

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA
ESCUELA DE POSGRADO
DOCTORADO EN RECURSOS HÍDRICOS**



**“MODELACIÓN MATEMÁTICA PARA ESTIMAR LOS
REQUERIMIENTOS HÍDRICOS DEL CULTIVO DE PAPA
(*Solanum spp.*) EN RIOBAMBA – ECUADOR”**

Presentada por:

JUAN EDUARDO LEÓN RUÍZ

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE *DOCTORIS PHILOSOPHIE*
EN RECURSOS HIDRICOS**

**Lima - Perú
2016**

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

**ESCUELA DE POSGRADO
DOCTORADO EN RECURSOS HÍDRICOS**

**“MODELACIÓN MATEMÁTICA PARA ESTIMAR LOS
REQUERIMIENTOS HÍDRICOS DEL CULTIVO DE PAPA
(*Solanum spp.*) EN RIOBAMBA – ECUADOR”**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE
Doctoris Philosophiae (Ph. D.)**

**Presentada por:
JUAN EDUARDO LEÓN RUÍZ**

Sustentada y aprobada ante el siguiente jurado:

Ph.D. Absalon Vázquez Villanueva
PRESIDENTE

Dr. Nestor Montalvo Arquíñigo
PATROCINADOR

Dr. Abel Mejía Marcacuzco
MIEMBRO

Ph.D. Eduardo Chávarri Velarde
MIEMBRO

Dr. Napoleón Puño Lecarnaqué
MIEMBRO EXTERNO

DEDICATORIA

A mis padres por enseñarme a vivir con principios y valores como ejemplo de superación.

A mi esposa e hijos por la comprensión, paciencia, sacrificio por mis ausencias gracias por apoyo constante e incondicional a mis proyectos, gracias por estar siempre ahí

A mis hermano/as por ser parte importante de mi vida.

AGRADECIMIENTO

A la UNALM – PDRH por permitirme realizar mis estudios de Doctorado en esta magnífica institución y darme la oportunidad de ser MOLINERO del que me siento muy orgulloso.

A la ESPOCH por permitirme ser docente en la FRN y apoyar el proyecto de la creación del Primer Centro Experimental del Riego en el Ecuador.

Al INIAP por la confianza y apoyo en la ejecución de las investigaciones conjuntas.

A la Subsecretaria de Riego del MAGAP por el aporte en la implementación del CER.

Al Dr Nestor Montalvo Arquíñigo por brindarme todo apoyo y asesoría como director de tesis parte fundamental desde la implementación hasta la culminación de la investigación.

Al Dr Abel Mejía Marcacuzco por brindarme su amistad y asesoría en el trayecto de mis estudios, la investigación del proyecto de tesis como miembro del jurado.

Al Ph.D. Eduardo Chavarri Valverde por la asesoría en la ejecución de la investigación como miembro del jurado.

Al Mg. Fernando Paz docente de la UNALM por brindarme su amistad y apoyo en la complementación de mi investigación.

A Nylda Paco por su amistad y apoyo recibido durante mis estudios en Lima.

A todos mis compañeros y amigos con los que he tenido el placer de compartir la sala de doctorados, y con los que he pasado tantos buenos momentos en nuestro gran reto, Cristhian Vega, Herber Nuñez, Roxana Aparicio, David Asencios, Duglas Zarango, Javier Goicochea, espero seguir manteniendo su amistad.

A los cachimbos Molineros Robinson, Roberto, Aparicio, Marlon y Myledi.

A la Mg Pamela Paula Directora del CENSIG - ESPOCH, por su apoyo incondicional en la ejecución de la investigación.

Al personal técnico y de campo del Centro Experimental del Riego, Jorge Segovia, Jorge Cevallos, Juan León Jr, Juan Gaibor, David Vaca, Roberth Jimenez, Daniel Ortiz.

A mis compañeros docentes y amigos de la Facultad de Recursos Naturales de la ESPOCH que de una u otra manera apoyaron mi proyecto del Doctorado.

RESUMEN

En el presente trabajo se propone determinar el requerimiento hídrico del cultivo de papa *solanum spp*, a partir de la modelación matemática, que tiene en cuenta la influencia hídrica en los parámetros biométricos, utilizando métodos de imágenes captadas con dron, lisímetros de drenaje y métodos indirectos para el cultivo de papa en Riobamba – Ecuador. Para lograr los objetivos de la investigación se ejecutó el experimento en los predios del Centro Experimental del riego de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo del cantón Riobamba, Provincia de Chimborazo. Se utilizó 3 estaciones agro meteorológicas digitales y 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, con un análisis de varianza a un nivel de confianza del 95%. Se logró la comparación del cálculo de la evapotranspiración acumulada para cada día, por los métodos indicados. Los sobrevuelos del dron realizados fueron 4, tomados cada 30 días después de la siembra. Se logra definir mapas de Kc obtenidos mediante la percepción remota 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. Así mismo se encontró la relación que existe entre los valores de Kc presentados por la teledetección y las fases de desarrollo y procesos fisiológicos de la planta. Del estudio se concluye, que con la utilización de los drones y lisímetros de drenaje se han generado: tres expresiones matemáticas que se consideran aptos para su utilización en estimar los requerimientos hídricos de papa y de acuerdo a la información disponible, se seleccionará la expresión más conveniente a utilizar, decisión en función al objetivo planteado y con a un ajuste respectivo.

Palabras Clave: <COEFICIENTE DEL CULTIVO><PAPA>< INDICE NORMALIZADO DE VEGETACION>DRONE Y LISIMETROS.

SUMARY

The present researching task is focused to determine the water requirement of the potato crop from mathematical modeling that considers the influence on the biometric parameters using images captured by drone, lysimeters drainage and indirect methods for *Solanum* spp. in Riobamba-Ecuador. To achieve the objectives it was carried out on the Experimental Center of Irrigation (Centro Experimental de Riego) at Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Chimborazo province. For the study 3 full digital weather stations and 3 drainage lysimeters were used, and for determining the moisture content in the soil sphygmomanometers located in the root zone from 15, 30 and 45 cm depth were used .

The implementation of the research was done by applying a complete randomized block desing with three treatments (T1= application of irrigation depth measured by lysimeter,T2 = application of irrigation depth measure with type A tank, T3= application of the irrigation depth calculated by formula) and three repetitions, ending with an analysis of variance 5 %. Using the methods shown,the comparison of calculating the evapotranspiration accumulated for each day was achieved

Overflights were performed with a repeat every 30 days after planting; making it a total of four sessions photo shots according tho the phases of the crop. It was possible to define Kc maps obtained by remote detection that show a useful description of the evapotranspiraton process during studied months, with a similarity between the characteristic curves for validation with the direct method of lysimeters and reference values found in the literatura. There is also an agreement between the values of Kc presented by remote sensing,stages of development and physiological processes of the plant

It is concluded from the study three mathematical expressions suitable for their usage, and according to the available information, the more convenient one for use will be selected, decisions that depends upon the planned objective after and adjustment.

Keywords : < CROP COEFFICIENT > < POTATO > < NDVI > DRONE AND LYSIMETERS.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTO

RESUMEN SUMMARY

ORGANIZACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	5
1.1.1 Objetivo general	5
1.1.2 Objetivos específicos.....	5
1.2 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	5
II. REVISIÓN DE LITERATURA	8
2.1 IMPORTANCIA DEL AGUA.....	8
2.1.1 Agua en el suelo	9
2.2 EVAPOTRANSPIRACIÓN (Et).....	11
2.2.1 Evaporación.....	12
2.2.2 Transpiración.....	13
2.2.3 Factores que intervienen en la evapotranspiración.	14
2.2.4 Evapotranspiración potencial ETo	15
2.2.5 Evapotranspiración del cultivo Etc	16
2.2.6 Coeficiente de cultivo (Kc)	17
2.2.7 Factores que determinan el coeficiente del cultivo	18
2.2.8 Etapas del crecimiento del cultivo	18
2.2.9 Métodos para estimar la evapotranspiración.....	21
2.2.10 Estimación de las necesidades de agua de los cultivos.	25
2.3 RIEGO POR GOTEO.....	25
2.4 SENSORES REMOTOS.....	26
2.4.1 Espectro electromagnético	27
2.4.2 Respuesta espectral reflectiva de elementos naturales	28
2.4.3 Reflectividad de la vegetación	30
2.5 APLICACIÓN DE DRONES EN AGRICULTURA.	32
2.5.1 Aplicaciones de los Drones	33
2.5.2 Sensores remotos y drones	33
2.5.3 Aplicaciones de interés en las áreas de riego y drenaje	34
2.6 INDICES DE VEGETACIÓN Y PERCEPCION REMOTA	35

2.6.1 Índices de vegetación	35
2.6.2 Aplicaciones índices de vegetación.....	35
2.7 MODELO PARA REQUERIMIENTOS HÍDRICOS.....	36
2.7.1 Modelos y su utilización	37
2.7.2 Función de los modelos.....	38
2.7.3 Fases de construcción de un modelo	38
2.7.4 Generación de los Índices de Vegetación	39
III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	44
3.1 MATERIALES	44
3.1.1 Zona de estudio.	44
3.1.2 Características de la zona de estudio.....	45
3.1.3 . Información técnica de base.	45
3.1.4 Materiales de campo y gabinete.	46
3.2 METODOLOGÍA.....	47
3.2.1 Fase pre campo.....	47
3.2.2 Fase de campo (1)	49
3.2.3 Fase de campo (2).	61
3.2.4 Información geoespacial obtenida con Drones.	64
3.2.5 Fase de gabinete	73
3.2.6 Consolidación y procesamiento de datos:	73
3.2.7 Generación del modelo de Kc.	75
3.2.8 Generacion de las expresiones matematicas	90
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	91
4.1 RESULTADOS PARAMETROS BIOMÉTRICOS.	92
4.1.1 Altura de planta	92
4.1.2 Diámetro del tallo.....	94
4.1.3 Numero de tallos	96
4.1.4 Crecimiento radicular.....	98
4.1.5 Contenido de clorofila.....	100
4.1.6 Etapas de desarrollo del cultivo	103
4.2 RESULTADOS DEL Kc ESTIMADO MEDIANTE DRONES.	105
4.2.1 Índices de vegetación. NDVI	105
4.2.2 Índices de área foliar IAF.....	111
4.2.3 Coeficiente del cultivo Kc.....	127

4.3 EVALUACIONES DE RENDIMIENTO Y VOLUMEN DE AGUA UTILIZADA	134
4.3.1 Rendimiento	134
4.3.2 Relacion de agua utilizada y la producción.....	142
4.4 GENERACION AJUSTE Y CALIBRACIÓN DE LA EXPRESIÓN MATEMÁTICA	148
4.4.1 Ajustes y calibración índice de vegetación diferencial normalizado NDVI	148
4.4.2 Ajustes y calibración índice de área foliar IAF.....	149
4.4.3 Ajustes y calibración Fracción de radiación Fotosintéticamente Activa fPAR.	150
4.4.4 Ajustes y calibración coeficiente del cultivo Kc.....	151
4.4.5 Ecuaciones obtenidas del modelo.	151
V. CONCLUSIONES.....	156
VI. RECOMENDACIONES	158
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	159
VIII. ANEXOS	170

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro N° 2.1: Coeficientes del tanque evaporímetro (Kp) para el tanque Clase A	16
Cuadro N° 3.1: Contenido de nutrientes según el análisis de suelo.	46
Cuadro N° 3.2: Característica del campo experimental	48
Cuadro N° 3.3. Análisis de varianza (ANOVA)	48
Cuadro N° 3.4: Tamaño de los lisímetros. (Cultivo papa primera campaña).....	49
Cuadro N° 3.5: Aporte de agua por lisímetro.....	56
Cuadro N° 3.6: Láminas de riego aplicadas	73
Cuadro N° 3.7: Puntos de control.....	77
Cuadro N° 3.8: Precisión de localización.....	83
Cuadro N° 4.1: ANOVA y rango de altura de planta en cm	92
Cuadro N° 4.2: ANOVA y rango de diámetro del tallo en mm	94
Cuadro N° 4.3: ANOVA y rango de número de tallos.....	96
Cuadro N° 4.4: ANOVA y rango de crecimiento radicular	98
Cuadro N° 4.5: ANOVA y rango de contenido de clorofila en spad	101
Cuadro N° 4.6: ANOVA número de tubérculos por categoría.....	135
Cuadro N° 4.7: ANOVA producción por categoría por parcela.	137
Cuadro N° 4.8: ANOVA para rendimiento total kg/ha por categoria	138
Cuadro N° 4.9: ANOVA para rendimiento total ton /ha	140
Cuadro N° 4.10: Contenido de agua en la planta	145
Cuadro N° 4.11: Agua utilizada lt/kg de rendimiento.....	147
Cuadro N° 4.12: formulas determinadas por el modelo	153
Cuadro N° 4.13: Modelos encontrados en la literatura comparados con las propuestas en el estudio.....	154

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N° 2.1: Proceso de evapotranspiración	11
Figura N° 2.2: Curva del coeficiente de cultivo Kc	18
Figura N° 2.3 Componentes del Sistema de Teledetección	27
Figura N° 2.4 Espectro Electromagnético.	27
Figura N° 2.5 Firmas Espectrales de Diferentes Coberturas	29
Figura N° 3.1: Ubicación Geográfica del ensayo.....	44
Figura N° 3.2: Generacion de la expresión matematica.	47
Figura N° 3.3: Construcción de lisímetros A, B y C	49
Figura N° 3.4: Instalación de drenaje en lisímetro	50
Figura N° 3.5: Marcación ubicación para la implementación de los lisímetros.....	51
Figura N° 3.6: Determinación de compactación por capas.	52
Figura N° 3.7: Instalación de los lisímetros en el suelo	52
Figura N° 3.8: Nivelación de los lisímetros	52
Figura N° 3.9: Colocación de la malla filtro al fondo de cada lisímetro.....	53
Figura N° 3.10: Colocación de material pétreo en la base de los lisímetros	53
Figura N° 3.11: Compactación material pétreo lisímetro.....	54
Figura N° 3.12: Pruebas de drenaje.....	54
Figura N° 3.13: compactación dentro del lisímetro.....	54
Figura N° 3.14: Confinamiento de lisímetros.....	55
Figura N° 3.15: Instalación del riego a goteo.....	55
Cuadro N° 3.5: Aporte de agua por lisímetro.....	56
Figura N° 3.16: Puesta en Capacidad de Campo (CC) del suelo del lisímetro	57
Figura N° 3.17: Siembra en el lisímetro	58
Figura N° 3.18: Drenaje de lisímetros.....	58
Figura N° 3.19: Toma de volumen de drenaje de lisímetros.	59
Figura N° 3.20: Recipientes para dotar de sobre riego a los lisímetros	59
Figura N° 3.21:Data de estación meteorológica.....	60
Figura N° 3.22: Instalación de tensiómetros en lisímetros.....	60
Figura N° 3.23: Muestreo de suelo para determinar contenido de humedad.	60
Figura N° 3.24: Pruebas de infiltración en lote de estudio.....	61
Figura N° 3.25: Características del campo experimental.	61
Figura N° 3.26: Disposición del ensayo en el campo foto DRONE	62
Figura N° 3.27: Disposición del ensayo en el campo	63

