



VARIABLES BIOFÍSICAS (NDVI, fPAR, IAF, Fc, Kc) OBTENIDAS DEL PROCESAMIENTO DE IMÁGENES MULTI-ESPECTRALES CAPTADAS CON CÁMARA CANON SX260HS PARA EL CULTIVO DE PAPA *Solanum spp.*

Paula Alarcón Pamela¹
León Ruiz Juan²
Paula Alarcón Paulina³

Para citar este artículo puede utilizar el siguiente formato:

Paula Alarcón Pamela, León Ruiz Juan y Paula Alarcón Paulina (2017): "Variables biofísicas (NDVI, fPAR, IAF, Fc, Kc) obtenidas del procesamiento de imágenes multi-espectrales captadas con cámara Canon SX260HS para el cultivo de papa *Solanum spp.*", Revista Caribeña de Ciencias Sociales (junio 2017). En línea: <http://www.eumed.net/rev/caribe/2017/06/cultivo-papa.html>

Resumen

La teledetección con imágenes espectrales es importante para la agricultura ya que su análisis garantiza la eficiencia de los procesos a implementarse. En este contexto las variables biofísicas permiten describir el proceso de los cambios en la cobertura vegetal desde su crecimiento hasta el desarrollo de la vegetación; es así que para el cálculo del índice de vegetación se combinan las bandas espectrales registradas, que realzan la cubierta vegetal en función de su respuesta espectral y atenua los detalles de otros componentes como el suelo, la iluminación, etc. Es por ello, que es pertinente analizar el comportamiento espectral comparando los parámetros biofísicos con los procesos fenológicos del crecimiento del cultivo de papa, desarrollada en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo en el Centro Experimental del riego determinando los requerimientos hídricos y parámetros biofísicos, utilizando el diseño experimental de bloques completos al azar, con tres tratamientos y tres repeticiones, T1 reposición de agua con información de lisímetro de drenaje, T2 reposición de agua con información del tanque evaporímetro, T3 reposición con información de fórmulas empíricas. Como resultados tenemos Kc para cada una de las etapas del cultivo de papa.

Clasificación JEL: Q16 I + D, Q2, Q59

Palabras clave. Espectro, NDVI, fPAR, Kc, IAF, Fc

Summary

Remote sensing with spectral images is important for agriculture because its analysis guarantees the efficiency of the processes to be implemented. In this context the biophysical variables describe changes in vegetation from growth to development; being thus for the calculation of the vegetation index, it combines the registered spectral bands that enhance the vegetation based on the spectral response and it minimizes details of other components such

¹ Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Recursos Naturales, CENSIG Riobamba – Ecuador. ppaula@esPOCH.edu.ec.

² Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Recursos Naturales, Centro Experimental del Riego Riobamba – Ecuador. Correo electrónico. jleon@esPOCH.edu.ec.

³ Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Informática y Electrónica, Diseño Gráfico Riobamba – Ecuador. papaula@esPOCH.edu.ec.

as the soil, the illumination, etc. For this reason, it is pertinent to analyze the spectral behavior comparing the biophysical parameters with the phenological processes of potato crop growth, developed at the Polytechnic School of Chimborazo at the Experimental Irrigation Center, determining the water requirements and biophysical parameters, using the Experimental design of complete blocks at random, with three treatments and three replicates, T1 water replenishment with lysimeter drainage information, T2 water replenishment with tank information evaporimeter, T3 replenishment with information of empirical formulas. As results we have Kc for each of the stages of potato cultivation.

Classification JEL: Q16 I + D, Q2, Q59

Keywords: Spectrum, NDVI, fPAR, Kc, IAF, Fc

1. INTRODUCCIÓN

En Ecuador los estudios de los procesos de la aplicación de variables biofísicas son escasos, para lograr determinar la evapotranspiración, coeficiente del cultivo a través de imágenes multiespectrales, a pesar de que la reflectancia de las plantas muestran el comportamiento para el ciclo hidrológico, ya que la mayor parte del agua se pierde o regresa a la atmósfera. Es urgente el aplicar estas variables en el estudio de estos procesos de evapotranspiración, porque su estimación interviene en el cálculo del requerimiento del agua de los cultivos, en la planificación del riego y en los estudios hidrológicos.

Hoy en día, en el Ecuador, los productores de papa (*Solanum spp.*) siembran anualmente cerca de 49.000 ha, pero las condiciones de producción han contribuido a que el cultivo enfrente muchos problemas que ponen en peligro el bienestar económico de los productores y la seguridad alimentaria del país, siendo no solo las dificultades usuales como plagas y enfermedades, si no cada vez más relacionadas con problemas del déficit hídrico.

La necesidad de desarrollar tecnologías que se adapten a los efectos adversos del cambio climático sobre la producción de este tubérculo; se plantea en la presente investigación, aplicar las variables biofísicas para encontrar rangos que muestren el comportamiento de la planta en las diferentes etapas de crecimiento y que determine las necesidades hídricas en tiempo real del cultivo de la papa (*Solanum spp.*) y que los agricultores de zonas con reducida precipitación, puedan disponer para producir sus alimentos, diversifiquen la producción y además obtengan ingresos por la venta del tubérculo, siendo el caso de las zonas paperas del país donde las épocas definidas de lluvias ya no existen, sino que además sitios considerados como productores de papa no obtienen la rentabilidad deseada, dando lugar a que la calidad de vida de los agricultores disminuya, ocasionando un abandono de las tierras.

En las condiciones ecuatorianas no se ha precisado, hasta el momento, un modelo matemático que se adapte a las regiones paperas del país, que tome en consideración el clima, suelo y cultivo, que sea de fácil aplicación y brinde resultados satisfactorios, sobre la base de aquellos factores más influyentes para las condiciones dadas, aun cuando se utiliza básicamente el método del tanque evaporímetro clase A, por ello se plantea el Determinar los requerimientos hídricos y parámetros biofísicos mediante imágenes multiespectrales captadas con dron para el cultivo de papa *solanum spp* en Riobamba – Ecuador.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

La presente investigación se realizó en los terrenos 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 proyectadas UTM 17S X:758232 Y:9817776, DATUM WGS84. Los suelos de una 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⁻³.

