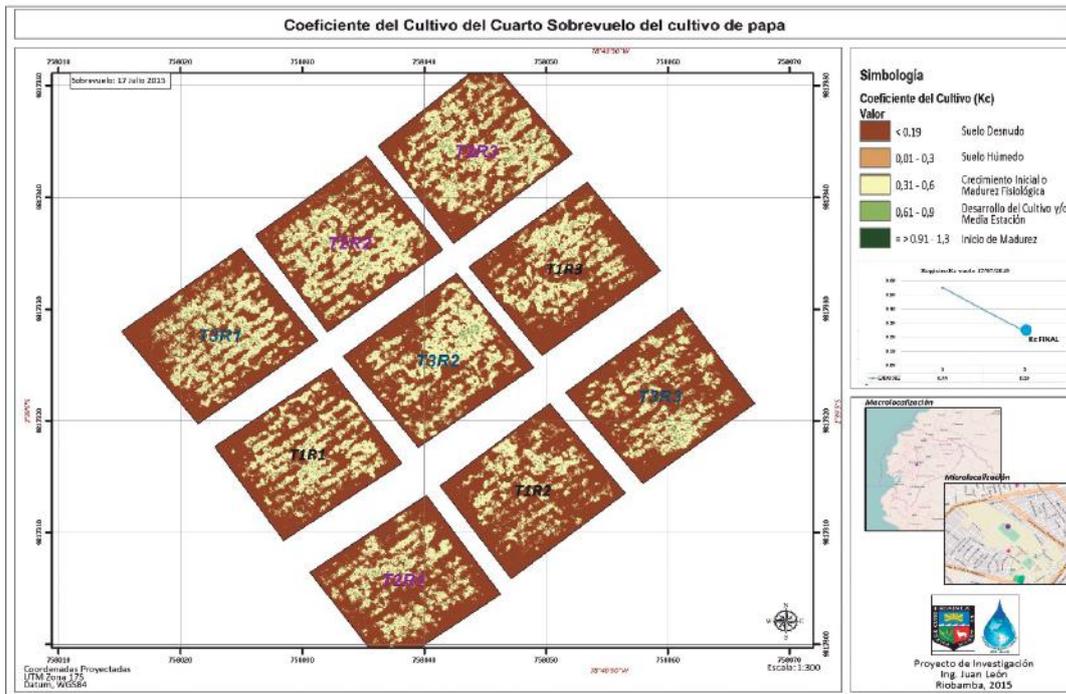


Figura N.º 15: Mapa del coeficiente del cultivo determinado mediante detección remota 17 de julio de 2015.  
Fuente: Ing. PAMELA PAULA – ING JUAN LEON RUIZ

Se muestra en la Figura 8 el mapa de Kc para el último sobrevuelo correspondiente al 17 de julio de 2015, donde la imagen muestra un valor de Kc de 0,24, el más bajo de todo el estudio, esto se debe a que el cultivo se encuentra en la etapa de senescencia o final de su ciclo.

En la Figura 8 observamos la relación porcentual de los píxeles involucrados en cada constituyente del fenómeno evapotranspiratorio en cada sobrevuelo, esta información ha sido obtenida de un análisis de los mapas de Kc empleando ARCGIS.

### Resultado de la recolección de información de la fenología

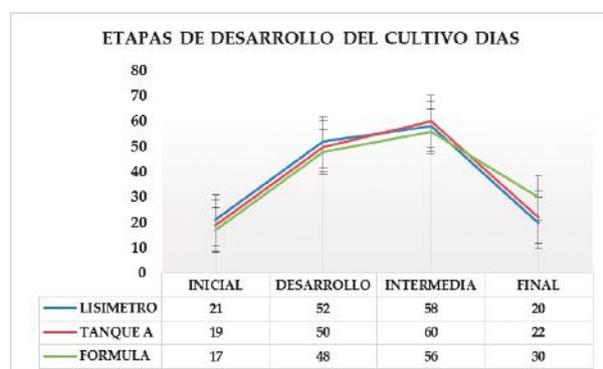


Figura N.º 16: Etapas de desarrollo del cultivo de los tratamientos.

Fuente: Juan Leon Ruiz/Pamela Paula

Como se observa en el gráfico 8, para el 9 de abril el 96% de un universo de 48 plantas había emergido. En cuanto a la floración el 18 de abril se contó con el 1 % de plantas en floración, y para el 16 de mayo toda la muestra presentó floración completa. La tuberización inició el 6 de mayo con un 3 % de 36 plantas tuberizadas y concluyó el 18 del mismo mes con un 100 %, en el gráfico 7 se puede observar el resumen de la evolución temporal de las etapas fenológicas en días identificadas para cada etapa: inicial, desarrollo intermedia y final para cada uno de los tratamientos.