Figura N° 3.28: Siembra en el lisimetro.....	64
Figura N° 3.29.Toma de información de porcentaje de emergencia.....	65
Figura N° 3.30. Toma de información de altura de planta	66
Figura N° 3.31. Toma de información de diámetro del tallo.....	66
Figura N° 3.32. Toma de información de número de tallos	67
Figura N° 3.33. Toma de información de tuberización	67
Figura N° 3.34. Toma de información de días a la floración	68
Figura N° 3.35. Toma de información de días a la senescencia.....	68
Figura N° 3.36. Toma de información de contenido de clorofila.....	69
Figura N° 3.37. Toma de información de profundidad radicular	69
Figura N° 3.38. Sobrevuelo del DRONE	75
Figura N° 3.39: Toma de información don temometro inflarrojo	76
Figura N° 3.40: Puntos de Control captadas con DRONE.....	76
Figura N° 3.41: Puntos de control captadas con DRONE.....	77
Figura N° 3.42: Puntos de control en campo captadas con DRONE	77
Figura N° 3.43: Plan de vuelo	78
Figura N° 3.44: Patron de vuelo y set georreferenciado	80
Figura N° 3.45: Nube de puntos de amarre	81
Figura N° 3.46: Nube de puntos densificada y filtrada captadas con DRONE.....	81
Figura N° 3.47: Modelo Digital de Superficie (DSM) del Área de Interés	82
Figura N° 3.48. Numero de imágenes con superposición entre ellas	83
Figura N° 3.49: Ortofotomosaico del área de interés (AOI) captadas con DRONE.....	84
Figura N° 3.50: Mapa SAVI.....	86
Figura N° 3.51: Mapa NDVI.....	86
Figura N° 3.52: Mapa EVI	87
Figura N° 4.1: Altura de planta en cm.....	92
Figura N° 4.2: Diámetro del tallo en mm.....	94
Figura N° 4.3: Mapa de diámetros del tallos.....	95
Figura N° 4.4: Numero de tallos	96
Figura N° 4.5: Mapa de número de tallos	97
Figura N° 4.6: Crecimiento Radicular cm.....	98
Figura N° 4.7: Mapa profundidad radicular	100
Figura N° 4.8: Contenido de clorofila	100
Figura N° 4.9: Mapa del contenido de clorofila	102
Figura N° 4.10: Etapas de desarrollo del cultivo de los tratamientos	103

Figura N° 4.11: Índice de Vegetación Diferencial Normalizado. NDVI	105
Figura N° 4.12: Índice de Vegetación Diferencial Normalizado. NDVI	106
Figura N° 4.13: Índice de Vegetación Diferencial Normalizado. NDVI	107
Figura N° 4.14: Índice de vegetación diferencial normalizado	108
Figura N° 4.15: Mapa del índice de vegetación primer sobrevuelo	109
Figura N° 4.16: Mapa del índice de vegetación segundo sobrevuelo.	109
Figura N° 4.17: Mapa del índice de vegetación tercer sobrevuelo.	110
Figura N° 4.18: Mapa del índice de vegetación cuarto sobrevuelo.	110
Figura N° 4.19: Índice de área foliar IAF lisímetro	111
Figura N° 4.20: Índice de área foliar IAF tanque evaporación tipo A	111
Figura N° 4.21: Índice de área foliar IAF formula.....	112
Figura N° 4.22: Mapa de índices de área foliar primer sobrevuelo.	115
Figura N° 4.23: Mapa índices de área foliar segundo sobrevuelo.....	116
Figura N° 4.24: Mapa índice de área foliar tercer sobrevuelo	116
Figura N° 4.25: Mapa índice de área foliar cuarto sobrevuelo.	117
Figura N° 4.26: fPAR lisímetro.....	117
Figura N° 4.27: fPAR tanque de evaporación tipo A.....	118
Figura N° 4.28: fPAR formula	119
Figura N° 4.29: Mapa fPAR primer sobrevuelo	120
Figura N° 4.30: Mapa fPAR segundo sobrevuelo.....	121
Figura N° 4.31: Mapa fPAR tercer sobrevuelo	122
Figura N° 4.32: Mapa fPAR cuarto sobrevuelo	122
Figura N° 4.33: Fracción de radiación fotosintéticamente activa Fc lisímetro	122
Figura N° 4.34: Fc tanque de evaporación tipo A.....	123
Figura N° 4.35: Fc formula	124
Figura N° 4.36: Mapa de cobertura vegetal primer sobrevuelo	125
Figura N° 4.37: Mapa de cobertura vegetal segundo sobrevuelo	126
Figura N° 4.38: Mapa de cobertura vegetal tercer sobrevuelo	126
Figura N° 4.39: Mapa de cobertura vegetal cuarto sobrevuelo	127
Figura N° 4.40: Coeficiente del cultivo Kc lisímetro.....	127
Figura N° 4.41: Coeficiente del cultivo Kc tanque evaporación tipo A.....	128
Figura N° 4.42: Coeficiente del cultivo Kc formula	128
Figura N° 4.43: Coeficiente del cultivo Kc promedio tratamientos.....	129
Figura N° 4.44: Mapa del coeficiente del cultivo Kc primer sobrevuelo	130
Figura N° 4.45: Mapa del coeficiente del cultivo Kc segundo sobrevuelo.....	131

Figura N° 4.46: Mapa del coeficiente del cultivo Kc tercer sobrevuelo	132
Figura N° 4.47: Mapa del coeficiente del cultivo Kc cuarto sobrevuelo	133
Figura N° 4.48: Coeficiente del cultivo Kc comparado con la FAO	134
Figura N° 4.49: Numero de tubérculos por categoría por tratamientos	134
Figura N° 4.50: Peso en gramos por tubérculo y por categoría.....	136
Figura N° 4.51: Rendimiento kg/parcela.....	136
Figura N° 4.52: Rendimiento total por categoría Kg/ha	138
Figura N° 4.53: Mapa del rendimiento por categorías	140
Figura N° 4.54: Rendimiento total Ton/ha.....	140
Figura N° 4.55: Lámina de agua por tratamiento utilizado por m ²	142
Figura N° 4.56: Volumen de agua utilizado por tratamiento en m ³ /ha.....	143
Figura N° 4.57: Mapa del contenido de agua en plantas	144
Figura N° 4.58: Contenido de agua en la planta	145
Figura N° 4.59: Mapa del contenido de agua en plantas	146
Figura N° 4.60: Volumen de agua utilizada lt/kg de producción.....	147
Figura N° 4.61: NDVI Normalizado ajustado con lisímetro.....	148
Figura N° 4.62: IAF ajustado con lisímetro	149
Figura N° 4.63: fPAR ajustada con lisímetro.....	150
Figura N° 4.64: Kc promedio tratamientos ajustado con lisímetro.....	151
Figura N° 4.65: Correlación Kc lisímetro y NDVI Tanque	153
Figura N° 4.66: Correlación Kc lisímetro y NDVI Formula.....	153
Figura N° 4.67: Curvas características de modelos encontrados	155

ÍNDICE DE ANEXOS

Cuadro N° 10.1 ANOVA Altura planta a los 30 días después de siembra.	170
Cuadro N° 10.2 ANOVA Altura planta a los 60 días después de la siembra.....	170
Cuadro N° 10.3 ANOVA Altura planta a los 90 días después de la siembra.....	171
Cuadro N° 10.4 ANOVA Altura planta a los 120 días despues de la siembra.....	171
Cuadro N° 10.5 ANOVA Diámetro tallo a los 30 días después de la siembra.	172
Cuadro N° 10.6 ANOVA Diámetro tallo a los 60 días después de la siembra	172
Cuadro N° 10.7 ANOVA Diámetro tallo a los 90 días después de la siembra	172
Cuadro N° 10.8 ANOVA Diámetro tallo a los 120 días después de la siembra	173
Cuadro N° 10.9 ANOVA Número de tallos 30 días después de la siembra	173
Cuadro N° 10.10 ANOVA Número de tallos 60 días después de la siembra	174
Cuadro N° 10.11 ANOVA Número de tallos 90 días después de la siembra	174
Cuadro N° 10.12 ANOVA Número de tallos 120 días después de la siembra	175
Cuadro N° 10.13 ANOVA Profundidad radicular 30 días después de la siembra	175
Cuadro N° 10.14 ANOVA Profundidad radicular 60 días después de la siembra	176
Cuadro N° 10.15 ANOVA Profundidad radicular 90 días después de la siembra	176
Cuadro N° 10.16 ANOVA Profundidad radicular 120 días después de la siembra	177
Cuadro N° 10.17 ANOVA Contenido de clorofila 30 días después de la siembra	177
Cuadro N° 10.18 ANOVA Contenido de clorofila 60 días después de la siembra	178
Cuadro N° 10.19 ANOVA Contenido de clorofila 90 días después de la siembra	178
Cuadro N° 10.20 ANOVA Contenido de clorofila 120 días después de la siembra	179
Cuadro N° 10.21 ANOVA Contenido relativo de agua en planta.....	179
Cuadro N° 10.22 ANOVA Número de tubérculos primera categoría.....	180
Cuadro N° 10.23 ANOVA Número de tubérculos primera categoría.....	180
Cuadro N° 10.24 ANOVA Número de tubérculos primera categoría.....	181
Cuadro N° 10.25 ANOVA Número de tubérculos primera categoría.....	181
Cuadro N° 10.26 ANOVA Producción por categoría parcela Kg.....	182
Cuadro N° 10.27 ANOVA Producción por categoría parcela Kg.....	182
Cuadro N° 10.28 ANOVA Producción por categoría parcela Kg.....	183
Cuadro N° 10.29 ANOVA Producción por categoría parcela Kg.....	183
Cuadro N° 10.30 ANOVA Rendimiento por categoría por kilos por hectárea	184
Cuadro N° 10.31 ANOVA Rendimiento por categoría por kilos por hectárea	184
Cuadro N° 10.32 ANOVA Rendimiento por categoría por kilos por hectárea	185
Cuadro N° 10.33 ANOVA Rendimiento por categoría por kilos por hectárea	185

Cuadro N° 10.34 ANOVA Rendimiento Total kilos por hectárea186

I. INTRODUCCIÓN

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

Numerosas aproximaciones se realizan para estimar la Evapotranspiración. Cada método presenta sus ventajas y desventajas para ser utilizado desde el punto de vista práctico, pero ninguno es aplicable bajo todas las condiciones, así como tampoco ha quedado exento de críticas. Por lo demás, los resultados obtenidos no siempre concuerdan.

En la última década se han realizado diversos trabajos para la estimación de la Evapotranspiración de los cultivos, los cuales se han orientado al empleo de los factores del clima, que tienen más influencia en ese proceso y a la comprobación, comparación y ajuste de los métodos propuestos para diferentes condiciones edafoclimáticas. Se puede afirmar que las investigaciones han estado orientadas en dos direcciones básicas: a) la determinación del factor o factores climáticos más influyentes en la Evapotranspiración y b) la comparación y ajuste de los métodos propuestos por diferentes investigadores para determinadas regiones edafoclimáticas.

Según la FAO (2008), la producción de alimentos de los países en desarrollo se lleva a cabo en un 60 % en tierras que dependen de lluvia, teniendo solo un 40 % restante de regadío, constituyendo el agua en requisito indispensable para alcanzar y preservar el desarrollo sostenible. Se prevé que estos países aumentarán sus tierras de regadío pasando de los 248 millones de hectáreas actuales a 311 millones para el 2030, acentuando que el riego aumenta la producción entre un 100 y el 400 % (FAO, 2008).

Estudios realizados por Watson et al. (1997) señalan que los principales efectos directos del cambio climático sobre los cultivos, serían principalmente la duración de los ciclos,

alteraciones fisiológicas por exposición a temperaturas fuera del umbral permitido, deficiencias hídricas y respuestas a nuevas concentraciones de CO₂ atmosférico.

El vegetal al estar sometido a un desequilibrio hídrico, lo contrarresta con el cierre de los estomas, evitando así la pérdida de agua desde el interior de la célula del mesófilo y con ello la disminución del transporte y translocación de nutrientes, dando como resultado reducir la fotosíntesis y el crecimiento; pero si el factor estresante continua por un largo tiempo, llegará a un estado de agotamiento con la muerte del vegetal (Hanson y Hitze, 1982; Kramer, 1983).

El panorama mundial ha puesto en relieve la crisis energética que se vive, aunado al problema hídrico, se configuran dos aspectos de interés mundial. La agricultura convencional es una actividad donde la aplicación de insumos se hace de manera homogénea en la superficie independiente de la variación espacial del suelo, clima o plantas que puedan presentar problemas de enfermedades por plagas y enfermedades. En contraste, la agricultura de precisión pretende mediante la discretización de esta superficie el aporte de los insumos estrictamente acorde a las necesidades del cultivo; dichas necesidades estarán en función de la variabilidad espacial y temporal de los factores naturales como suelo, clima, y artificiales como operación del sistema de riego, etc.

La construcción de un modelo consiste en la individualización de una serie de ecuaciones matemáticas, mediante las cuales es posible reproducir del modelo más fiel posible, el comportamiento del sistema examinado (Bandi, M 2003).

El uso de modelos, a veces llamado “modelación”, es un instrumento muy común en el estudio de sistemas de toda índole. Los modelos son especialmente importantes, porque ayudan a comprender el funcionamiento de los sistemas. El empleo de modelos facilita el estudio de los sistemas, aun cuando estos puedan contener muchos componentes y mostrar numerosas interacciones como puede ocurrir si se trata de conjuntos bastante complejos y de gran tamaño.

El uso de sensores permite la adquisición de datos y mediante el uso de Drones se pueden obtener datos remotos sobre el estrés hídrico de las plantas, que son fácilmente detectables mediante imágenes multi espectrales. Un acercamiento de las plantas permite detectar su vigor y así estimar estrés hídrico, nutricional, térmico o sanitario.

Para la ingeniería de riego en este trabajo de investigación, los drones son herramientas que ofrecen el potencial de monitorear la evolución de un proceso o fenómeno de interés agrícola, como la aplicación del riego para mejorar su eficiencia. Sin embargo, como la mayoría de estos procesos son complejos, cuando se complementan con monitoreo instrumental fijo como el realizado con estaciones automatizadas meteorológicas, puede ser de mayor utilidad para analizar procesos que dependen de una gran cantidad de variables.

Las imágenes obtenidas han sido validadas mediante la estimación de parámetros biofísicos a partir del uso de índices de vegetación de banda estrecha conectados con modelos de transferencia radiactiva que simulan la interacción de la radiación con la vegetación a escala de cubierta, de igual manera para la información levantada en el campo en forma directa para cada uno de los parámetros.

En este marco se realizó la investigación y esta organizado en el siguiente esquema:

En el capítulo I, introducción, se describe la problemática respecto a la necesidad de determinar los requerimientos hídricos del cultivo de papa utilizando nuevas tecnologías que sean de fácil aplicación a acceso para que sean utilizadas en la agricultura de precisión. Además se presentan los objetivos y justificación de la investigación.

En el capítulo II, se refiere al marco teórico, es una recopilación de información técnica científica en lo referente a la determinación de los requerimientos hídricos de los cultivos, siguiendo en una forma ordenada los parámetros biofísicos desde la siembra hasta la cosecha con la utilización de calendarios, finalizando con el análisis de la utilización de sensores remotos y modelos matemáticos.

Capítulo III, se hace referencia a materiales y la metodología utilizada para la investigación, en la que se detalla los materiales de campo y gabinete. En la metodología se hace un detalle en las fases de pres campo, campo y gabinete que tuvo la investigación, en este capítulo se hace referencia a las investigaciones realizadas para fortalecer la metodología de la investigación y poder llegar a los objetivos planteados.

Capítulo IV, hacemos referencia a resultados y discusión de los principales parámetros biofísicos y de sensores remotos hallados en la investigación, estos contrastados con análisis estadísticos y referenciados con investigaciones realizadas en el tema, para esto se utilizaron softwares completando con cuadros y figuras de los resultados finales.

Capítulo V, se refiere a conclusiones y recomendaciones, están basadas en los resultados y discusión de los resultados se presentan los principales resultados logrando obtener la modelación matemática que está plenamente validada con los parámetros biofísicos tomados en el campo. Se presenta algunas recomendaciones fruto de la investigación.

Finalmente se presenta un cuadro de Revisión de bibliografía y anexos correspondientes.