La variedad de papa (*Solanum tuberosum spp.*) Variedad Natividad fue un híbrido experimental, el cual proporcionó el INIAP 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 ciclo del cultivo duro 151 días de siembra a cosecha, se sembró el 17 de marzo se cosecho el 15 de agosto en este período de observación se llevó a cabo las mediciones fenológicas,

fisiológicas en forma semanal, mientras que las mediciones agrometeorológicas fueron diarias en forma secuencial, los sobrevuelos del drone 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 enterrados a una profundidad 0.8 m con una área 0.26 m² y un volumen de 0,208 m³ en los cuales están rellenos con perfil de suelo inalterado el cual fue relleno en capas de cada 20 cm definiendo su densidad aparente valiéndose de un penetrometro, en la base de los lisímetros se encuentran instalados accesorios y tuberías de 50 mm con una válvula de bola colocada al final de la tubería para controlar el agua de drenaje, los lisímetros están enterrados en la zona de cultivo, a un lado de los lisímetros se instaló una estación meteorológica portátil con sensores que miden temperaturas máximas y mínimas, humedad relativa, precipitación y un anemómetro de mide la dirección y velocidad del viento la veleta se moviliza en altura cada 8 días de acuerdo a la dinámica de crecimiento de la planta.

Para el riego se utilizó cinta de riego auto compensada colocada superficialmente una fila por cada hilera de plantas, la reposición de agua al suelo mediante el riego se realizó cuando consumía el 25% del agua útil en el suelo mismo que se midió la tensión de humedad del suelo con tensiómetros colocados en cada parcela a profundidades de 15 – 30 y 45 cm respectivamente.

2.2 Estaciones meteorológicas

Estación meteorológica portátil con sensores para medir la temperatura, humedad, cuenta además con un tanque evaporímetro estándar tipo A de 121 cm de diámetro y 25.5 cm de altura, colocado a una distancia de 100 metros del cultivo. Este tanque está construido de hierro galvanizado y montado a 15 cm del suelo sobre una tarima de madera separada permitiendo la ventilación, es de color blanco de acuerdo a las especificaciones de la FAO.

Estación meteorológica automática ESPOCH - INAMHI, localizada a una altura de 2840 m.s.n.m., en el campus politécnico de la ciudad de Riobamba a 520 metros de distancia del cultivo en estudio. Esta estación cuenta con dos piranómetros SR11-10-Hukseflux, uno de ellos provisto de un anillo de sombra para el registro de radiación difusa, pluviómetro, anemómetro ultrasónico 8500 de marca Vaisalia, barómetro QML 201C de marca Vaisalia, termómetro HMP155 de marca Vaisalia, además de sensores de perfil de temperatura de suelo.

Estación Agro meteorológica Facultad de Recursos Naturales ESPOCH – INAMHI como se observa en la Figura N°1, localizada a una altura de 2840 m.s.n.m., en el campus politécnico de la ciudad de Riobamba a 490 metros de distancia del cultivo en estudio. Esta estación cuenta con un tanque evaporímetro estándar Tipo A que provee continuamente información de evaporación en un intervalo diario de la zona de estudio, además de otros sensores de temperatura, velocidad de viento, pluviosidad, entre otros.

Figura N°1. Ubicación Geográfica de la Estación Agrometeorológica Facultad de Recursos Naturales ESPOCH - INAMHI en relación a las parcelas del estudio instaladas en el campo.



Diseño: Lcda. Paulina Paula A.

2.3 Obtención de imágenes

Para la obtención de las imágenes se utilizó un cuadricóptero de mediana autonomía 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. Las fotografías fueron tomadas por un sensor RGB modificado que se le ha colocado un filtro de manera que no permita la absorción de la banda del rojo y permita por el contrario la parte del Infrarrojo. Para la obtención de la imagen en el espectro visible se tomó una sesión de fotos con una cámara RGB normal.

Termómetro infrarrojo Extech de gran amplitud MODELO 42515, termopar tipo k para mediciones con contacto y sin contacto, emisividad regulable, permite medir superficies orgánicas ajustando una emisividad de 0.96nm. Para medir la clorofila se utilizó un medidor Minolta.

2.4 Pruebas Experimentales

El experimento consistió en la siembra del cultivo de papa variedad Natividad *solanum spp.*, en el campo experimental del Centro Experimental del Riego de la Facultad de Recursos Naturales de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo ubicado en la parroquia Licán del cantón Riobamba, provincia de Chimborazo en Ecuador a una altitud de 2833 msnm, en las coordenadas proyectadas UTM 17S X:758232, Y:9817776, DATUM WGS 84 distribuido en nueve parcelas en las que se trabajó con tres tratamientos y tres repeticiones, con un diseño de bloques completos al azar para el monitoreo aéreo de la ETc durante el ciclo del cultivo. Para la validación del experimento, se determinó la ETc a nivel de suelo calculando la ETo mediante la ecuación FAO Penman Monteith y los coeficientes de cultivo Kc tabulados para papa mediante el método propuesto por la FAO.

Figura N°2. Localización de la zona de estudio



Fuente: Ortofoto 2015
Diseño: Paulina Paula A.

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



Fuente: Juan León Ruiz.

2.5 Obtención de parámetros biofísicos mediante imágenes multispectrales

Los parámetros biofísicos son aquellos que permiten describir el estado y los ritmos de cambio de una cubierta vegetal (Calera et al., 2004). (Calera, A., González-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.) 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). (Gilabert, M.A., González-Piqueras, J., García-Haro, F.J. and Meliá, J., 2002. A generalized soil-adjusted vegetation index. *Remote Sensing of Environment*, 82(2-3): 303-310.)