### IX. CONCLUSIONES

Se han determinado que los coeficientes del cultivo mediante los métodos del lisímetro de drenaje, tanque de evaporación tipo A, la fórmula de Penman Monteith, y ortofotos captadas con droné las mismas que tienen una tendencia del desarrollo similares encontrando una relación para el Kc determinado con las ortofotos del droné en relación al lisímetro para las cuatro etapas, obteniendo un factor de ajuste para los valores del droné 2.22, 2.15, 1.91 y 3.5 respectivamente para cada una de las etapas de desarrollo del cultivo desde el estado inicial hasta la maduración.

Se logra identificar la relación entre el Kc y el índice de área foliar estimados con las imágenes capturadas con drones, el desarrollo similar de la curva durante el periodo vegetativo encontrándose una relación de 0.55, 0.61, 0.69 y 0.50 respectivamente para cada etapa.

La metodología denominada “Kc NDVI” propuesta por (Cuesta, Montorro, Jochum, & Calera) que relaciona valores del Índice Normalizado Diferencial de Vegetación (NDVI) y Coeficiente de cultivo (Kc) basándose en la relación lineal existente entre estas variables, junto con los datos de ETo calculados con la ayuda de un tanque evaporímetro para la zona de estudio permite determinar la Evapotranspiración de Cultivo (ETc) a partir de imágenes aéreas en las bandas visible e infrarrojo cercano para el cultivo de papa *Solanum* spp de forma satisfactoria.

Un estudio multitemporal con drones permite dar seguimiento al Kc, parámetro fundamental para determinar los requerimientos hídricos en todo el ciclo del cultivo de siembra a cosecha. El tratamiento de las imágenes permite realizar el análisis a nivel de píxel o conjuntos de píxeles mediante el uso de SIG (Sistemas de Información Geográfica), lo que facilita el análisis de elementos individuales como plantas, suelo, o incluso diferenciar procesos físicos y fisiológicos.

La metodología Kc-NDVI anteriormente presentada permite derivar el coeficiente de cultivo desde las imágenes de satélite y proporciona un mapa de valores de Kc para cada imagen disponible. Los valores del coeficiente de cultivo representados en el mapa son aquellos que corresponden a condiciones ideales de crecimiento de la cubierta vegetal, circunstancia que asumimos se da por el riego en cada uno de los tratamientos, y que permite su comparación con otros valores obtenidos por procedimientos tradicionales. De esta forma, una secuencia de imágenes permite el seguimiento de la evolución temporal del coeficiente de cultivo en sus diferentes fases de desarrollo.

El Kc obtenido con el droné tiene una tendencia similar para las fases fenológicas a los obtenidos mediante métodos de determinación de Kc de esta investigación, con lo que queda validado el método mediante detección remota.

### X. AGRADECIMIENTOS

A la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo – Centro Experimental del riego por dar las facilidades para la ejecución de la investigación. A la Universidad Nacional Agraria La Molina por dar la oportunidad de ser molinero en el Programa del Doctorado en Recursos Hídricos. A la Universidad Nacional Mayor de San Marcos por el apoyo en la publicación de la presente investigación.

### XII. BIBLIOGRAFÍA

1. Aguilera C., M.; Martínez E., R. (1996). Relaciones de agua-suelo-planta-atmósfera. Editorial Universidad Autónoma de Chapingo. México
2. Allen, R., Pereira, R., Raes, D., & Smith, M. (2006). *Evapotranspiración de cultivo*. Roma: Boletín FAO 56.
3. Asrar, G., R. B. Myneni, and B.J.Choudhury. (1992). Spatial heterogeneity in vegetation canopies and remote-sensing of absorbed photosynthetic

- tically active radiation- A modeling study. *Remote Sens Environ* 41:85-103
4. Bastiaanssen, W. P. (1998). *A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). Part 2: Validation. Journal of Hydrology.*
  5. Bastiaanssen, W. G. M., (2000). SEBAL-Based Sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey, *Journal of Hydrology*, 229(1-2), 87-100.
  6. Calera, A., Gonzalez - Piqueras, J. and Melia, J., (2004). Monitoring barley and corn growth from remote sensing data at field scale. *International Journal Of remote Sensing*, 25(1): 97-109
  7. Cuesta, A., Montorro, A., Jochum, A. L., & Calera, A. (2005). Metodología operativa para la obtención del coeficiente de cultivo desde imágenes de satélite. *ITEA*, 213-223.
  8. Íñiguez, M., Ojeda, W., & Rojano, A. (2011). Metodología para la determinación de la evapotranspiración integrada y la capacidad de canales en una zona de riego. *Rev FCA UNCUYO*, 187.
  9. Lopez E., J., L. Tijerina Ch., G. Haro A. y R. Arteaga R. (1991). Calibración de fórmulas de evapotranspiración mediante un cultivo de alfalfa como referencia en el área de Montecillo, Estado de México. *Agrociencia* 2: 55-72.
  10. Melo, P. (2015). *Levantamiento de fotografía e índices de vegetación parcelas ESPOCH Centro Experimental de Riego*. Quito: Dron and GIS.