1.1 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.1.1 Objetivo general

Desarrollar expresiones matemáticas utilizando drones y lisímetro de drenaje, que permita estimar el coeficiente de cultivo y requerimiento hídrico de la papa en las condiciones de la sierra central ecuatoriana, Riobamba - Ecuador.

1.1.2 Objetivos específicos.

- Determinar el K_c ajustado para el cultivo de papa mediante lisímetro de drenaje, tanque evaporación clase A, formulas empíricas y drones.
- Determinar las características biométricas, volumen de agua utilizado y la producción del cultivo de la papa mediante la aplicación de laminas de riego de acuerdo a la informacion de lisímetros, tanque de evaporación y formulas empiricas.
- Introducir tecnologías modernas, como el uso de drones en la estimación de evapotranspiración.

1.2 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.

En Ecuador los estudios de los procesos de evapotranspiración son escasos, a pesar de que estos intervienen directamente en el ciclo hidrológico y por tanto la mayor parte del agua se pierde por estos procesos a la atmosfera. Es urgente 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.

Stott et al. (2004) mencionan que tanto los productores como los investigadores dan cuenta de un aumento del estrés hídrico, de cambios en la distribución e intensidad de las lluvias, de granizadas, de heladas, fenómenos extremos producto del cambio climático.

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, identificar un modelo matemático 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, aún cuando se utiliza básicamente el método del tanque evaporímetro clase A.

Como se ha mencionado anteriormente, existen varias razones que explican la importancia del cálculo o estimación de la evapotranspiración en las distintas escalas y resoluciones, y las ventajas que puedan reportar al crecimiento de muchos cultivos, el hecho de detectar fenómenos con distintas escalas de resolución espacial. Por ello se justifica complementar los modelos existentes para estos propósitos, mediante el uso óptimo de tecnologías modernas existentes, como la utilización de los drones

Analizadas las aproximaciones anteriores, se observa que existe una limitante en la aplicabilidad de los modelos, debido a diversos factores, como son por ejemplo, la imposibilidad de extrapolar mediciones de domos, o de estaciones meteorológicas, a grandes extensiones de tierra, o la dificultad de establecer un mapa de evapotranspiración, debido a la necesidad de contar con varias estaciones en ubicaciones distanciadas, lo cual eleva el costo del modelo. Por otro lado, el hecho de que muchos de los modelos existentes se calibran con mediciones particulares de las zonas de estudio, resulta difícil aplicarlos en otras de condiciones extremas o muy distintas a las calibradas.

Por lo anterior, se busca un complemento a las opciones existentes, utilizando tecnología de teledetección, y analizando el funcionamiento de un modelo elaborado, validado y utilizado, buscando razones de conveniencia en la utilización de percepción remota en áreas de la zona central del Ecuador. El manejo del tamaño de cada pixel, dentro de una imagen permite observar fenómenos evaporativos y parametros biofísicos a distintas escalas, pudiendo esto tener beneficios en áreas como producción agrícola.

Con la aplicación y el análisis de resultados del modelo aplicado, se simula el fenómeno de evapotranspiración, prescindiendo de datos climatológicos complejos, y de mantención de estaciones de mediciones in situ. Se obtienen datos de evapotranspiración para la Sierra Central del Ecuador para el cultivo de papa, pudiendo estos ser calculados para otras zonas del Ecuador.

Se hace necesario entonces encontrar un modelo alternativo, que con la menor cantidad de información posible, desarrolle de una manera rápida, accesible y simple los requerimientos hídricos de los cultivos. Junto con esta herramienta se estará introduciendo para la comunidad científica y para el país nuevas aproximaciones y aplicaciones para el manejo de la ecuación de determinar el requerimiento hídrico del cultivo de papa en sus diferentes etapas con la simple aplicación de la teledetección.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 IMPORTANCIA DEL AGUA

Es fundamental la eficiencia de aplicación del agua debido a que es un recurso escaso que generalmente no alcanza para regar toda la superficie que desea el agricultor o para no generar problemas en los sectores o predios que se encuentran en posiciones más bajas, la cantidad aprovechable de este elemento por el cultivo será variable y dependerá de los factores meteorológicos, del suelo y así como de la disponibilidad de agua de regadío. (INIA, 2013).

Ekanayake (1994), enfatiza que la vulnerabilidad de la papa ante el déficit hídrico ocurre durante su ciclo de crecimiento, dando como consecuencia bajo rendimiento y mala calidad del tubérculo, poniendo en manifiesto el importante papel que cumple este elemento.

Hargreaves y Merkle (2000), precisan que el requerimiento hídrico de un cultivo está determinado por el potencial de evaporación climático, de las características de las plantas y de los factores que influyen en el crecimiento de la planta.

FAO (2008), dice que variedades moderadas de papa son sensibles a la falta de agua y necesitan una irrigación frecuente y superficial, el ciclo del cultivo de papa es de 120 a 150 días de siembra a cosecha y consume de 500 a 700 mm de agua, la producción disminuye si no se aporta con más del 50 por ciento total del agua disponible en el suelo durante el crecimiento

El cultivo de papa en pleno desarrollo, puede transpirar de 2 – 10 mm por día. Precipitaciones inferiores a 10 milímetros no son efectivas para el cultivo ya que estas quedan retenidas en las hojas del cultivo y se evaporan (Simpfendofer, 2000).

Pumisacho y Sherwood (2002), revelan que en los lugares donde se practica cultivo de secano, se encuentra una estrecha correlación entre la intensidad de la precipitación y el

rendimiento final en tubérculos. La falta de agua se manifiesta por amarillamiento y marchitamiento de las hojas, menor velocidad de crecimiento y maduración precoz, con una consecuente reducción del rendimiento.

2.1.1 Agua en el suelo

El suelo es un "reservorio" que contiene cierta cantidad de agua, de la cual sólo una parte está disponible para las plantas. Esta capacidad se encuentra limitada por el agua retenida entre los niveles de humedad denominados capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP) (Hurtado, 2002).

Fuente (2006) dice que Saturación es cuando todos sus poros están llenos de agua, si se permite que un suelo saturado drene libremente, el contenido de agua comienza a descender vaciándose primero los poros más grandes, que son ocupados por aire. El agua así eliminada se denomina agua libre o gravitacional; no es retenida por el suelo.

- **Capacidad de campo (CC)**

Hurtado (2002), manifiesta que CC es la máxima cantidad de agua retenida por un suelo con buen drenaje, los poros pequeños (micro poros) retienen el agua contra la fuerza de gravedad, pero con una energía que es fácilmente superada por la fuerza de succión de las raíces. La capacidad de campo se alcanza cuando la tensión del agua en el suelo es de aproximadamente 0.3 bars (30 centibares ó 3 m de columna de agua) en suelos arcillosos o de 0.1 bares en suelos de textura media (Hidalgo, 2008).

- **Punto de marchitez permanente (PMP)**

Vásquez e Iglesias (2000), explican que el PMP es el contenido de humedad del suelo al cual las plantas no logran extraer agua para compensar sus necesidades de transpiración, manifestándose síntomas de marchitamiento, caída de hojas, escaso desarrollo (Hidalgo, 2008). Este punto se logra cuando la tensión del agua en el suelo alcanza entre 10 y 20 bares (Enciso, 2005).

La Capacidad de campo y Punto de Marchitez Persemanente permiten establecer la cantidad de agua del suelo aprovechable para las plantas, la cual depende básicamente de dos factores: La capacidad de retención del agua por unidad de volumen del suelo, la profundidad de suelo que alcancen las raíces de las plantas (Hurtado, 2002).

El Agua útil, Fuente (2006), comenta que agua útil es la cantidad de agua comprendida entre los valores de capacidad de campo (0.33 bares) y punto de marchitez permanente (15 bares) y comprende la humedad del suelo que puede ser utilizada por los cultivos.

- **Medición de agua en el suelo**

Según Ekanayake (1994), la medición de agua en el suelo es importante dentro de un sistema suelo - planta - atmósfera, destacando varios métodos entre los cuales se tiene: Gravimétrico de agua en el suelo, y Potencial mátrico del suelo.

- **Metodo gravimétrico.**

Enciso (2005), habla que para determinarlo tomar muestras de suelo a diferentes profundidades empleando un tubo de extracción de muestras de suelo. Por lo general se toman muestras de los siguientes perfiles: 0-15 cm, 15-30 cm, 30-45cm y 45-60cm. En algunos suelos puede ser deseable tomar muestras a profundidades de 90 cm, en función del grado de pérdidas por percolación profunda y escorrentía, y de las características del perfil del suelo. El contenido de agua del suelo (por peso) se calcula con la formula (2.1) propuesta por Ekanayake, (1994):

$$\text{Contenido de agua del suelo (\%)} = \left[\frac{(PF - PS)}{PS} \right] \times 100 \quad (2.1)$$

PF = Peso fresco de la muestra

PS = Peso seco de la muestra

- **Metodo indirecto por tensiometros**

Fuente (2006), indica que los tensiómetros son recipientes porosos llenos de agua acoplados a un manómetro de válvula al vacío. Ekanayake (1994), dice que el suelo ejerce una fuerza de succión contra el agua contenida en el recipiente. Mientras más seco esté el suelo, mayor será la fuerza. La fuerza de succión o potencial mátrico del suelo puede leerse directamente en el tensiómetro en unidades de presión (bares o pascales).

Los tensiómetros se colocan a diferentes profundidades en el perfil de suelo, preferible adyacentes unos con otros, en el caso del cultivo de papas se ha colocado a profundidades de 15, 30 y 45 cm, las lecturas de PMS pueden realizarse de manera continua a lo largo de toda la temporada (Ekanayake, 1994).

2.2 EVAPOTRANSPIRACIÓN (Et)

La evapotranspiración (Et) es la pérdida de agua que ocurre en una superficie como consecuencia de la combinación de los procesos de evaporación de una superficie evaporante y la transpiración de la planta, tal como se muestra en la Figura 2.1, (Allen et al, 2006). La Et es un componente del balance de agua, y un parámetro importante en la definición de las necesidades hídricas de los cultivos y por consiguiente en la programación de riego, (Droogers, 2000).

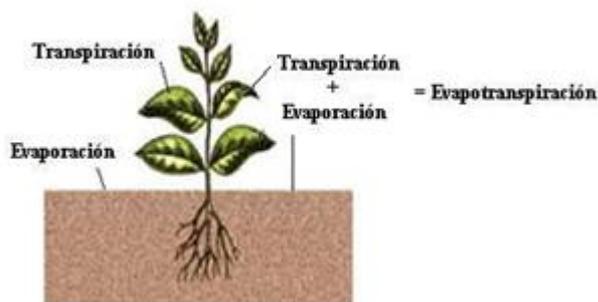


Figura N° 2.1: Proceso de evapotranspiración
(Allen et al, 2006)

Se emplea el término Et debido a la dificultad de diferenciar entre los procesos de evaporación y transpiración, los cuales se producen de manera simultánea. El agua que se pierde por transpiración entra a la planta a través de la raíz, pasa al follaje y luego a la atmósfera por medio de la apertura de los estomas. Entre tanto, la pérdida de agua a través

de la evaporación se presenta por el paso directo del agua disponible en el suelo a la atmósfera, (Brown, 2000).

Salisbury y Ross (1992), referencian el estudio realizado por Hanks (1980) cuyo objetivo fue medir el agua requerida por un cultivo de remolacha a cielo abierto. Encontró que para madurar el cultivo fue necesario aplicar 620 mm de agua de los cuales aproximadamente el 25% se evaporó directamente del suelo y el 75% se transpiró a través de la planta. El autor añade que sólo el 1% del agua que llega a la planta es utilizada para formar la biomasa del cultivo. De aquí que se hable indistintamente en uso consuntivo (el cual incluye el 1% señalado con anterioridad) y evapotranspiración.

2.2.1 Evaporación.

Es el proceso mediante el cual el agua en forma líquida se convierte en vapor de agua y luego se remueve de la superficie evaporante. Para el cambio de estado se requiere energía que proviene en gran medida por la radiación solar y en menor grado por la temperatura del aire. La remoción se presenta como resultado de la diferencia de presión de vapor de agua predominante entre la superficie evaporante y la atmósfera en determinado lugar. Cuando la superficie evaporante es un espejo de agua (lago, laguna, suelo húmedo, etc) en este proceso sólo intervienen parámetros climatológicos tales como la radiación solar, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y la velocidad del viento; pero, cuando se trata de la superficie del suelo, a los parámetros anteriormente mencionados se le suman otro tipo de parámetros como el porcentaje de suelo cubierto por una vegetación dada y la cantidad de agua disponible en la superficie evaporante. (Allen et al, 2006).

La velocidad tasa de evaporación depende del grado de saturación de la atmósfera circundante, por tanto, a medida que el aire se satura esta disminuye hasta el punto de no tener la capacidad de retirar el agua de la superficie evaporante, requiriendo un cambio en las condiciones de humedad de la atmósfera que se genera con una restitución del aire saturado. La velocidad de evaporación también puede llegar a ser nula debido a la limitada disponibilidad de agua en el suelo, tal caso es el que se presenta en zonas con prolongados intervalos de sequía y riegos poco frecuentes, (Allen et al, 2006).

2.2.2 Transpiración.

Es el proceso mediante el cual el agua líquida que se encuentra contenida en el espacio intercelular de los estomas se convierte en vapor de agua y pasa a la atmósfera a través de la apertura de estos, El agua tomada por la planta a través de las raíces en su mayor parte es transpirada y sólo un bajo porcentaje es empleado en la actividad fisiológica de la misma, (Allen et al, 2006).

La transpiración es un proceso vital para las plantas, necesario para enfriar las hojas y transportar agua y nutrientes. Consiste en la emisión de vapor de agua hacia el aire circundante a través de los estomas. Depende de la presión de vapor en la cavidad ubicada por detrás de los estomas y del aire circundante dentro del invernadero. Aquí, el aire se encuentra saturado con vapor de agua y el aire de la atmósfera circundante se encuentra más seco que este por tanto, el vapor difundirá por el gradiente de concentración. A medida que los estomas se encuentre más abiertos, la difusión será más rápida y la resistencia será menor.

La velocidad de transpiración (la velocidad de transporte de vapor de agua) cambia con la diferencia entre la humedad de la hoja y del ambiente. La apertura de los estomas se ve influenciada por la luz, el gradiente de presión de vapor, el dióxido de carbono (CO₂), la temperatura foliar y disponibilidad de agua. La luz es el factor más importante en el control de los estomas, cuando la luminosidad es alta los estomas estarán abiertos. En caso de que el valor del gradiente de presión de vapor es alto o existe déficit de agua, los estomas se cierran para proteger la planta contra la deshidratación, (E.E.Aalsmeer, 2003).

La pérdida de agua por transpiración se ve influenciada por la capacidad del suelo para conducir agua hacia las raíces, la salinidad del suelo, la calidad del agua de riego, el tipo de cultivo, estado vegetativo, prácticas de manejo y por los factores que afectan el proceso de evaporación, (Allen et al, 2006). Además, interviene en este proceso la radiación solar. A medida que aumenta la radiación solar, las plantas se calientan, se incrementa el gradiente de presión de vapor entre las hojas y el aire circundante y la resistencia total disminuye y por ende aumenta la transpiración, (E.E.Aalsmeer, 2003).

Salisbury y Ross (1992), explican claramente la razón por la que se pierden altas cantidades de agua durante el proceso de transpiración. Menciona que esto se debe a que las

estructuras vegetales están compuestas por átomos de carbono, el cual entra a la planta a través del dióxido de carbono (CO₂) que es obtenido de la atmósfera mediante la apertura de los estomas, elemento por donde se pierde agua hacia la atmósfera, presentando una extensa descripción de la relación fotosíntesis versus transpiración y la manera como intervienen los factores ambientales en el comportamiento de la planta desde el punto de vista fisiológico.