La responsable de la reflexión especular es la cutícula que cubre las hojas, la cual le confiere el brillo característico de algunas plantas en especies en particular. La luz no reflejada penetra en el interior de la hoja y es sucesivamente refractada, reflejada y difractada; como consecuencia de ello, la radiación emergente tiene un carácter difuso. Esta dispersión depende de la propia estructura de la hoja, de la composición de sus células como la presencia de cristales de almidón; y su grado de humedad.

En el infrarrojo próximo, las hojas con mayor desarrollo del parénquima lagunar producen mayor dispersión. Por esta razón las plantas de hoja ancha suelen ser más reflectantes en esa región espectral que las de hoja estrecha (Ormeño, 1991). De otra parte, la presencia de cloroplastos incrementa la absorción, por lo que necesariamente debe disminuir la reflexión; esta es la razón por la cual las hojas suelen tener mayor reflectancia en el envés que en el haz. La vellosidad de algunos tipos de hojas incrementa también la reflectancia en el visible y el infrarrojo próximo, no alterando sin embargo la del infrarrojo próximo.

Un fenómeno interesante de resaltar es la senescencia de las hojas, es decir el proceso de envejecimiento que conduce a la clorosis (amarilleamiento) y a la marchitez permanente. Durante este proceso, el contenido en clorofilas decrece en favor de los carotenos, que producen colores rojizos y marrones, y de las xantofilas, que producen colores amarillentos. En el infrarrojo próximo la reflectancia solamente varía cuando, como consecuencia de la muerte de la hoja, cambia su estructura interna. Sin embargo, en el infrarrojo medio sí que se registra un incremento de la reflectancia en todo el intervalo espectral, debido a la progresiva pérdida de agua, aunque las bandas de absorción características del agua solamente desaparecen cuando la humedad se hace prácticamente inexistente.

Pero el contenido de agua del material vegetal influye en la reflectancia no sólo de forma directa, afectando la signature espectral mediante las bandas de absorción que le son propias, sino también de forma indirecta, ya que de la humedad depende la turgencia celular y este factor determina la estructura interna de la hoja. En general, en laboratorio se obtienen reflectancia mayores en todo el espectro al disminuir el contenido en agua. En la práctica, tal efecto solamente se hace evidente cuando el estrés hídrico es muy acusado.

Otro factor es el estado nutritivo de las plantas que influye en la reflectancia espectral. La característica principal que puede detectarse en relación con el vigor vegetal es el amarilleamiento o clorosis y numerosos estados carenciales dan como resultado la clorosis. Salvo las plantas leguminosas, el resto del material vegetal es extremadamente sensible a la carencia de nitrógeno soluble en el suelo. Una escasa dotación de este elemento en forma amoniacal produce un típico color amarillo en la planta debido a la disminución del contenido en clorofila. Ello produce un incremento de la reflectancia en el visible, mientras que, como consecuencia de la pérdida de capas celulares, se produce un descenso de la reflectancia en el infrarrojo próximo y medio. Pero las clorosis también pueden estar producidas por la carencia de algún elemento no tan esencial como el nitrógeno. Tal es el caso del hierro, cuya deficiencia da lugar a la denominada clorosis férrica, caracterizada por un amarilleamiento de las hojas que, al igual que antes, causa un incremento de la reflectancia en el visible. Efectos similares producen las plagas y/o enfermedades sobre las plantas, precisamente por lo cual es posible el seguimiento de sus efectos mediante teledetección.

Determinados cultivos de floración muy perceptible durante un período dilatado de tiempo modifican su signatura espectral en estado de floración con respecto a otros períodos vegetativos. Por lo tanto deberá tenerse en cuenta este factor en los períodos afectados, contrastando los registros digitales obtenidos desde satélite con los resultados de la radiometría de campo que, bajo estas circunstancias, se hace especialmente útil.

En este estudio se han seleccionado los siguientes parámetros biofísicos:

2.5.1 Obtención del Kc.

Coeficiente de cultivo (Kc): es definido como el cociente entre la evapotranspiración de cultivo (ETc) y la evapotranspiración de una superficie de referencia (ETo). La semejanza en la evolución temporal del NDVI y el Kc es el que le confiere utilidad y ha sido estudiada en el desarrollo de metodologías operativas para supervisión del riego. En este trabajo se exploraron dos referidas al coeficiente de cultivo basal (Kcb) que considera la evapotranspiración proveniente de las plantas ecuación propuesta por (Jochum 2002) Donde Kc, evapotranspiración del cultivo en condiciones óptimas de desarrollo.

Es decir describe las variaciones en la cantidad de agua que las plantas extraen del suelo a medida que se van desarrollando, desde la siembra hasta la recolección. En los cultivos anuales diferenciando cuatro etapas o fases del cultivo:

Inicial: desde la siembra hasta un 10% de cobertura del suelo aproximadamente.

Desarrollo: desde el 10% de cobertura y durante el crecimiento activo de la planta.

Media: entre floración y fructificación, correspondiente en la mayoría de los casos al 70–80% de cobertura máxima de cada cultivo.

Maduración: desde madurez hasta recolección.

Se realizaron tomas fotográficas multiespectrales del cultivo, generando un mosaico de imágenes, correspondientes a diferentes fases del cultivo (1 mensual), las tomas fueron hechas el 17 de abril, 17 de mayo, 15 de junio y 17 de julio de 2015, a las 10 horas; con la finalidad de captar la reflectancia y aplicando la fórmula obtener el Kc del cultivo.

Con la combinación de las bandas NIR y RED en ARCGIS según la ecuación 3, se obtiene los valores de NDVI, que son la base para obtener o calcular el Kc aplicando la ecuación 1 y 2. Secuencialmente se combinó el Kc con la ETPr según la ecuación 7 y para obtener los valores de ETP.

El Kc fue obtenido mediante la aplicación de la ecuación 8 (Cuesta, Montorro, Jochum, & Calera, 2005, pág. 218):

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

Para la obtención de un valor operativamente aceptable para determinar el Kc en la fase inicial de desarrollo y media del cultivo; y para la fase final se aplicó la ecuación 2 (Cuesta, Montorro, Jochum, & Calera, 2005, pág. 218):

$$K_c = 1,5625 * NDVI - 0,05 \quad (2)$$

Los rangos considerados para este índice son <0,19 como suelo desnudo; 0,01 – 0,3 suelo húmedo; 0,31 – 0,6 crecimiento inicial o madurez fisiológica; 0,61 – 0,9 Desarrollo del cultivo y/o media estación; > = 0,91 – 1,3 Inicio de Madurez y/o Senescencia.

2.5.2 Índice de Vegetación de Diferencias Normalizado (NDVI)

Un índice de vegetación es una combinación de valores de reflectancia en diferentes longitudes de onda, con alta sensibilidad cambios en la vegetación y baja sensibilidad a otra información (atmósfera o suelo). La gran mayoría de los IV están basados en el alto contraste entre la banda del rojo (R) y la del infrarrojo cercano (IRC) para la vegetación viva y verde (Tucker, 1979). (Tucker, C.J., 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. Remote Sensing of Environment, 8(2): 127-150.) Para el análisis temporal de la vegetación, en este trabajo se ha seleccionado el Índice de Vegetación de Diferencias Normalizadas (NDVI por sus siglas en inglés) introducido por Rouse (1974). (Rouse, J.W., Haas, R.W., Shell, J.A., Deering, D.W. and Harlan, J.C., 1974. Monitoring the vernal advancement and retrogradation of natural vegetation. Final Report.) Las limitantes en su uso radican en el efecto distorsionador del suelo y su saturación en valores altos de área foliar

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 (geotagged) de las parcelas, correspondientes a diferentes fases del cultivo (1 mensual), las tomas fueron hechas el 17 de abril, 17 de mayo, 17 de junio y 17 de julio de 2015, a las 10 horas. Se generó un orto foto mosaico de la zona de estudio para cada toma mensual, además de un modelo digital de superficie a partir de los datos de cada toma mensual

Se empleó el Índice Normalizado Diferencial de Vegetación (NDVI), aplicando la combinación de las bandas según ecuación 3:

$$NDVI = \frac{(NIR - Red)}{(NIR + Red)} \quad (3)$$

Dónde NIR y RED son las reflectancias en el Infrarrojo cercano y en la banda del rojo.

Los valores a ser considerados son < 0 que corresponde a suelo sin vegetación; 0.01 – 0.2 Vegetación o plántulas con escaso contenido de agua y baja producción fotosintética es decir contenido de clorofila; 0.21 – 0.4 Vegetación con suficiente contenido de agua y buena producción fotosintética; 0.41 – 0.6 Vegetación Vigorosa; y valores > 0.61 corresponde a la vegetación densa con excelente área foliar.

2.5.3 Fracción de radiación fotosintéticamente absorbida por la cubierta (fAPAR)

Corresponde a la proporción de la radiación incidente en el rango entre 400 y 700 nm (PARI) que es absorbida por las plantas (fAPAR = APAR/PARI, (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. De los estudios revisados se seleccionó la siguiente ecuación ($r^2=0.965$, Asrar et al., 1992):

$$fPAR = NDVI * 1.222 - 0.1914 \quad (4)$$

De acuerdo a esta metodología propuesta los valores obtenidos serán en micrómetros, usando los siguientes valores: < = 0 será Nula; 0,01 – 0,2 Baja; 0,21 – 0,4 Media; 0,41 - 0,87 Alta; lo que significa que se encuentra dentro de los parámetros propuestos ($0,4 \mu m = 400nm$).

2.5.4 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. La ecuación utilizada es ($r^2=0.73$, Johnson et al., 2003):

$$IAF = 5.7 * NDVI - 0.25 \quad (5)$$

Los rangos de valores usados en este índice, son ≤ 0 Nulo; de 0,01 – 1 Bajo; 1,01 – 3 Medio; y valores $\geq 3,01$ Alto; es decir, responde al crecimiento de la planta con su producción fotosintética con las condiciones óptimas de desarrollo para el área foliar.

2.5.5 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 ecuación utilizada es ($r^2=0.96$, González -Piqueras, 2006)

$$F_c = 1,19 * NDVI - 0,16 \quad (6)$$

Los valores a ser usados son ≤ 0 Nulo; 0,01 – 0,3 Bajo; $\geq 0,4$ Alta. Cabe indicar que los valores se asemejan al NDVI (-1 a +1).

2.5.6 Evapotranspiración (ETP)

Para la obtención de la ETP diaria sería se aplicó la ecuación

$$ETP = ETP_r * kc \quad (7)$$

Donde ETP_r corresponde a la ETP del mes, expresada en mm/día correspondiente a la fecha de la toma de los datos, es decir, de cada una de las fechas que fueron tomadas las imágenes multiespectrales.

Los rangos a ser considerados son: < 1 Nula y/o Baja; 1,01 – 2,5 Media; $> 2,51$ Alta.

2.6 Pruebas experimentales para determinar el requerimiento hídrico

Los métodos utilizados para determinar el requerimiento hídrico del cultivo de papa variedad Natividad son:

- *Tratamiento 1:* Reposición de la lámina de riego cuando deje de drenar el Lisímetro.
- *Tratamiento 2:* Reposición de la lámina de riego mediante la utilización del Tanque evaporímetro tipo A, cuando se ha consumido el 25% del agua útil del suelo.
- *Tratamiento 3:* Reposición de la lámina de riego mediante la utilización de Fórmulas empíricas, cuando se ha consumido el 25% del agua útil del suelo.

La distribución de estos tratamientos en la parcela se describe en la figura N° 4.

Figura N°4: Ortofotomosaico de las nueve parcelas estudiadas, las etiquetas hacen referencia al número de tratamiento y a la repetición asignada.