2.2.3 Factores que intervienen en la evapotranspiración.

Los factores que intervienen están relacionados con las condiciones climatológicas (radiación solar, flujo de calor, viento, humedad relativa y temperatura) y la relación del sistema suelo-planta. Los factores de clima proporcionan la energía necesaria para vaporizar el agua y extraer el vapor desde una superficie evaporante (suelo o vegetación), (Allen et al, 2006; Baille, 1996; Brown, 2000).

La radiación solar define la cantidad de energía disponible para evaporar el agua, pero hay que tener en cuenta que no toda la energía disponible se utiliza para evaporar; parte de esta energía se emplea para calentar la atmósfera y el suelo, (Allen et al, 2006). Fernández et al (2010), referencian el estudio realizado por De Villele (1974) bajo condiciones de invernadero, en el cual se encontraron estrechas relaciones entre la ET observada y radiación solar medida dentro del invernadero.

La temperatura juega un papel importante porque el calor sensible del aire circundante transfiere energía al cultivo haciendo que a temperaturas altas la Et se incremente y temperaturas bajas la Et disminuya, (Allen et al, 2006).

En el sistema suelo-planta, se destacan las condiciones de humedad del suelo y estado fenológico de la planta. Según Brown (2000), la humedad del suelo es el parámetro más importante que interviene en la Et. El tipo de planta está relacionado con la variedad o especie del cultivo y el estado de la planta se relaciona con el tamaño y actividad de crecimiento de la misma. La cantidad de Et producida en un cultivo depende en gran medida de la cobertura del suelo y el área de la hoja expuesta al proceso de transpiración.

2.2.4 Evapotranspiración potencial ETo

Se define como “la cantidad de agua transportada en un tiempo dado de un cultivo verde corto, de altura uniforme y adecuado estado de agua en el perfil del suelo”, (Irmak y Haman, 2003). Debido a la ambigüedad de la definición del cultivo, en especial, en climas cálidos y a la cantidad de cultivos agrícolas y hortícolas que cumplieran la condición de cultivo verde y corto se desarrolló el concepto de ETo, (Jensen et al, 1990; Irmak y Haman, 2003).

Las Unidades de evapotranspiración se expresan en milímetros (mm) por unidad de tiempo (hora, día, 10 días, mes o año) y definen la cantidad de agua perdida en una superficie cultivada en unidades de altura de agua, (Allen et al, 2006; Brown, 2000). También, esta pérdida de agua se puede expresar en términos de calor latente de vaporización (energía recibida por unidad de área), que es la energía requerida para vaporizar el agua.

Hidalgo (2008), aclara que es un concepto establecido para indicar la cantidad de agua que se transfiere a la atmósfera de un suelo permanentemente húmedo, cubierto por un cultivo de referencia.

La Eto es una cantidad que depende exclusivamente de las condiciones del medio ambiente: temperatura máxima y mínima, radiación solar, humedad relativa, velocidad del viento, etc.

La superficie de referencia corresponde a un cultivo hipotético de pasto con características específicas. Su fórmula es:

$$E_{to} = E_v * K_p \quad (2.2)$$

Donde:

E_v = Información del tanque de evaporación tipo A

K_p = coeficiente del tanque evaporímetro.

Para la determinación del coeficiente del tanque evaporímetro (K_p) se tomó en cuenta las características del tanque: color blanco, la ubicación considerando que el tanque se encuentra sobre barbecho y alejado a 1000 metros del cultivo, la humedad relativa y la velocidad del viento de acuerdo a las especificaciones descritas por resumidas en el cuadro que sigue.

Cuadro N° 2.1: Coeficientes del tanque evaporímetro (K_p) para el tanque Clase A

Tanque tipo Colorado	Caso A: Tanque situado en una superficie cultivada			Caso B: Tanque situado en un suelo desnudo ⁽¹⁾					
	HR media (%) □	baja < 40	media 40 -70	alta > 70	baja < 40	media 40 -70	alta > 70		
Velocidad del viento (m s ⁻¹)	Distancia del cultivo a barlovento (m)				Distancia del barbecho a barlovento (m)				
Baja	1	,75	,75	,8	1	1,1	1,1	1,1	
	< 2	10	1,0	1,0	1,0	10	,85	,85	,85
	≥ 100	1,1	1,1	1,1	100	,75	,75	,8	
Moderada	1	,65	,7	,7	1 000	,7	,7	,75	
	2-5	10	,85	,85	,9	1	,95	,95	,95
	≥ 100	,95	,95	,95	10	,75	,75	,75	
Alta	1	,55	,6	,65	100	,65	,65	,7	
	5-8	10	,75	,75	,75	1	,8	,8	,8
	≥ 100	,8	,8	,8	10	,65	,65	,65	
Muy alta	1	,5	,55	,6	100	,55	,6	,65	
	> 8	10	,65	,7	,7	1	,7	,75	,75
	≥ 100	,7	,75	,75	10	,55	,6	,65	
					100	,5	,55	,6	
					1 000	,45	,5	,55	

⁽¹⁾ Para grandes áreas de suelos desnudos y poco desarrollo agrícola, en condiciones cálidas y ventosas, debe reducirse K_{pan} en 20% y en 5-10% para condiciones moderadas de vientos, temperatura y humedad.

Fuente: (Allen, Pereira, Raez, & Smith, 2006).

2.2.5 Evapotranspiración del cultivo Etc

La metodología estándar propuesta en el documento Evapotranspiración del Cultivo (Allen et al, 2006), que tiene como fin determinar los requerimientos de agua en los cultivos usa el producto de la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o). El valor del coeficiente de cultivo (k_c) depende del tipo y estado del cultivo, tipo de suelo y de las condiciones ambientales.

Hurtado (2002), indica que la evapotranspiración o necesidad (consumo) de agua por los cultivos se refiere al agua usada por las plantas en la transpiración más la evaporada directamente desde la superficie del suelo.

Normalmente se mide en mm/día o mm/mes, y depende de la interacción entre factores climáticos, botánicos, edáficos y de manejo del cultivo. La evapotranspiración es baja en los primeros estadios de la etapa de crecimiento de la planta; se incrementa a medida que la

planta crece en altura, y en área foliar, hasta alcanzar un máximo en la etapa de fructificación y luego disminuye progresivamente hasta la etapa de cosecha.

Por lo tanto, que la evapotranspiración del cultivo (ET_c) varía fundamentalmente según el cultivo (estado fenológico) y el clima (FAO, 2008).

La evapotranspiración del cultivo se calcula como:

$$E_{tc} = E_{to} * K_c \quad (2.3)$$

Donde:

E_{to} = Evapotranspiración de referencia

K_c = coeficiente del cultivo

2.2.6 Coeficiente de cultivo (K_c)

Es un coeficiente que tiene en cuenta las características del cultivo y los efectos promedios de la evaporación en el suelo (Allen et al, 2006) y se describe las variaciones de la cantidad de agua que las plantas extraen del suelo a medida que se van desarrollando, desde la siembra hasta la recolección.

El K_c está relacionado con las fases de crecimiento del cultivo y se define a través de la curva de K_c, ver Figura 2.2. La curva describe cuatro fases: inicial, desarrollo del cultivo, mediados de temporada o intermedia y final de temporada. La fase inicial va desde la siembra hasta que el cultivo alcanza un 10% de la cobertura del suelo. La fase de desarrollo, empieza cuando termina la etapa anterior y va hasta el crecimiento activo de la planta. La fase intermedia, va desde la floración hasta que el cultivo alcanza el 70 -80% de cobertura máxima de cada cultivo. La fase final, va desde la madurez hasta la cosecha (Allen et al, 2006).

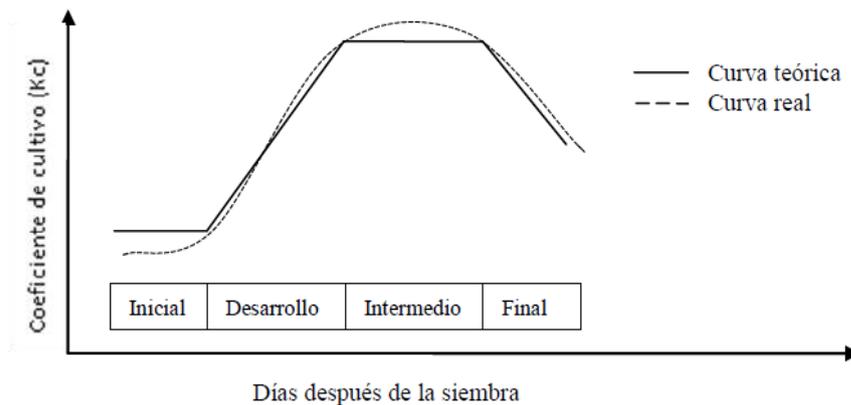


Figura N° 2.2: Curva del coeficiente de cultivo Kc

Es un valor que varía en el tiempo, creciendo con la planta hasta llegar a un máximo y luego disminuye, es decir depende de su estado de desarrollo y de sus etapas fenológicas, por ello, son variables a lo largo del tiempo. Dependen también de las características del suelo y su humedad, así como de las prácticas agrícolas y del riego.

Los efectos combinados, tanto de la transpiración del cultivo, como de la evaporación del suelo se integran en este coeficiente único del cultivo. Así el coeficiente Kc incorpora las características del cultivo y los efectos promedios de la evaporación en el suelo, constituyendo una excelente herramienta para la planificación del riego y la programación de calendarios básicos de riego en periodos mayores a un día (Beltri, 2008 y FAO, 2008).

2.2.7 Factores que determinan el coeficiente del cultivo

FAO, 2008. 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 del cultivo. Por otra parte, las características del cultivo que varían durante el crecimiento del mismo también afectarán al valor del coeficiente Kc. Por último, debido a que la evaporación es un componente de la evapotranspiración del cultivo, los factores que afectan la evaporación en el suelo también afectarán al valor de Kc.

2.2.8 Etapas del crecimiento del cultivo

FAO, 2008. 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 K_c 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.

- **Etapas inicial**

FAO, 2008. La etapa inicial está comprendida entre la fecha de siembra y el momento que el cultivo alcanza aproximadamente el 10% de cobertura del suelo. 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. Para cultivos permanentes, la fecha de siembra es reemplazada por el momento en que aparecen las primeras hojas. Durante el período inicial el área foliar es pequeña y la evapotranspiración ocurre principalmente como evaporación en el suelo. Por lo tanto, el valor de K_c durante el período inicial ($K_{c\text{ ini}}$) es alto cuando el suelo se encuentra húmedo debido al riego o lluvia, y es bajo cuando la superficie del suelo se encuentra seca. El tiempo que tardará el suelo en secarse dependerá del intervalo de tiempo entre eventos que humedezcan al suelo, del poder evaporante de la atmósfera (E_{To}) y de la magnitud del evento de humedecimiento.

- **Etapas de desarrollo del cultivo**

FAO, 2008. 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.

FAO, 2008. Para cultivos en hileras, donde en las hileras se presenta comúnmente el solape entre las hojas, tales como los frijoles, remolacha azucarera, papas y el maíz, la cobertura efectiva completa puede ser definida como el momento cuando algunas hojas de las plantas en hileras adyacentes comienzan a solaparse, lo que produce un sombreado casi completo del suelo, o cuando las plantas casi alcanzan su tamaño máximo, en el caso que no

ocurra el solape entre las hojas. Para algunos cultivos, principalmente aquellos de más de 0,5 m. de altura, al inicio de la cobertura efectiva completa la fracción promedio de la superficie del suelo cubierta por la vegetación (f_c) es alrededor 0,7-0,8.

FAO, 2008. Tanto la fracción de suelo expuesta al sol como la fracción sombreada de suelo no variarán significativamente cuando el cultivo tenga un crecimiento más allá del correspondiente a una $f_c \approx 0,7$ a $0,8$. Se sobreentiende que el cultivo o la planta puede continuar su crecimiento, tanto en altura como en área foliar, después de alcanzar el estado de cobertura efectiva completa. Debido a que es difícil determinar visualmente cuando algunos tipos de vegetación densa y diseminada alcanzan la cobertura completa, tal como en los casos de los cereales de invierno y primavera y algunos pastos, se utiliza la etapa de floración como un indicativo más simple para determinar la presencia de la cobertura completa en este tipo de cultivos.

- **Etapa de mediados de temporada**

FAO, 2008. 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 E_{To} de referencia. La etapa de mediados de temporada representa la etapa más larga para los cultivos permanentes y para una gran variedad de cultivos anuales, siendo relativamente corta para los cultivos hortícolas que son cosechados frescos para aprovechar su vegetación verde. Durante la etapa de mediados de temporada, el coeficiente K_c alcanza su valor máximo. El valor de K_c en esta etapa ($K_{c\ med}$) es relativamente constante para la mayoría de los cultivos y prácticas culturales. La diferencias entre el valor de $K_{c\ med}$ con respecto al valor de referencia '1', son debidas principalmente a las diferencias en la altura del cultivo y la resistencia, entre la superficie del pasto de referencia y el cultivo agrícola, además de diferencias en las condiciones climáticas.

- **Etapa de finales de temporada**

FAO, 2008. 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. Se asume que el cálculo de los valores de Kc y ETc finaliza cuando el cultivo es cosechado, secado al natural, alcanza la completa senescencia o experimenta la caída de las hojas. Para algunos tipos de vegetación perenne en climas libres de heladas, los cultivos pueden desarrollarse durante todo el año, por lo que podría tomarse la fecha de término de la etapa final como la misma fecha de ‘siembra’.

El valor de Kc al finalizar la etapa final (Kc fin) refleja el efecto de las prácticas de cultivo y el manejo del agua. Si el cultivo es regado frecuentemente hasta el momento de su cosecha en fresco, el valor de Kc fin será alto. Si se permite la senescencia y secado del cultivo en el campo antes de la cosecha, el valor de Kc fin será bajo. El estado de senescencia es generalmente asociado a una conductancia menos eficiente de los estomas debido a los efectos del envejecimiento, lo que causa una reducción en el valor de Kc.

2.2.9 Métodos para estimar la evapotranspiración

Desde finales de la década de los años 40^{os} del siglo pasado se han desarrollado numerosos métodos que permiten estimar la evapotranspiración en cultivos. Estos van desde métodos sencillos que determinan la Et de manera directa con la utilización de lisímetros o balances de aguas en el suelo, a métodos indirectos o micro meteorológicos que consisten principalmente en ecuaciones empíricas con base en variables climáticas. De estas últimas las más sencillas son las basadas en la medida de la temperatura, destacándose los modelos de Thornthwaite (1948) y Blaney y Cliddle (1950). Existen otras ecuaciones, igualmente empíricas, que dependen de la radiación solar como el método de Priestly-Taylor, otros combinan la temperatura y la radiación solar. Más rigurosas resultan aquellas fórmulas basadas en la combinación del balance energético y el transporte convectivo del vapor de agua tal como la ecuación de Penman-Monteith, (Anton et al 1995; Stefano y Ferro, 1997). Muchas investigaciones de evapotranspiración a campo abierto se han realizado con el fin de comparar distintos métodos de evapotranspiración con la Et medida con lisímetros, tal como los estudios realizados por: Sepaskhah y Ilampour, 1995; Chang et al, 1997; Trambouze et al, 1998; Bonachela et al, 1999; Boulard y Wang, 2000; García et al, 2003;

Karam et al, 2003; Villalobos et al, 2003; Yunusa et al, 2004; Benli et al 2005; Adekalu y Fapohunda, 2006; Alexandris et al, 2006; Fuchs et al, 2006; Loos et al, 2007; Lopez-Urrea, 2006; Karam et al, 2007; Schilling y Kiniry, 2007; Stangellini (1993); Villa-Nova et al, 2007; Casanova et al, 2009; y Wen-jin et al, 2010; entre otros.