Fuente: Pamela Paula CENSIG Juan León Ruiz CER -ESPOCH
Diseño: Msc. Paulina A. Paula

Desde la siembra (17/03/2015), se recolectó información de la fenología (tuberización, emergencia, floración, profundidad radicular), así como el contenido de clorofila, altura de la planta, número y diámetro de tallos.

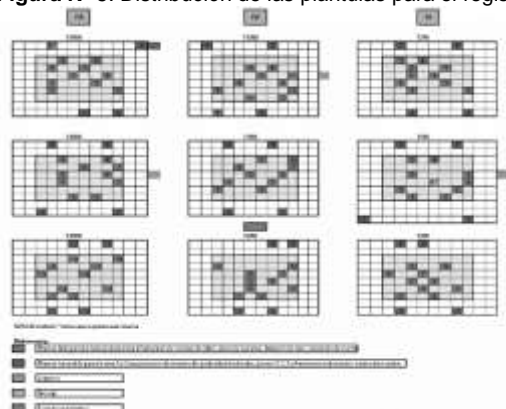
Para la toma de datos se delimitó un área denominada parcela neta que contenía 48 plantas distribuidas como se muestra las áreas sombreadas de la figura N°5.

De cada una de las 9 parcelas netas se seleccionó al azar:

- 10 plantas, de las cuales se evaluó el contenido de clorofila, altura del vegetal, número de tallos y el diámetro de tallos.
- 4 plantas, fuera de las parcelas netas de las cuales se evaluó la profundidad radicular y tuberización.

La emergencia y floración se determinaron de todas las 48 plantas de cada parcela neta.

Figura N° 5: Distribución de las plántulas para el registro de datos, en las parcelas de estudio.



Fuente: Juan León Ruiz.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Comparación de los Valores obtenidos del Índice Diferencial Normalizado de Vegetación

El índice arroja valores de intensidad del verdor de la zona, y da cuenta de la cantidad de vegetación presente en una superficie y su estado de salud o vigor vegetativo. El NDVI es un índice no dimensional, y por lo tanto sus valores van de -1 a $+1$. En la práctica, los valores por debajo de $0,1$ corresponden a los cuerpos de agua y a la tierra desnuda, mientras que los valores más altos son indicadores de la actividad fotosintética del cultivo

Realizando las comparaciones de las parcelas de los tres tratamientos, se observa que el tratamiento que mejor actividad fotosintética presenta correspondiente al vuelo 1, son las parcelas del tratamiento 2, seguido del tratamiento 3 y tratamiento1, según se muestra en la Cuadro 1.

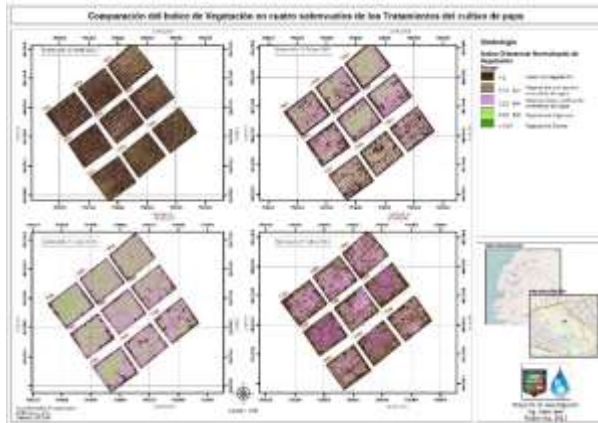
Cuadro N° 1: Valores Promedios del NDVI de las parcelas de cada tratamiento.

NDVI									
Máximo	V 1	V 2	V 3	V 4	Mínimo	V 1	V 2	V 3	V 4
T1	0,86	0,69	0,77	0,65	T1	-0,68	-0,30	-0,60	-0,44
T2	0,94	0,78	0,87	0,69	T2	-0,76	-0,29	-0,75	-0,54
T3	0,92	0,71	0,89	0,69	T3	-0,80	-0,33	-0,67	-0,55

Gráfico N° 1: Valores Promedios Máximos del Índice Diferencial Normalizado de Vegetación de las parcelas de cada tratamiento en los cuatro períodos de sobrevuelo.



Figura N°6: Resultados Obtenidos del NDVI en los cuatro sobrevuelos



De acuerdo al comportamiento fotosintético y fenología de crecimiento del cultivo de papa, asociado al método de irrigación parcelario se demuestra que mejor resultados presenta las parcelas con la reposición de la lámina de riego mediante la utilización del Tanque evaporímetro tipo A, cuando se ha consumido el 25% del agua útil del suelo. Para el vuelo1 existe un desarrollo óptimo de los tubérculos caracterizado especialmente por la acumulación de carbohidratos en forma de almidón, con un incremento constante en el tamaño y peso de los tubérculos gracias a las condiciones óptimas de humedad; es decir existe un buen desarrollo y crecimiento vegetativo.

Los valores registrados para el vuelo dos, se observa que los valores disminuyen, para incrementarse en el vuelo tres y decrecer en el vuelo cuatro; esto responde a que el cultivo para el vuelo dos se encuentra en la fase de floración modificando su signatura espectral con respecto a los otros periodos vegetativos.

Un fenómeno interesante de resaltar es la senescencia de las hojas, es decir el proceso de envejecimiento que conduce a la clorosis (amarilleamiento) y a la marchitez permanente que inicia en el vuelo cuatro como lo muestra los valores en la Cuadro 1. Durante el mencionado proceso, el contenido en clorofilas decrece en favor de los carotenos, que producen colores rojizos y marrones, y de las xantofilas, que producen colores amarillentos. En el infrarrojo próximo la reflectancia solamente varía cuando, como consecuencia de la muerte de la hoja, cambia su estructura interna. Sin embargo, en el infrarrojo medio sí que se registra un incremento de la reflectancia en todo el intervalo espectral, debido a la progresiva pérdida de agua, aunque las bandas de absorción características del agua solamente desaparecen cuando la humedad se hace prácticamente inexistente.

Comparación de los Valores obtenidos de los parámetros biofísicos: (fAPAR), IAF, Fc, Kc y ETP

El comportamiento fenológico del cultivo de papa, es similar en el cálculo de los índices ya que responden a las condiciones biofísicas asociado al método de irrigación.

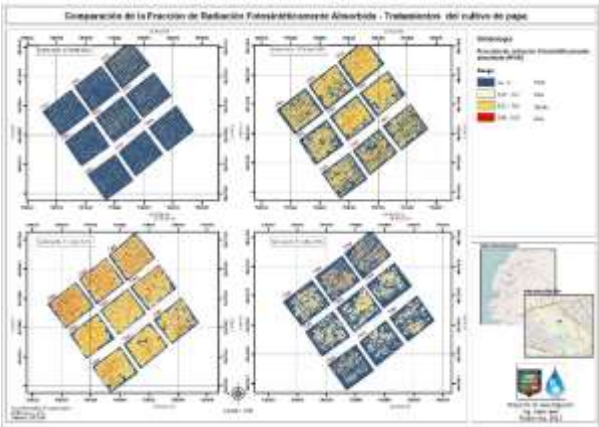
Cuadro N°2: Valores Promedios del fPAR de las parcelas de cada tratamiento

fPAR									
Máximo	V 1	V 2	V 3	V 4	Mínimo	V 1	V 2	V 3	V 4
T1	0,87	0,66	0,76	0,60	T1	-1,03	-0,56	-0,95	-0,73
T2	0,97	0,75	0,87	0,66	T2	-1,12	-0,54	-1,11	-0,85
T3	0,94	0,67	0,89	0,65	T3	-1,19	-0,60	-0,94	-0,86

Gráfico N°2: Valores Promedios Máximos de la fracción de Radiación fotosintéticamente absorbida por la cubierta vegetativa de las parcelas de cada tratamiento en los cuatro períodos de sobrevuelo.



Figura N° 7: Resultados Obtenidos del fPAR en los cuatro sobrevuelos



El tratamiento que mejor responde a la proporción de la radiación incidente absorbida por las plantas, mismo que es consumido en el proceso fotosintético, es el T2 como se observa en los resultados de la Cuadro 2. Esto demuestra que el T2 por el método de irrigación aplicado es el más óptimo para el desarrollo del cultivo.

El índice de área foliar como se muestra en la Cuadro 3, de igual forma el tratamiento dos (T2) presenta una mejor superficie foliar verde por la radiación solar disponible. Es importante mencionar que en el vuelo dos los valores decrecen, ya que el cultivo se encuentra en la etapa de floración, es decir que la presencia de la flor ocasiona que la radiación absorbida disminuya. Para el vuelo cuatro en el tratamiento tres, el valor se incrementa debido a un mejor comportamiento foliar de las hojas del cultivo, es decir que mantiene su verdor por un rebrote del cultivo.

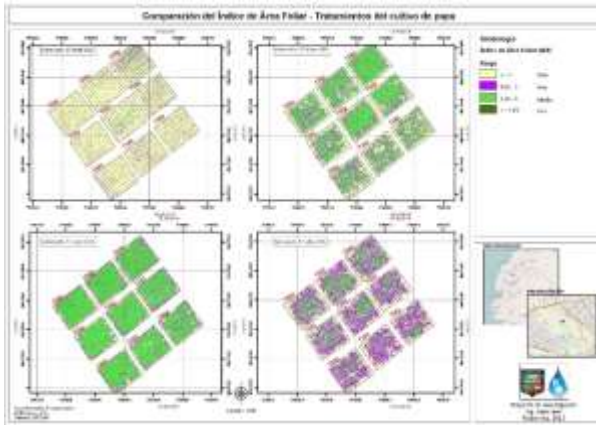
Cuadro N° 3: Valores Promedios del IAF de las parcelas de cada tratamiento

IAF									
Máximo	V 1	V 2	V 3	V 4	Mínimo	V 1	V 2	V 3	V 4
T1	4,68	3,71	4,19	3,48	T1	-4,18	-1,99	-3,08	-2,77
T2	5,16	4,19	4,71	3,70	T2	-4,60	-1,88	-4,51	-3,33
T3	5,19	3,77	4,82	5,31	T3	-3,12	-2,16	-3,75	-4,71

Gráfico N° 3: Valores Promedios Máximos del índice de área foliar vegetativa de las parcelas de cada tratamiento en los cuatro períodos de sobrevuelo.



Figura N° 8: Resultados Obtenidos del IAF en los cuatro sobrevuelos



La fracción de cobertura vegetal verde que corresponde a la fracción ocupada por la cubierta verde de la planta y/o cultivo de papa, de acuerdo a la Cuadro 4, de igual manera el tratamiento 2 presenta los mejores valores.

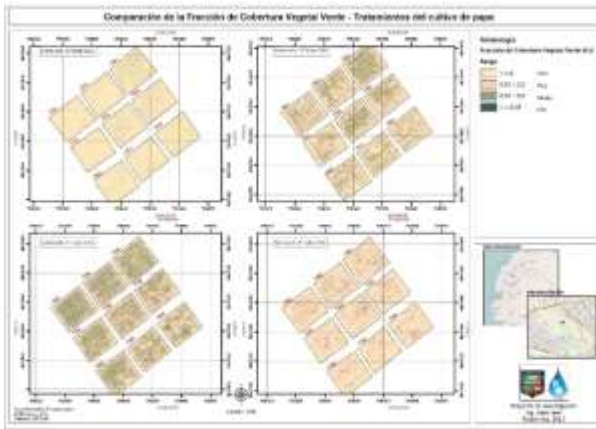
Cuadro N° 4: Valores Promedios del Fc de las parcelas de cada tratamiento

Fc									
Máximo	V 1	V 2	V 3	V 4	Mínimo	V 1	V 2	V 3	V 4
T1	0,86	0,67	0,77	0,62	T1	-0,98	-0,52	-0,9	-0,69
T2	0,97	0,77	0,88	0,67	T2	-1,07	-0,50	-1,05	-0,80
T3	0,94	0,68	0,90	0,66	T3	-1,13	-0,56	-0,89	-0,81

Gráfico N° 4: Valores Promedios Máximos de la fracción de cobertura vegetal de las parcelas de cada tratamiento en los cuatro periodos de sobrevuelo.