- **Método empleando el tanque de evaporación.**

Ekanayake (1994), define la evapotranspiración de referencia (Eto) como la tasa máxima a la cual se eliminará el agua de las superficies del suelo y de las plantas, es decir la ET a la que la presión del vapor en las superficies evaporantes se encuentra en el punto de saturación.

La evapotranspiración potencial del cultivo (Eto) se puede medir empleando el tanque de evapotranspiración clase “A” en el que se anotan periódicamente las diferencias de nivel de agua. En la práctica, la Ep también puede medirse usando un recipiente con agua, abierto y plano, con paredes de cualquier altura y forma, al que se acopla una escala milimétrica vertical (Ekanayake, 1994).

- **Métodos empíricos Penman modificado.**

El método de Penman modificado define la ET como la evaporación a partir de una superficie extensa de un cultivo verde de poca altura, que da sombra total al suelo, ejerce poca o casi ninguna resistencia al flujo de agua y siempre cuenta con agua (Ekanayake, 1994).

- **Metodos utilizando Lisímetros**

Existen métodos directos para medir la Et en campo los lisímetros que son tanques aislados llenados con suelo disturbado o no disturbado en los que el cultivo crece y se desarrolla. En lisímetros se puede obtener una exactitud de milímetros, donde la pérdida de agua es medida directamente por el cambio de masa y periodos pequeños tales como una hora (Bastianssen, 1995)

Los lisímetros son generalmente la herramienta que ayuda a evaluar la confiabilidad de los procedimientos empíricos, dichos lisímetros son recipientes grandes, llenos de suelo,

ubicados en el campo para representar sus características naturales, en las cuales las condiciones agua-suelo-planta pueden ser reguladas y controladas (Aboukhaled, 1986).

Existen varios tipos de lisímetros que son los no pesantes o volumétricos y los pesantes. En estos últimos se utilizan varios tipos de balanzas mecánicas para detectar los cambios de peso debidos a la E_t , precipitación o irrigación. La sensibilidad de estos lisímetros puede alcanzar valores de 0.03 mm de agua por diferencia de peso. El consumo de agua por evapotranspiración se determina pesando diariamente el conjunto del suelo, plantas, agua y aparato, y por diferencia de pesadas se obtiene la humedad consumida. La reposición de agua se efectúa por medio de tanques de alimentación en forma automática.

Existen dos tipos básicos de lisímetros para la monitorización de los flujos de agua y solutos a través el suelo: los de pesada y los de drenaje. Los primeros (Owens, 1987) suelen resultar caros, complejos de construir y casi siempre fuerzan al uso de suelo alterado como relleno (Jemison y Fox, 1994; Martin et al., 1994) siendo su principal aplicación determinar la evapotranspiración del cultivo (Ritchie y Burnett, 1968; Howell et al., 1985).

La extracción de suelo inalterado para el relleno de lisímetros requiere un procedimiento cuidadoso en esta línea Kranz et al. (1988) propusieron una nueva metodología para la excavación de un metro cúbico de un monolito de suelo inalterado para investigaciones del transporte de solutos a través del perfil del suelo.

Igualmente (Marek et al., 1988) idearon otro sistema para la fabricación de lisímetros de pesada de suelo inalterado de 9 m² x 2,3 m de un peso conjunto de unas 45 Tn. Winnik (1935), observó una permeabilidad mucho mayor en lisímetros de tipo relleno, respecto a los monolitos. Los lisímetros son bastante susceptibles a los efectos de la variabilidad espacial del suelo, por lo que este factor debe tenerse muy en cuenta en la decisión del lugar de instalación. También debe tenerse en cuenta que los flujos laterales que en condiciones naturales pueden producirse en el suelo no ocurren en los lisímetros de igual forma. Esto probablemente no es un gran problema en suelos ligeros, pero puede serlo en suelos arcillosos.

Admitiendo que el monolito contenido en el lisímetro está inalterado, la única diferencia entre este y el suelo del campo reside las condiciones del límite inferior, no quedando claro hasta que punto queda afectado el transporte de agua y solutos por dicho límite.

Esto plantea la cuestión de si debe o no practicarse tensión en la base del suelo. El borde inferior del lisímetro está separado del suelo y normalmente expuesto a la presión atmosférica, lo que resulta una barrera hidráulica al flujo de agua, esto es debido a que la tensión superficial del agua en los capilares del suelo se ve afectada cuando existe una interface suelo aire en la base del lisímetro que rompe el continuum de agua, (Winnik 1935).

Por ello para solucionar esta limitación, el límite inferior debe estar saturado con agua antes del que el drenaje pueda ocurrir. Para solventar el problema de la saturación se pueden emplear receptáculos cerámicos porosos para este límite inferior aunque para lisímetros de gran superficie, el uso de dispositivos de succión se hace impracticable y a menudo problemático. Por ello, la mayoría de estos lisímetros de mayor tamaño tienen un sistema de drenaje abierto a la presión atmosférica (Winnik 1935).

La presencia de una conexión capilar entre la columna del suelo y la superficie del lisímetro es un imperativo para minimizar el encharcamiento, caminos preferenciales o puentes de flujo alrededor del lisímetro (Kung, 1993; Jemison y Fox, 1994).

Los lisímetros sin tensión en la base emplean sólo la gravedad como causa del movimiento del agua a través de los poros de la superficie porosa, por su parte los lisímetros con tensión en la base usan tanto la gravedad como el gradiente de potencial creado por la aplicación de succión a la superficie de la base porosa (Kung, 1993; Jemison y Fox, 1994).

Los lisímetros sin tensión dependen de la formación de una zona de suelo saturado por encima de la plataforma porosa para que así pueda tener lugar el drenaje por flujo gravitacional. Esta condición rara vez se produce en la zona profunda de suelos bien drenados o moderadamente bien drenados lo que altera el contenido de agua y el potencial de agua del suelo en la zona radicular (Reeder, 1986).

El pre requisito de la saturación por encima de estos dispositivos de muestreo puede originar un drenaje de agua que rodee al lisímetro y produzca gradientes de potencial mátrico que

originen un movimiento de agua desde la zona saturada a la matriz insaturada del suelo circundante (Jemison y Fox, 1992).

La comparación entre lisímetros con tensión en la base y sin ella se hace complicado debido a la diferente naturaleza de la acción que provoca el movimiento del agua en cada uno de los casos. En el primero se rige por la tensión matricial mientras que en el segundo lo hace por la fuerza de la gravedad.

2.2.10 Estimación de las necesidades de agua de los cultivos.

FAO, 2008. Como se mencionó anteriormente, la demanda diaria de agua de los cultivos viene dada en función del valor de ET_c. Por otra parte, para calcular la cantidad diaria de agua a aplicar debemos de considerar, además del valor de ET_c, la eficiencia de riego.

En la práctica, el riego no es aplicado diariamente sino cada cierto número de días, denominado como frecuencia o intervalo de riego. Para determinar la frecuencia con que se debe aplicar el riego al cultivo debemos considerar la cantidad máxima de agua que el suelo puede retener, en la zona de influencia de las raíces del cultivo, que puede ser disponible para las plantas. Por ello es importante discutir el concepto de disponibilidad de agua en el suelo

2.3 RIEGO POR GOTEO

Romero (2005), expresa que es un método de riego localizado donde el agua es aplicada en forma de gotas que humedecen el área cercana a la planta, es decir, en el área de mayor concentración de las raíces, este sistema consta de filtros, reguladores de presión tubos conductores, laterales para bajar la presión y emisores, comúnmente denominados “goteros” (Hurtado, 2002).

La descarga de los emisores fluctúa en el rango de 2 a 4 litros por hora por gotero. Este método, garantiza una mínima pérdida de agua por evaporación o filtración, y es válido para casi todo tipo de cultivos, es así que su nivel de eficiencia alcanza un 90%-95 % (Will, 2012).

2.4 SENSORES REMOTOS

La Teledetección o percepción remota engloba una serie de técnicas y procesos que permiten obtener una imagen de la superficie terrestre de forma remota, es decir catada por sensores situados en satélites, aviones, drones y posteriormente tratarla e interpretarla con el objeto de obtener información de la superficie terrestre y de sus cambios. (Mather, 1987).

La teledetección esta compuesta por los siguientes elementos: una fuente de energía; un sistema sensor que capta la energía que interactúa con la superficie terrestre, la codifica, graba y envía a los sistemas de recepción; la cubierta terrestre, integrada por suelos, agua y vegetación; el sistema de recepción e interpretación de la información recibida de la plataforma de observación; un sistema intérprete para facilitar su estudio, evaluación.y el usuario que analiza el conjunto de datos mediante un método que le permite transformar los datos en información, según los objetivos e hipótesis formuladas (Mather, 1987).

La teledetección incluye la utilización de diversas fuentes de datos, las que a su vez se integran en la tecnología de Sistemas de Información Geográfica (SIG), lo que permite organizar, integrar y analizar grandes cantidades de datos provenientes de distintas fuentes y modelarlos con fines prácticos. (Mather, 1987). La base física de la teledetección se encuentra en la capacidad de los sensores, para medir las respuestas espectrales de los objetos, sus variaciones espaciales y temporales.

El estudio de los recursos territoriales y la medición de los campos energéticos de los cuerpos se centran en el empleo de longitudes de ondas electromagnéticas, que son codificadas en datos digitales y dispuestos en arreglos matriciales, basadas en una celda de tamaño conocido, como unidad de registro.

Torres-Sánchez et al. (2014). El primer elemento en el proceso de obtención de imágenes es contar con una fuente de energía que emita radiación electromagnética (sol), esta energía se transmite a través de un medio (atmósfera), a una determinada velocidad (de la luz), luego llega al objeto, el cual responde de acuerdo a sus características externas e internas, reflejando, absorbiendo o transmitiendo la energía incidente y, posteriormente vuelve a través del mismo medio de propagación, para incidir sobre el sensor, quien captura la radiancia y la transforma en formato digital (figura 2.3)

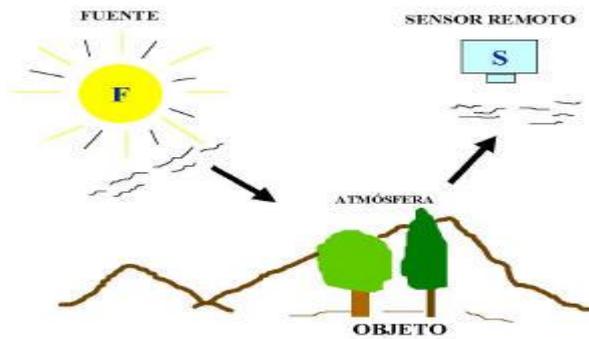


Figura N° 2.3 Componentes del Sistema de Teledetección

2.4.1 Espectro electromagnético

Los sensores sobre las plataformas usualmente registran radiación electromagnética. Es el espectro continuo de todos los tipos de radiación electromagnética. Hay un amplio rango de frecuencias en el mundo físico, desde las ondas de radio más largas (incluyendo aquellos en el rango del audio) y se extienden a través de la luz visible (que es una parte muy pequeña del espectro) hasta todas las formas de las ondas extremadamente cortas de los rayos gamma que son producto de los átomos radioactivos.

El espectro electromagnético (Figura 2.4), de acuerdo a las propiedades físicas de la radiación, es un arreglo continuo de radiaciones, ordenado según longitud de onda o frecuencia, que va entre las longitudes de onda Gamma y las longitudes de onda de radio y TV. En términos de longitud se ha demostrado que se extiende desde angstroms hasta kilómetros, Torres-Sánchez et al. (2014).

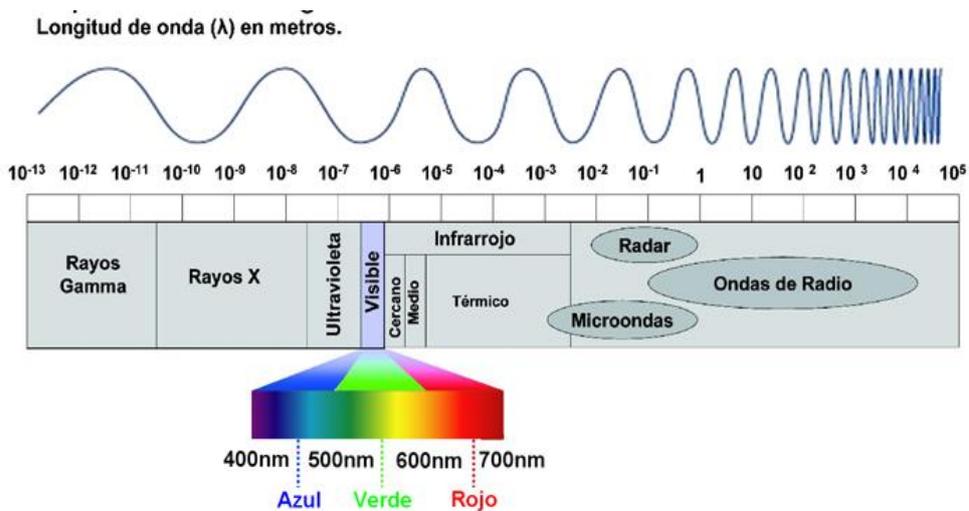


Figura N° 2.4 Rangos del espectro electromagnético.

- **Espectro visible. (0.4 a 0.7 μm).** Es la única radiación electromagnética que puede percibir el ojo humano. Suelen distinguirse tres longitudes de onda que generan el color azul (0.4 - 0.5 μm), (0.5 - 0.6 μm) y (0.4 - 0.5 μm).
- **Inflarrojo Cercano (0.7 a 1.3 μm).** Es de especial importancia, puesto que puede detectarse a partir de films dotados de emulsiones especiales.
- **Inflarrojo Medio (1.3 a 8.0 μm).** Se entremezclan los procesos de relajación de la luz solar y de emisión de la superficie terrestre.
- **Inflarrojo Lejano o Termico (8.0 a 14.0 μm).** Incluye la porción emisiva del espectro terrestre.
- **Microondas (a partir de 1 μm)** Energía bastante transparente a la cubierta nubosa.

2.4.2 Respuesta espectral reflectiva de elementos naturales

En este punto se verá el comportamiento de las coberturas principales de la tierra, como son la vegetación, suelo y agua, en las tres regiones del espectro electromagnético de mayor uso en teledetección.

La energía, al llegar al objeto, interactúa de diversas formas dependiendo de las características propias del objeto. De esta forma, tenemos que la Energía Incidente (I), puede ser Reflejada (R), parte Transmitida (T) y parte Absorbida (A).

Mulla (2013). El comportamiento teórico o la respuesta modelo de cada uno de los objetos con la interacción con la energía, expresada en la resultante de energía reflejada, en este caso, es lo que se llama **FIRMAS ESPECTRALES**, las cuales ayudan a identificar cada uno de los objetos de la superficie de la tierra, por cuanto cada uno de los objetos tiene una respuesta espectral única.

Las firmas espectrales o curvas características son entonces representación de la energía reflejada en relación a las longitudes de onda, consideradas sin el efecto atmosférico de la trayectoria objeto-sensor, y medida en condiciones ideales de ángulo incidente Mulla (2013).