Figura N° 9: Resultados Obtenidos del Fc en los cuatro sobrevuelos



El coeficiente del cultivo, aplicando la fórmula respectiva se observa (ver Cuadro 5) que el tratamiento dos es el que presenta valores más altos; esto responde a que las plantas en este tratamiento, por el método de irrigación, no presentan estrés hídrico por tanto existe un óptimo desarrollo de la planta con buen contenido de agua, buena producción fotosintética y buen contenido de clorofila; por ello se incrementa la evapotranspiración de la planta.

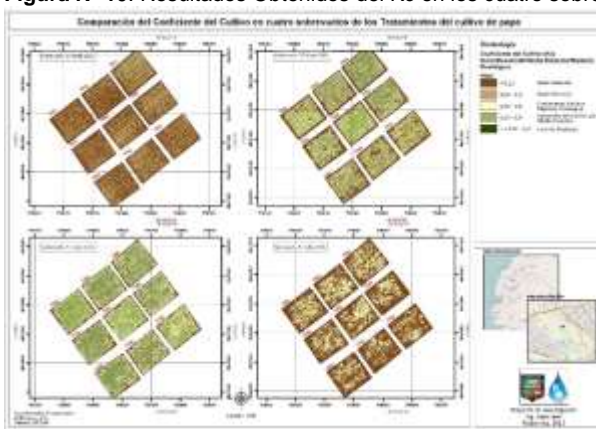
Cuadro N° 5: Valores Promedios del Kc de las parcelas de cada tratamiento

Kc									
Máximo	V1	V2	V3	V4	Mínimo	V1	V2	V3	V4
T1	1,28	1,07	1,17	0,97	T1	-0,66	-0,18	-0,58	-0,74
T2	1,38	1,17	1,28	1,03	T2	-0,75	-0,16	-0,74	-0,89
T3	1,36	1,08	1,31	1,02	T3	-0,80	-0,22	-0,57	-0,91

Gráfico N° 5: Valores Promedios Máximos del coeficiente del cultivo de las parcelas de cada tratamiento en los cuatro períodos de sobrevuelo.



Figura N° 10: Resultados Obtenidos del Kc en los cuatro sobrevuelos



De acuerdo a la Cuadro 6, se observa que el tratamiento dos presenta mayor evapotranspiración de las parcelas del cultivo de papa, gracias al aporte de energía, proporcionado fundamentalmente por la radiación solar y, en menor grado, por el aire que circunda la superficie evaporante. En el momento de la siembra, casi el 100% de la ETP

ocurre en forma de evaporación como se observa en la Cuadro 6, mientras que cuando la cobertura vegetal es completa como se evidencia en el vuelo cuatro, más del 90% de la ET ocurre como transpiración del cultivo, permitiendo un intercambio gaseoso con la atmósfera, ingresando dióxido de carbono y liberando vapor de agua a través de los estomas.

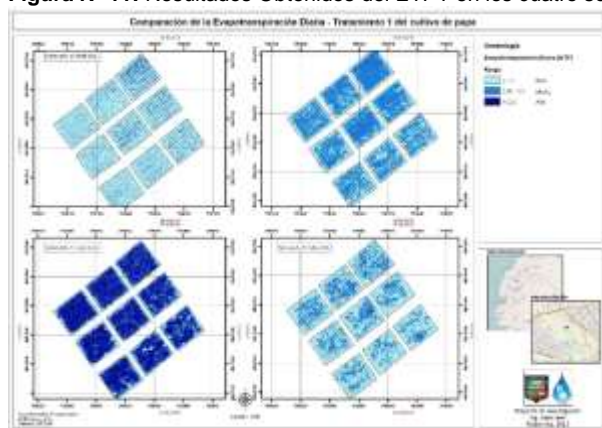
Cuadro Nº 6: Valores Promedios del ETP de las parcelas de cada tratamiento

ETP									
Máximo	V 1	V 2	V 3	V 4	Mínimo	V 1	V 2	V 3	V 4
T1	4,89	3,17	4,82	4,03	T1	-2,53	-0,54	-2,38	-3,07
T2	5,29	3,48	5,29	4,28	T2	-2,88	-0,5	-3	-3,7
T3	5,18	3,21	5,38	4,25	T3	-3,12	-0,6	-2,3	-3,8

Gráfico Nº 6: Valores Promedios Máximos de la evapotranspiración de las parcelas de cada tratamiento en los cuatro períodos de sobrevuelo.



Figura Nº 11: Resultados Obtenidos del ETPT en los cuatro sobrevuelos



4. CONCLUSIONES

La metodología denominada “Kc NDVI” propuesta por (Cuesta, Montorro, Jochum, & Calera, 2005, pág. 218) 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 evaporímetros 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. Los datos obtenidos por este método son muy cercanos a los obtenidos mediante métodos de determinación de Evapotranspiración en suelo como el de Penman Montheit para calcular ETo y datos tabulados de coeficiente de cultivo (Kc), con lo que queda validado el método mediante detección remota.

Un estudio multitemporal permite dar seguimiento a la ETc (evapotranspiración de cultivo), parámetro fundamental para determinar los requerimientos hídricos en todo el ciclo de vida del vegetal de una manera práctica sin restricciones de frecuencias orbitales o nubosidad a diferencia de los satélites. 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, etc., o incluso diferenciar procesos físicos y fisiológicos como la evaporación del suelo y transpiración vegetal.