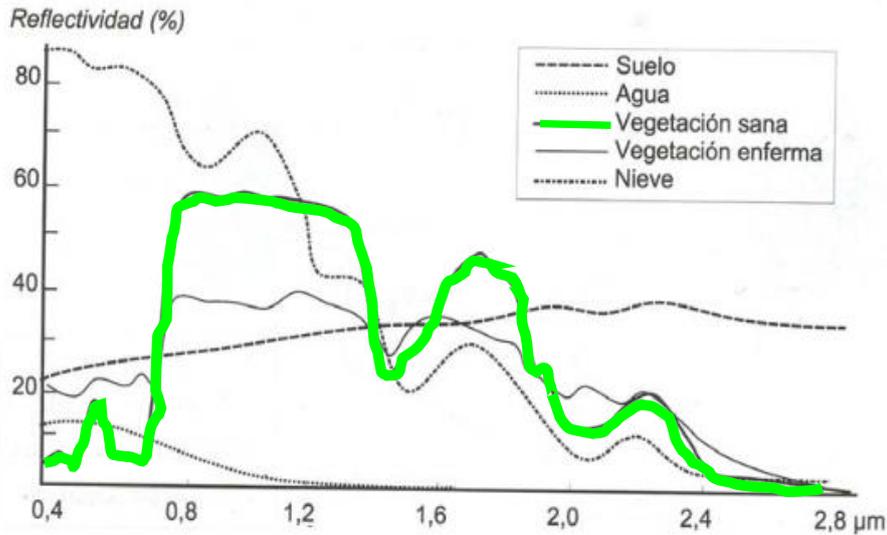


Figura N° 2.5 Firmas Espectrales de Diferentes Coberturas

En esta figura (2.5) se aprecia las firmas espectrales de cada elemento y como difieren estas, así como las longitudes de ondas donde las respuestas se hacen parecidas. Esto refuerza la necesidad de contar con sensores que puedan captar un número significativo de bandas espectrales. Se observa además, en que zonas del espectro cada objeto refleja mayor energía, dato que es de gran utilidad para la identificación y representación mediante la asignación de los colores primarios a cada una de las bandas y la selección óptima de las propias bandas espectrales a trabajar, Mulla (2013).

En la región 0,7 a 0,9 micrómetros se muestra una marcada separación entre las curvas de vegetación, agua, suelo, por lo tanto, puede perfectamente tomarse esta región como básica, si se quiere establecer la separación entre estos tres cuerpos naturales.

Mulla (2013). Las firmas espectrales son indicativas entonces, del comportamiento espectral de los distintos objetos en las diferentes bandas espectrales, por lo cual un conjunto de firmas, representativas de diferentes objetos indican en que bandas existe una mayor separabilidad espectral, haciendo más fácil su identificación en las imágenes y su respectiva clasificación.

El conocimiento de la reflectividad se logra con mediciones en laboratorio o en el terreno, mediante instrumentos denominados radiómetros. Los datos obtenidos mediante estos instrumentos deben ser considerados en relación a los elementos externos que afectan los

datos que se obtienen por los sensores espaciales. Estos son: atmósfera, ángulo de iluminación solar, ángulo de observación del sensor, estado fenológico en el caso de los vegetales, época del año, ubicación geográfica, calibración espectral y radiométrica del sensor, cambios en la humedad, etc, Mulla (2013).

2.4.3 Reflectividad de la vegetación

La cobertura vegetal está conformada por un conjunto de hojas que se disponen y agrupan de formas diferentes, la cual puede ser medida por el LAI (índice de área foliar) que es la superficie total de hojas por superficie de terreno, Torres-Sánchez et al. (2014).

Una hoja está constituida por diferentes capas de materia orgánica de estructura fibrosa, las cuales contienen diferentes tipos de pigmentos como la clorofila a y b, xantofilas, carotenos y otros, poseen una estructura fisiológica compleja y contenidos de agua variable, dependiendo de la especie y de las condiciones del sitio donde se desarrollan, como también de las características fenológicas de la propia hoja.

La cantidad de energía que es reflejada, absorbida y transmitida en las diferentes longitudes de onda por las hojas, depende de otros factores, aparte de los mencionados anteriormente, como son la respuesta espectral del suelo, presencia de vegetación senescente, elevación angular del sol y del sensor, la geometría de la propia cobertura de los cultivos y los cambios fenológicos, Torres-Sánchez et al. (2014).

La reflectancia espectral de la cobertura vegetal varía con la longitud de onda, reflejando más en ciertas longitudes de onda que en otras.

- **Absorción de los pigmentos**

Las plantas contienen cuatro pigmentos principales, la clorofila a y b, B caroteno y xantofila, todos los cuales absorben la energía en el visible para realizar los procesos de fotosíntesis se observa una baja reflectividad de la vegetación en las zonas del espectro visible correspondientes al azul (0,4 μm) y al rojo (0,7 μm) dada por la presencia de clorofila a y b, las cuales son responsables de la absorción en estas longitudes de onda. Los carotenos y xantofilas lo hacen con las longitudes del verde (0,55 μm) y algunas longitudes más largas, Mulla (2013).

- **Estructura fisiológica**

(Ben-Dor, 2010). La discontinuidad del índice de refracción entre las partes de la hoja determina la reflectancia en el infrarrojo. Esta discontinuidad ocurre entre membranas y el interior del citoplasma, entre células individuales y espacios de aire del mesófilo esponjoso.

La combinación de los pigmentos y la estructura fisiológica de la hoja produce propiedades características de la reflectancia, como: baja reflectancia en el rojo y en el azul; reflectancia media en el verde y alta en el infrarrojo.

Las diferencias de reflectancia entre especies dependen del grosor de la hoja que afecta la cantidad de pigmentos contenidos y la estructura fisiológica. Por ejemplo hojas gruesas como las de las coníferas tienden a absorber más y a reflejar poco, a diferencia de las hojas palmadas y delgadas que absorben poco y reflejan más, por ello, este tipo de hojas se identifican con tonos más claros que las de coníferas.

- **Respuesta espectral del contenido de agua en los vegetales**

En el infrarrojo medio, la respuesta espectral de la vegetación está determinada por su contenido hídrico. El agua contenida en la vegetación presenta una alta absorción en las longitudes de onda de 1,4 μm , 1,9 μm y 2,7 μm lo que significa una baja reflectividad por parte de la vegetación en estos valores (Ben-Dor, 2010).

Como se ha visto, el grado de absorción de la radiación solar por la vegetación se relaciona con su contenido hídrico, a su vez con la turgencia de las células y con el grosor de las hojas. Al disminuir su humedad o turgencia, aumenta su reflectividad y disminuye su absorción en el infrarrojo medio. En este rango, se tiene entonces, a mayor turgencia menor reflectividad y a menor turgencia mayor reflectividad, (Ben-Dor, 2010).

- **Respuesta espectral del suelo**

El suelo afecta la reflectancia de la vegetación, disminuyéndola y aumentándola según se trate de suelos de tonos claros u oscuros.

Los suelos oscuros producen una alteración de las longitudes de onda del rojo, aumentando los índices foliares.

La reflectancia de los suelos de tonos claros incide en una correlación menor entre el LAI y la reflectancia del infrarrojo, subestimándolo (Ben-Dor, 2010).

- **Respuesta espectral de la fenología**

La reflectividad de una cubierta vegetal depende en gran medida de su estado fenológico, es decir, del grado de crecimiento o madurez de la vegetación. Es importante considerar de igual forma, los eventos externos que afectan las cubiertas vegetales y que determinan cambios en sus respuestas normales, como por ejemplo enfermedades fitosanitarias, golpes de calor, sequías, etc (Ben-Dor, 2010).

2.5 APLICACIÓN DE DRONES EN AGRICULTURA.

Un Drone es un equipo para la obtención de datos remotos desde el entorno aéreo, con un estructura normalmente de fibra de carbono, y utilizado para la toma de fotos y videos en alta resolución incluso más allá del alcance visual mediante vuelo FPV (“First Person View” o “vuelo en primera persona”). Según la utilización de los Drone s se les integran diferentes tipos de cámaras o equipos de información para la gestión de la información que se recoja desde los vuelos que se realicen. También para la gestión de los equipos se utilizan diferentes sistemas de comunicación para el envío y recepción de los elementos de vuelo y de los datos capturados (Chao y Chen 2012).

Los Drones realizan una misión o actividad sin tener tripulación a bordo, ya que el control del mismo se realiza desde tierra ya sea por medio de un controlador o de forma autónoma. En general un Drone, UAS, UAV o drone, es una aeronave acondicionada para colocar dispositivos auxiliares operados a distancia (control remoto) o que pueden ser pre programados para fines diversos, desde levantamientos cartográficos hasta reconocimientos de patrones terrestres o medición remota de propiedades o variables de interés de la superficie terrestre (Chao y Chen 2012).

2.5.1 Aplicaciones de los Drones

Uno de los Drones más usados es el tipo multicóptero, el cual puede ser usado para eventos más urgentes como recabar información previa y planeación, ya que los aviones no tripulados tiene la posibilidad de volar a muy bajas velocidades de ser necesario, lo que permite obtener imágenes. Si bien los drones eran para aplicaciones militares y de seguridad pública, ahora destacan los usos de protección civil, de ecología y de monitoreo de obra pública, (Chao y Chen 2012).

2.5.2 Sensores remotos y drones

El propósito de los sensores remotos es adquirir información de la superficie terrestre sin estar en contacto con ella, a través de la radiación electromagnética emitida (Chao y Chen, 2012). Como fue comentado por Mulla (2013), para la agricultura del futuro es altamente probable que demanden mucha más información con alta resolución espacial y temporal que la que se utiliza ahora. Es posible ahora tener un manejo árbol por árbol, pero requiere de una colección masiva de datos y su análisis solamente puede realizarse a una escala ahora solo posible con fines de investigación. Los avances en sensores remotos basados en el uso de satélites, DRONES, sensores portátiles, o robots móviles pueden estimar densidad de malezas, altura del cultivo, reflectancia del follaje, grado de estrés, humedad del suelo y otras propiedades importantes para la toma de decisiones en el manejo de plagas, enfermedades, riego y fertilización de un cultivo.

La aplicación de los sensores remotos en agricultura está basada en la interacción de la radiación electromagnética con el suelo y el follaje. Este enfoque típicamente requiere de la estimación de la radiación reflejada, en lugar de la radiación transmitida o reflejada. En consecuencia, el propósito de los sensores remotos es adquirir información de la superficie terrestre sin estar en contacto con ella, a través de la radiación electromagnética emitida (Chao y Chen, 2012).

La cantidad reflejada por las plantas es inversamente relacionada con la radiación absorbida por los pigmentos de la planta y varía con la longitud de onda de la radiación incidente. Los pigmentos de la planta como la clorofila absorben fuertemente en el espectro solar visible (400-700 nm). En contraste, las plantas reflejan fuertemente la radiación en la región

infrarroja (700-1300 nm) proporcionalmente a su densidad y estructura foliar (Chao y Chen 2012).

Este efecto contrastante en el comportamiento de la radiación reflejada por los cultivos en la región roja e infrarroja cercana del espectro electromagnético ha inducido a generar una serie de índices espectrales basados en tasas de reflectancia en la regiones visible e infrarroja cercana. En consecuencia, como ha sido documentado por Mulla (2013), una gran cantidad de estudios se han enfocado a generar diversas variantes de índices espectrales para estimar propiedades o estado de los cultivos como contenido de nitrógeno o clorofila, biomasa o índice de área foliar (LAI).

Cada suelo tiene su propia firma espectral, en consecuencia un suelo tiene una región espectral donde la reflectancia es más fuerte dependiendo de sus constituyentes (Ben-Dor, 2010). Diferentes mezclas de suelo desnudo y cobertura de cultivo son captadas por sensores remotos que obligan a usar métodos y equipos para diferenciar las zonas con suelo y cultivo.

2.5.3 Aplicaciones de interés en las áreas de riego y drenaje

Los drones también tienen un gran potencial para aplicaciones de ingeniería de riego. Con un monitoreo de desarrollo y crecimiento de los cultivo, es posible determinar el grado de cobertura de un cultivo durante diferentes etapas fenológicas de los cultivos y así determinar indirectamente otras variables asociadas. Fernández-Pacheco et al. (2014) estimaron el coeficiente de cultivo (K_c) de la lechuga en función del porcentaje de cobertura (PGC) obtenido de fotografías digitales. La primera etapa del estudio consistió en obtener imágenes con una cámara digital para su posterior proceso para obtener el porcentaje de cobertura (PGC). Con la ayuda de una estación tipo relación Bowen y una estación meteorológica se obtuvieron los valores de la evapotranspiración del cultivo (E_{Tr}) y de la evapotranspiración de referencia (E_{To}) para así obtener experimentalmente el coeficiente de cultivo (K_c). Con datos experimentales de la altura del cultivo (h), se obtuvo una relación para estimar h en función de PGC. Finalizando con la derivación de una relación para estimar K_c en función de PGC. Este método tiene un gran potencial de ser aplicado usando un DRONE para la obtención de imágenes digitales (Chao y Chen 2012).

2.6 INDICES DE VEGETACIÓN Y PERCEPCIÓN REMOTA

El análisis de la vegetación y la detección de los cambios de sus patrones, son claves para la evaluación de recursos naturales y su monitoreo. Es por ello que la detección y la evaluación cuantitativa de la vegetación verde constituyen una de las mejores aplicaciones de la percepción remota para el manejo de los recursos ambientales y la toma de decisiones. Con la finalidad de explicar cómo la detección remota interactúa con la vegetación, y para su mejor comprensión, hemos creído conveniente definir algunos términos que faciliten entender esta investigación (Rouse, 1973).

La detección remota de la cobertura vegetal se fundamenta en algunas propiedades que tienen las hojas al interactuar con la radiación solar: Estructura básica de la hoja, Comportamiento espectral de la hoja viva, etc (Chao y Chen 2012).

2.6.1 Índices de vegetación

Los índices de vegetación son medidas cuantitativas, basadas en los valores digitales, que tienden a medir la biomasa o vigor vegetal. Usualmente el índice de vegetación es producto de varios valores espectrales que son sumados, divididos, o multiplicados en una diseñada para producir un simple valor que indique la cantidad o vigor de vegetación dentro de un píxel. Altos valores de índices de vegetación identifican píxeles cubiertos por proporciones substanciales de vegetación saludable, (Rouse, 1973).

Existe una variedad de Índices de Vegetación que han sido desarrollados para ayudar en el monitoreo de la vegetación. La mayoría de estos índices están basados en las interacciones diferentes entre la vegetación y la energía electromagnética de las bandas del espectro rojo e infrarrojo (Chao y Chen 2012).

2.6.2 Aplicaciones índices de vegetación

Los índices de vegetación han sido empleados en dos clases separadas de investigación. Las primeras utilizan estos índices como indicadores, mediante comparaciones entre los mismos, para monitorear el crecimiento y la productividad de específicos cultivos, o de fluctuaciones estacionales o anuales en productividad (Rouse, 1973).

Frecuentes valores del índice de vegetación han sido comparados con medidas in situ del LAI (área de la superficie de la hoja por unidad del área de superficie del suelo). El LAI es una importante consideración en los estudios de agronomía porque esta medida es significativa en estudios de fotosíntesis. Una segunda categoría de aplicaciones usa los índices de vegetación como un dispositivo de mapeo. En tal caso se usan los índices de vegetación para asistir en la clasificación de imágenes, distinguir áreas con vegetación de aquellas sin vegetación, para distinguir entre diferentes tipos y densidades de vegetación y para monitorear variaciones estacionales en el vigor del vegetativo, abundancia y distribución (Rouse, 1973).

2.7 MODELO PARA REQUERIMIENTOS HÍDRICOS.

El ciclo del proceso del modelado matemático, James Stewart, lo explica de la siguiente manera: Dado un problema del mundo real, nuestra primera tarea es formular un modelo matemático. Para esto se identifican y nombran las variables independientes y dependientes y se establecen hipótesis que simplifiquen el fenómeno lo suficiente para que puedan tratarse matemáticamente. Usamos nuestros conocimientos de la situación física y nuestras habilidades matemáticas para obtener ecuaciones que relacionen las variables. En la situación en la que no existe una ley física que nos guíe, quizá necesitemos reunir datos y examinarlos en forma de una tabla, para distinguir los patrones. Es probable que nos convenga obtener una representación gráfica a partir de la representación numérica de una función, utilizando estos datos. En algunos casos, la gráfica podría sugerir incluso una fórmula algebraica adecuada. La segunda etapa es aplicar las matemáticas que conocemos al modelo matemático que hemos formulado para llegar a conclusiones matemáticas. En la tercera etapa tomamos esas conclusiones matemáticas y las interpretamos como información acerca del fenómeno original del mundo real, de manera que se ofrezcan explicaciones o se hagan predicciones. El paso final es probar nuestras predicciones comparándolas con nuevos datos reales. Si las predicciones no se ajustan bien con la realidad se redefine el modelo o fórmula uno nuevo y se reinicia el ciclo (Guevara, E. 2007).

La modelación comenzó a tener importancia en agronomía y en otras áreas biológicas, dada su capacidad de suministrar información en un enfoque sistemático de todo el sistema biológico o de una parte, como es el sistema de producción agrícola (Guevara, E. 2007). Hoy más que nunca, el aumento de la producción de alimentos depende de la utilización prudente

de los recursos. Además, cuestiones como el cambio climático, la variabilidad del clima, el suelo y el secuestro de carbono a largo plazo, efectos en la seguridad alimentaria y la sostenibilidad del medio ambiente, se han convertido en aspectos importantes (Universidad de Georgia 2008).

Cada día resulta más crucial la necesidad de la información en la toma de decisiones y existe un vacío importante entre la información que se necesita y la que se genera tradicionalmente mediante la investigación disciplinaria. Para este propósito una herramienta como los modelos de simulación de los cultivos es de gran utilidad (Corporación colombiana de investigación agropecuaria 2003). Los modelos de simulación son una herramienta que facilitan la toma de decisiones, para seleccionar la mejor alternativa que se puede lograr con una combinación de recursos y precios, y muestra cuánto se podría pagar por una unidad más de cada recurso que se agota (Holmann, F. 2002).

2.7.1 Modelos y su utilización

De acuerdo con la cantidad de datos y el conocimiento que está disponible dentro de un campo particular, se desarrollan modelos con diferentes niveles de complejidad. La clasificación de los modelos ha sido intentada anteriormente, pero no se pueden hacer delimitaciones definidas, ya que los modelos generalmente poseen características de más de un grupo Galvez, G (2008). Los modelos de simulación se clasifican en dos grandes grupos: empíricos y mecanicistas. Los primeros son descriptivos, se derivan de datos observados sin involucrar procesos fisiológicos y tienen escasa capacidad explicativa. Por el contrario, los modelos mecanicistas poseen capacidad explicativa de la fisiología del cultivo, porque consideran aspectos como la temperatura, la radiación fotosintéticamente activa, el índice de área foliar, la fotosíntesis, la respiración y la eficiencia en el uso de la radiación Refugio. No obstante, dentro de estas clasificaciones existen otras categorías, que de acuerdo a sus características han sido nombradas de diferente forma.

Los modelos empíricos son descripciones directas de los datos observados y se expresan generalmente como ecuaciones de regresión (con uno o varios factores) y se utilizan para estimar la producción final. Ejemplos de tales modelos incluyen la respuesta de la producción a la aplicación de fertilizantes, la relación entre el área de la hoja y la cantidad

de hojas de una planta dada, la relación entre la altura del tallo y el número de tallos, su diámetro y la producción final (Galvez, G 2008).

2.7.2 Función de los modelos

Los modelos matemáticos llamados de simulación, mediante el uso de computadoras, constituyen un elemento importante para tomar decisiones en la agricultura al cuantificar, interpretar y predecir las necesidades hídricas de los cultivos y el desarrollo de estos y sus rendimientos (Ruiz, M.E. 2005).

Los modelos pueden ayudar a la comprensión de interacciones genéticas-fisiológicas-ambientales, con una integración interdisciplinaria. Los modelos tienen varias aplicaciones actuales y potenciales en respuesta a temas relacionados con la investigación, el manejo del cultivo y planificación. Los modelos permiten definir estrategias de producción en la etapa de la planificación de un cultivo futuro o ayudar a tomar decisiones tácticas durante el ciclo del cultivo tales como: prácticas culturales, fertilización, riego y uso de plaguicidas Meira, S. y Guevara, E. (2003).

Los modelos de simulación son un medio importante para aumentar la eficiencia de la investigación, ya que estos pueden auxiliar a los investigadores en la asimilación del conocimiento adquirido mediante la experimentación y proporcionan un marco de referencia para aportaciones de carácter multidisciplinario; asimismo, promueven el método de sistemas para la solución de problemas y facilitan una organización sistemática del conocimiento existente sobre cultivos y recursos naturales Bowen, W. y Jaramillo, R (2001).

2.7.3 Fases de construcción de un modelo

(Guevara, E. 2007) manifiesta que en muchos casos la construcción o creación de modelos matemáticos útiles sigue una serie de fases bien determinadas:

- Identificación de un problema o situación compleja que necesita ser simulada, optimizada o controlada y por tanto requeriría un modelo matemático predictivo.
- Elección del tipo de modelo, esto requiere precisar qué tipo de respuesta u output pretende obtenerse, cuales son los datos de entrada o factores relevantes, y para qué

pretende usarse el modelo. Esta elección debe ser suficientemente simple como para permitir un tratamiento matemático asequible con los recursos disponibles. Esta fase requiere además identificar el mayor número de datos fidedignos, rotular y clasificar las incógnitas (variables independientes y dependientes) y establecer consideraciones, físicas, químicas, geométricas, etc. que representen adecuadamente el fenómeno en estudio.

- Formalización del modelo en la que se detallarán qué forma tienen los datos de entrada, qué tipo de herramienta matemática se usará, como se adaptan a la información previa existente. También podría incluir la confección de algoritmos, ensamblaje de archivos informáticos, etc, etc. En esta fase posiblemente se introduzcan también simplificaciones suficientes para que el problema matemático de modelización sea tratable computacionalmente.
- Comparación de resultados los resultados obtenidos como predicciones necesitan ser comparados con los hechos observados para ver si el modelo está prediciendo bien. Si los resultados no se ajustan bien, frecuentemente se vuelve a la fase inicial.

Es importante mencionar que la inmensa mayoría de modelos matemáticos no son exactos y tienen un alto grado de idealización y simplificación, ya que una modelización muy exacta puede ser más complicada de tratar de una simplificación conveniente y por tanto menos útil. Es importante recordar que el mecanismo con que se desarrolla un modelo matemático repercute en el desarrollo de otras técnicas de conocimientos enfocadas al área sociocultural.

2.7.4 Generación de los Índices de Vegetación

- **Índice Normalizado de Vegetación (NDVI)**

Su fórmula es la siguiente:

$$NDVI = \frac{(IRCercano - ROJO)}{(IRCercano + ROJO)} \quad (2.4)$$

Donde:

NDVI = Índice de vegetación Normalizado

IRCercano = Infrarrojo cercano

ROJO = Rojo

Este índice es una medida de cuan saludable se encuentra la vegetación. La combinación de su formulación de Índice diferencia normalizada y el uso de las regiones de absorción y reflectancia más altos por parte de la clorofila hace que este índice sea robusto en una amplia gama de condiciones, (Rouse, 1973). Puede, sin embargo, saturar en condiciones de vegetación densa cuando el Índice de Área Foliar es alto. El valor de este índice varía de -1 a 1. El intervalo común para la vegetación verde es de 0,2 a 0,8.

- **Índice Mejorado de Vegetación (EVI)**

Este índice fue desarrollado como un producto estándar de MODIS para mejorar el NDVI mediante la optimización de la señal de la vegetación en las regiones del índice de área foliar. Utiliza la región de reflectancia del azul para corregir las señales de fondo del suelo y reducir las influencias atmosféricas, incluyendo la dispersión de aerosoles. Es más útil en las regiones donde el LAI llega a saturar el NDVI. (Huete, 2002)

Su formulación es la siguiente:

$$EVI = 2.5 * \frac{(IRCercano - ROJO)}{(IRCercano + 6 * ROJO - 7.5 * AZUL + 1)} \quad (2.5)$$

Donde:

EVI= Índice Mejorado de Vegetación

IRCercano = Infrarrojo cercano o visibles

ROJO = Rojo

AZUL = Azul

- **Índice de Vegetación - Suelo Ajustado (SAVI)**

Este índice es similar al NDVI, pero suprime los efectos de píxeles del suelo. Se utiliza un factor de ajuste de fondo de dosel, L, que es una función de la densidad de la vegetación y que a menudo requiere conocimiento previo de la cantidad de vegetación presente en el área. Huete (1988) sugiere un valor óptimo de $L = 0,5$ para dar cuenta del primer orden de variaciones de fondo del suelo. Este índice se utiliza mejor en zonas con vegetación relativamente escasa donde el suelo es visible a través del dosel.

Su cálculo es a través de la siguiente fórmula:

$$SAVI = \frac{1.5*(IRCercano-ROJO)}{(IRCercano+ROJO+0.5)} \quad (2.6)$$

Donde:

SAVI= Índice de Vegetación – Suelo ajustado

IRCercano = Infrarrojo cercano o visibles

ROJO = Rojo

Con el fin de poder realizar el cálculo de estos índices a través de las bandas disponibles en el set de imágenes capturadas tanto por el sensor RGB como el NGB, es necesario realizar su calibración y la conversión de esta información a valores de reflectancia. Este proceso fue realizado con los parámetros internos de la cámara a través del software Pix4dmapper.

- **Obtención del coeficiente de cultivo mediante fotografías aéreas.**

Con respecto al Kc se utiliza el Algebra de Mapas (calculadora de ArcGIS) y se aplica la ecuación propuesta por (Jochum 2003); es decir que multiplicamos el raster con sus valores de -1 y +1, entonces el programa se encarga de hacer la multiplicación y como resultado es otro raster con los valores calculados, en donde el programa se encarga estadísticamente de arrojar los valores máximos y mínimos de cada uno; es decir que no hay fórmula para calcular los valores máximos y mínimos.

- **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 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

- **Parámetros Biofísicos: fPAR, IAF, Fc, kc**

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.

- **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 (PAR_i) que es absorbida por las plantas (fAPAR = APAR/PAR_i, (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 seleccionaron dos para la comparación en el pronóstico de fPAR

Se llega con la aplicación de la ecuación propuesta por (Asrar en 1992):

$$fPAR = NDVI * 1.222 - 0.1914 \quad (2.7)$$

- **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 se llega con la ecuación propuesta por (Johnson 2003).

$$IAF = 5.7 * NDVI - 0.25 \quad (2.8)$$

- **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 se llega con la ecuación propuesta por (González – Piqueras, 2006).

$$(Fc) = 1.19 * NDVI - 0.16 \quad (2.9)$$

- **Coefficiente del Cultivo (Kc)**

Coefficiente 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 2003) Donde Kc, evapotranspiración del cultivo en condiciones óptimas de desarrollo.

$$Kc: 1.08 * NDVI + 0.22 \quad (2.10)$$

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 MATERIALES

3.1.1 Zona de estudio.

La presente investigación se realizó en los predios del Centro experimental del riego de la Facultad de Recursos Naturales Pertencientes a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo en Riobamba - Ecuador.



Figura N° 3.1: Ubicación Geográfica del ensayo

- Ubicación de la zona de estudio

Altitud: 2833 m.s.n.m.

Latitud: 1°39'18,82" S

Longitud: 78°40'39.99" O

Coordenadas: UTM 17S DATUM WGS84

X:758232 Y:981776

Fuente: Datos registrados con GPS

3.1.2 Características de la zona de estudio

- **Condiciones climatológicas**

Temperatura promedio: 13,4 °C

Precipitación media anual: 510 mm/año

Humedad relativa: 62,06 %

Fuente: Datos proporcionados por la Estación Meteorológica, ESPOCH (2015).

- **Clasificación ecológica**

Según Holdrige (1982) la localidad de la ESPOCH se encuentra en el rango de estepa espinosa montano bajo (EEMB).

3.1.3 . Información técnica de base.

La presente investigación se realizó en torno a las actividades enmarcadas del centro experimental del riego de la ESPOCH, para lo cual tiene firmado un convenio específico con el MAGAP – Subsecretaría de Riego y Drenaje para desarrollar investigación con respecto al riego en el Ecuador al momento se tiene montado toda la infraestructura y equipos de riego para llevar la investigación se tomó como base dos investigaciones anteriores desarrolladas en el CER.

- Proyecto específico es sobre seguridad alimentaria papa
Subproyecto: Mejoramiento genético para factores abióticos.
Título de la actividad: Evaluación de genotipos de papa *Solanum* sp. con resistencia al déficit hídrico
Objetivos: Evaluar y seleccionar genotipos de papa con resistencia al déficit hídrico.
Patrocinadores: SENPLADES
Fechas Inicio y Fin: 01/01/2011 - 31/12/2015
- En el año 2015 se realizó en el CER la investigación de diseño y calibración de lisímetros de drenaje.

- Informes anuales de estación meteorológica que se encuentra ubicado en la Facultad de Recursos Naturales de la ESPOCH.
- Informes anuales de estación meteorológica que se encuentra ubicado en la Facultad de Ciencias de la ESPOCH.

- **Características del suelo**

Cuadro N° 3.1: Contenido de nutrientes según el análisis de suelo.

NUTRIENTE	UNIDAD	VALOR	INTERPRETACIÓN
Nitrógeno	Ppm	29,00	Bajo
Fósforo	Ppm	31,00	Alto
Potasio	meq/100ml	0,28	Medio
Calcio	meq/100ml	8,40	Alto
Magnesio	meq/100ml	4,00	Alto
Materia orgánica	%	1,20	Bajo
PH		7,70	Ligeramente alcalino
Textura			Franco Arenoso

Fuente: INIAP (2015).

Los suelos del CER son de una textura franco arenosa, determinado capacidad de campo de 14%, punto de marchitez permanente de 7%, Agua Útil 7% y densidad aparente de 1.3 g cm³.

3.1.4 Materiales de campo y gabinete.

Campo

Lisímetros de drenaje, estación total, sistema de riego a goteo, semilla de papa certificada, herramientas de campo, insumos agrícolas, flexómetros, calibradores pie de rey, tensiómetros, juego de barrenos, capsulas para muestras de suelo, infiltrómetro de doble anillo, bandejas de escurrimiento, recipientes de control de retención, bloques de yeso, medidor de temperatura, estaciones meteorológicas portátiles, reglas

Gabinete

Estufa, recipientes de control de retención, medidor de clorofila, medidor de temperatura, GPS, Drone, cámara de fotos de alta resolución, laptop, ARGIS, SPSS, cuaderno de campo, impresora, Microsoft Word 2013, Microsoft Excel 2013, Google Earth

3.2 METODOLOGÍA

La metodología consistió en el desarrollo de dos fases como se muestra en el siguiente esquema.