El mapa de ET_c 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 (método en suelo) y valores de referencia encontrados en la literatura. Además existe concordancia entre los valores de ET_c presentados por teledetección y los ciclos de desarrollo y procesos biológicos del vegetal.

La aplicabilidad de parámetros biofísicos gracias a imágenes multispectrales captadas por aviones no tripulados, permiten obtener valores de forma inmediata para el monitoreo oportuno de un cultivo; permitiendo tomar decisiones acertadas al óptimo desarrollo del cultivo, garantizando así su extremada producción.

Los mejores valores obtenidos para el NDVI en los sobrevuelos, corresponde al Tratamiento Tres ya que obtiene valores máximos: 0,92; 0,71; 0,89; 0,69 respectivamente.

En lo que respecta al fPAR, el tratamiento dos es el que presenta mayores valores altos, así sus valores máximos son: 0,97; 0,76; 0,87; 0,65 respectivamente de cada vuelo.

El tratamiento que presenta mejor IAF corresponde al tratamiento dos, porque su valores máximos alcanzan: 5,16; 4,19; 4,71; 3,67 en cada sobrevuelo.

El índice biofísico F_c, obtiene valores altos en el tratamiento dos alcanzando 0,97; 0,77; 0,88; 0,66 respectivamente a cada sobrevuelo; y el que menor valor obtiene corresponde al tratamiento uno. De igual manera ocurre en el cálculo del K_c, obtiene valores máximos de 1,39; 1,17; 1,29; 1,03.

De acuerdo a los valores calculados para la ETPT, el tratamiento dos es el que presenta mayor evapotranspiración obteniendo valores 5,29; 3,48; 5,29; 4,28 respectivamente en cada sobrevuelo.

Como conclusión el que mejores condiciones de desarrollo fenológico del cultivo de papa corresponde al tratamiento dos con la reposición de la lámina de riego con la utilización del Tanque evaporímetro tipo A, cuando se ha consumido el 25% del agua útil del suelo.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Aalsmeer, E. E. (2003). *Cultivo moderno de la rosa bajo invernadero*. Bogotá: Ediciones de Hortitecnica Ltda.
- Allen, R., Pereira, R., Raetz, D., & Smith, M. (2006). *Evapotranspiración de cultivo*. Roma: Boletín FAO 56.
- Bastiaanssen, W. P. (1998). *A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). Part 2: Validation. Journal of Hydrology*.
- Bermejillo, A. (1998). ESTIMACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL REGIONAL A PARTIR DE DATOS SATELITALES. *Tesis para optar al grado de MAGISTER SCIENTIAE EN RIEGO Y DRENAJE*. Mendoza, Argentina: Universidad Nacional de Cuyo.
- Blackburn, G. (2006). Hyperspectral remote sensing of plant pigments. *Journal of experimental botany*, 856.
- Brown, P. (2000). *Basics of evaporation and evapotranspiration*. Arizona.: The University of Arizona – College of Agriculture.
- Chuvieco, E. (1998). El factor temporal en teledetección: evolución fenomenológica y análisis de cambios. *Revista de Teledetección*, 1.
- 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.
- Ekanayake, I. (1994). *CIP Research 30, studying drought stress and irrigation requirements of potatoes*. Lima: CIP.
- Esmeral, Y. y. (2011). *ANÁLISIS DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL EN EL CULTIVO DE ROSA*. Bogotá: UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA.
- Gonzales, J. (2007). Evapotranspiración de la Cubierta Vegetal Mediante la Determinación del Coeficiente de Cultivo por Teledetección. *Evapotranspiración de la Cubierta Vegetal Mediante la Determinación del Coeficiente de Cultivo por Teledetección*. Valencia, España: Universitat de Valencia.
- Hidalgo, D. (2008). *Diseño, evaluación e instalación de un sistema de riego*. Lima.

- 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.
- Irmak, S., & Haman, D. (06 de 2003). *University of Florida IFAS extension*. Recuperado el 24 de 05 de 2015, de Evapotranspiration: Potential or Reference?: <http://edis.ifas.ufl.edu/pdf/FILES/AE/AE25600.pdf>
- Jensen, M., Burman, R., & Allen, R. (1990). *Evapotranspiration an irrigation water requirements. Manuals and reports on engineering practice No. 70*. New York.: American Society of Civil Engineers – ASCE. .
- León, J. &. (2014). *MODELACIÓN MATEMÁTICA PARA ESTIMAR LOS REQUERIMIENTOS HÍDRICOS DEL CULTIVO DE PAPA (Solanum spp.) EN RIOBAMBA - ECUADOR*. Lima, Perú: Universidad Agraria La Molina.
- Melo, P. (2015). *Levantamiento de fotografía e Índices de Vegetación Parcelas ESPOCH Centro Experimental de Riego*. Quito: Dron and GIS.
- Meneses, C. T. (2011). El índice normalizado diferencial de la vegetación como indicador de la degradación del bosque. *Unasylva*, 40.
- Monsalve, G. (1995). *Hidrología en la Ingeniería*. Bogotá: Departamento de Publicaciones Escuela Colombiana de Hidrología.
- Pereira A., P. W. (2004). *Adaptation of the Thornthwaite scheme for estimating daily reference evapotranspiration*. Elsevier.
- Poveda, I. M. (2010). *Curso de especialista en SIG*. La Mancha: Universidad de Castilla La Mancha.
- Salisbury, R. (1992). *Fisiología de las plantas 1. Células: agua, soluciones y superficies*. Andalucía: Paraninfo & Thomson-Learning.
- Szejba, D. (2011). *Evapotranspiration of Grasslands and Pastures in North-Eastern Part of Poland*. Warsaw: Warsaw University of Life Sciences – SGGW.
- Taylor, S. (1972). *Physical edaphology*. W.H.Freeman and Co: San Francisco.