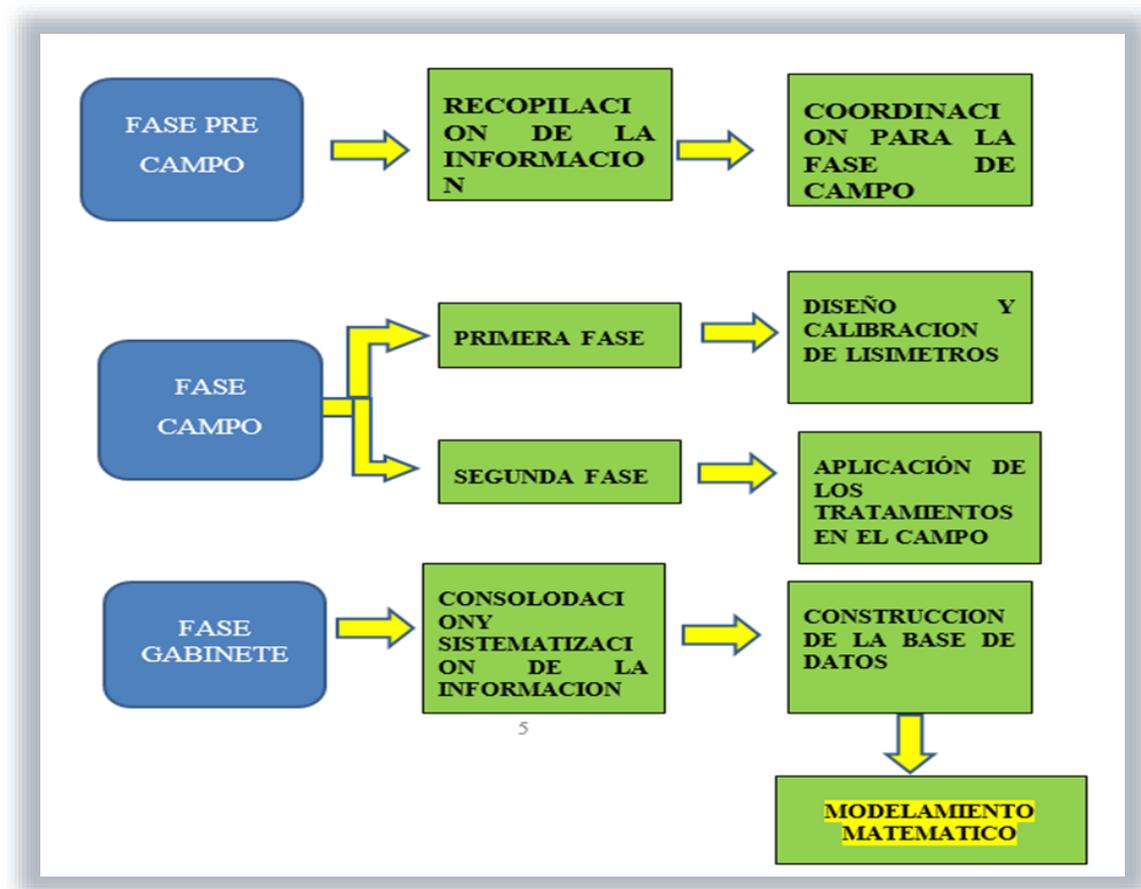


Figura N° 3.2: Generación de la expresión matemática.

3.2.1 Fase pre campo

La primera fase de todo el estudio consiste en la recopilación de información necesaria de las investigaciones realizadas en el cultivo de papa con referencia al agua de riego y requerimientos hídricos realizados en el país y fuera, como se indicó anteriormente las investigaciones realizadas en forma conjunta con el INIAP se tomó como punto de partida para la implementación de la investigación planteada.

- **Características del campo experimental**

Las características de la parcela experimentales se detallan en la Tabla 3.2, las mismas que se distribuyeron al azar en cada repetición y su disposición en el campo.

Cuadro N° 3.2: Característica del campo experimental

CARACTERISTICAS	
Número de tratamientos	3
Número de repeticiones	3
Número de unidades experimentales	9
Forma del ensayo	Cuadrado
Ancho del ensayo	34 m
Largo del ensayo	34 m
Área bruta del ensayo	1.156 m ²
Distancia de siembra	
Entre plantas	0,3 m
Entre hileras	1,0 m
Densidad poblacional	34.000 plantas/ha
Área total por parcela	9 m ²
Área bruta del ensayo	900 m ²
Ancho de cada parcela:	10 m
Largo de cada parcela	10 m
Área de cada parcela	100 m ²
Número de hileras por parcela	10
Número de plantas por hilera	34
Número de plantas/parcela	340
Número de plantas/parcela neta	48
Número de plantas evaluadas	10
Distancia entre parcelas	1,0 m
Efecto borde	1,0 m

- **Diseño experimental**
- **Análisis estadístico**

En el cuadro 3.3, se presenta el esquema del análisis de varianza.

Cuadro N° 3.3. Análisis de varianza (ANOVA)

F. de V	Formula	GL
Bloques	r-1	2
Tratamientos	a-1	2
Error	(a-1)(r-1)	4
Total	a(n-1)	8

Fuente: Juan León Ruiz.

- **Análisis funcional.**
 - Se determinó el coeficiente de variación, expresado en porcentaje.
 - Para separar medias se utilizó la prueba de Tukey al 5%.

- **Determinación de los parámetros hídricos del suelo**
 - Se determino Capacidad de Campo
 - Se determino Punto de Marchitez Permanente
 - Se determino Humedad disponible o aprovechable
 - Se determino Densidad Aparente
 - Se determino el riego inicial para llegar a Capacidad de Campo (Método gravimétrico)

3.2.2 Fase de campo (1)

La primera fase del proyecto de investigación es la construcción, calibración y selección de un lisímetro de drenaje, para lo cual se procedió a la construcción, instalación y calibración de 3 tamaños de lisímetros cilíndricos de drenaje.

- **Construcción, calibración y selección de lisímetros de drenaje**

Para la selección del tamaño de los lisímetros se tomó en consideración, la forma cilíndrica y cuadrada, la forma más común en el mercado nacional es la del cilindro en diferentes tamaños, de igual manera para determinar el tamaño se seleccionó de acuerdo al acceso al mercado y que sea de preferencia de material reciclado, es así que se adquirieron tanques de reserva de agua residencial en 3 tamaños, a los mismos que se procedió a recortar la tapa y ponerles de altura uniforme al tamaño del lisímetro más pequeño.



Figura N° 3.3: Construcción de lisímetros A, B y C

Cuadro N° 3.4: Tamaño de los lisímetros. (Cultivo papa primera campaña)

LISIMETRO CODIGO	Altura (m)	Área (m ²)	Volumen (m ³)	Numero de goteros	Número de plantas	Q l/h/gotero	Q l/h/lisímetro

A	0,8	1,86	1,448	20	8	0,23	4,57
B	0,8	0,57	0,456	6	4	0,23	1,37
C	0,8	0,26	0,208	3	1	0,23	0,69
D	0,8	0,26	0,208	3	PASTO	0,23	0,69

FUENTE: Juan León Ruiz

Como podemos observar en el cuadro anterior, se construyeron 3 tamaños de lisímetros en sus diferentes tamaños y volúmenes, se puso como constante la altura de los tanques cilíndricos manteniendo los en 0,8m, las áreas entre ellos son diferentes el más grande tiene un área de 1,86 m², el tamaño mediano de 0,57 m² y el tamaño estándar o pequeño de 0,26 m², de esto lógicamente se determina que el volumen varía entre ellos, de igual manera podemos observar dentro de los lisímetros se procedió a poner semillas de papa, y podemos determinar que en el lisímetro grande por su misma área se obtienen 8 plantas, mientras en el lisímetro mediano se colocaron 4 plantas en tanto que en el lisímetro estándar o pequeño en el uno se logró colocar una sola planta de papa, teniendo también un lisímetro estándar con pasto como cultivo de referencia.

- **Instalación de la línea de drenaje en los lisímetros**

Una vez definidos los tamaños construidos y adaptados a la base de cada uno de los lisímetros se procedió a instalar accesorios con tubería de 50 mm que servirá para el drenaje correspondiente.



Figura N° 3.4: Instalación de drenaje en lisímetro

- **Instalación de lisímetros de drenaje en el campo.**

Una vez contruidos los lisímetros con la línea de drenaje incluida, se procedió a definir los lugares y distancias que se ubicaran los lisímetros en el campo seleccionado.



Figura N° 3.5: Marcación ubicación para la implementación de los lisímetros

Una vez marcadas los lugares en donde se implementaran los lisímetros se realiza la determinación de la densidad aparente en capas de 0- 20 cm de 20 – 40 cm de 40 – 60 cm y de 60 – 80 cm, valiéndonos de un penetrometro, la primera capa se puso orientación norte la segunda capa orientación sur, la tercera capa orientación este y la última capa orientación oeste, con la finalidad de la misma orientación que salen se debe colocar en el lisímetro.





Figura N° 3.6: Determinación de compactación por capas.

Una vez realizado el hoyo completo a 80 cm de profundidad y del diámetro determinado con anterioridad se procede a colocar los lisímetros en cada hoyo, cuidando que la tubería de drenaje tenga pendiente para que permita el flujo del agua de drenaje



Figura N° 3.7: Instalación de los lisímetros en el suelo

Una vez ubicados los lisímetros en el suelo se procede a nivelar e igualar a la altura del suelo rellenando los bordes y confinándole al cilindro del lisímetro.



Figura N° 3.8: Nivelación de los lisímetros

Una vez nivelados y confinados los lisímetros se procede a realizar el relleno de los lisímetros, en el fondo del lisímetro se coloca una malla metálica con la finalidad de evitar que pase el material pétreo que se coloca en la capa a profundidad de 60 – 80 cm el material pétreo es de tamaño uniforme lo que permite que haga el drenaje necesario, de esta manera la capa de tierra que se sacó de 60 – 80 cm que se colocó en la orientación oeste al hoyo se desecha, luego de la capa de material pétreo se coloca otra malla metálica para evitar el paso de tierra, se empieza a colocar, la segunda capa correspondiente a los 40 – 60 cm tomando muestreando la densidad aparente con el penetrometro y apisonándole hasta lograr la misma densidad con la que salió dicha capa, de la misma manera se procede a colocar en el lisímetro las capas de 20 – 40 cm y de 0 – 20 cm.



Figura N° 3.9: Colocación de la malla filtro al fondo de cada lisímetro



Figura N° 3.10: Colocación de material pétreo en la base de los lisímetros



Figura N° 3.11: Compactación material pétreo lisímetro

Material pétreo utilizado en capa de 60 – 80 cm en la base de los lisímetros

Una vez que está colocada la capa de material pétreo en cada lisímetro se procede a realizar las pruebas hidráulicas de drenaje.



Figura N° 3.12: Pruebas de drenaje



Figura N° 3.13: compactación dentro del lisímetro

Una vez instalados los lisímetros nivelados, apisonados, confinados y realizadas las pruebas de drenaje se procede a taponar la tubería de drenaje y preparar en terreno.



Figura N° 3.14: Confinamiento de lisímetros

Una vez instalados los lisímetros en el suelo, se procedió a preparar el suelo, con la pasada de una rastra y nivelada de la parcela, incorporación de materia orgánica, se procedió a instalar el sistema de riego a goteo con goteros cada 15 cm, es de anotar que dentro del lisímetro se instala una doble cinta de riego, la misma que está alimentada por un tanque independiente para cada lisímetro con la finalidad de calibrar y darle el sobre riego y provocar el drenaje, se procedió a realizar la siembra de papa un bulbo cada 30 cm.



Figura N° 3.15: Instalación del riego a goteo.

Una vez instalados y sembrados los lisímetros en el campo se procedió a su calibración hidráulica y pruebas al vacío que consisten en:

- **Aplicación de láminas de agua uniformes.**

Dicha prueba consiste en aplicar un volumen de agua uniforme al suelo agrícola contenido en el lisímetro, que supere en 150% la evapotranspiración del cultivo (ETc) en su periodo de máxima necesidad hídrica; esto significa que se determinó la evaporación máxima

registrada con datos históricos en el CER ESPOCH y según fecha de siembra y proyectando la fecha de cosecha, se toma el dato de máxima evaporación, la que se multiplicara por el máximo coeficiente de cultivo (Kc) teóricos hallado en la investigación realizada en el CER en el cultivo de papa, o en su defecto se aplica una lámina de agua que permita el drenaje; posteriormente se determinó la relación de volumen de agua aplicado al lisímetro.

Cuadro N° 3.5: Aporte de agua por lisímetro.

LISIMETRO CODIGO	Área (m ²)	Kc máximo	Evaporación máxima mm/día	Lamina a aplicar mm/día	Volumen a aplicar m ³ /ha	m ³ día	Litros día por lisímetro
A	1,86	1,5	3,5	5,25	52,5	0,01468	14,68
B	0,57	1,5	3,5	5,25	52,5	0,004488	4,48
C	0,26	1,5	3,5	5,25	52,5	0,002047	2,04
D	0,26	1,5	3,5	5,25	52,5	0,002047	2,04

FUENTE: Juan León Ruiz.

El área de los lisímetros = 1,86 m².

Kc teórico máximo de papa = 1.5

Evaporación histórica máxima durante el desarrollo del cultivo = 3,5 mm/día

Lámina a aplicar = 1.5 * 3.5 = 5,25 mm/día

Volumen a aplicar = 5,25 * 10 = 52.5 m³/ha

Volumen de agua a aplicar al lisímetros = ((1,860 m² * 52,5 m³)/10000)*1.5)
= 0.01468 m³/día = 14,68 litros/día

Dicho volumen de agua calculado, se aplica uniformemente a toda la superficie de cada lisímetro, provocando que la infiltración en el mismo sea uniforme, para lo que se utiliza el riego por goteo utilizando cinta con goteros cada 15 cm y caudal de 0,23 litros hora gotero.



Figura N° 3.16: Puesta en Capacidad de Campo (CC) del suelo del lisímetro

Se aplicó un volumen de agua uniforme al suelo del lisímetro, que supere 4 veces la evaporación registrada el día anterior en el tanque Clase A (evaporación = 3,5 mm x 4 veces = 14 mm; como el lisímetro tiene un área de 1,86 m², se aplica una lámina de agua de 26,04 mm, equivalentes a un volumen de 26,04 litros de agua/lisímetro en el lisímetro grande), a fin de que el suelo entre en capacidad de campo (esto es que solo los microporos del suelo estén llenos de agua, lo cual se logra 24 horas de aplicada la lámina de riego señalada).

La prueba antes descrita es realizada para que el suelo del lisímetro se encuentre a capacidad de campo antes de la siembra del cultivo; y después de las aplicaciones del riego, el flujo de agua sea constante y garantice un drenaje permanente desde el inicio de la toma de datos.

- **Instalación del cultivo**

Puesto el lisímetro a capacidad de campo (CC), se verificó que el recipiente de drenaje del lisímetro este completamente vacío y sin aporte de agua (válvula de drenaje cerrada).

Se sembró la papa y luego se aplica el primer volumen de agua al lisímetro (volumen calculado y conocido)



Figura N° 3.17: Siembra en el lisímetro

Se abrió la válvula de agua del depósito de drenaje y a las 9.00 horas, se toma las lecturas del volumen drenado de cada lisímetro.



Figura N° 3.18: Drenaje de lisímetros

- **Aplicaciones de agua y toma de datos**

En forma diaria a horas 9:00 a.m. se aplica a los lisímetros un volumen de agua conocido y calculado, uniformemente para toda la superficie y se anota el volumen aplicado en un registro de datos.

En forma diaria a horas 9:00 a.m. se midió el volumen de agua drenado del lisímetro y se anota en un registro de datos. Inmediatamente se evacua y puesto el recipiente en cero para que acumule el volumen de la lectura del día posterior.

Dicha operación de toma de datos se realizará en forma diaria a los 3 lisímetros instalados.



Figura N° 3.19: Toma de volumen de drenaje de lisímetros.

- **Procesamiento de los datos**

Al final de la cosecha, se contó con datos diarios de volúmenes de agua aplicados a cada lisímetro y de volumen de agua drenados, cuya diferencia dará la Evapotranspiración del Cultivo (ET_c).

El lisímetro en los que se sembró Ray Gras, en el mismo periodo de tiempo del cultivo de papa, se contó con datos diarios de volúmenes aplicados en el lisímetro y de volumen drenado, cuya diferencia dará la Evapotranspiración de referencia (ET_o).

El coeficiente de cultivo K_c, se determina por el cociente de la ET_c entre la ET_o, el que se halla en forma diaria para el cultivo de papa.



Figura N° 3.20: Recipientes para dotar de sobre riego a los lisímetros

- **Instalación de medidores climatológicos y de humedad del suelo.**

En el campo dentro del área del ensayo se instaló una estación meteorológica portátil que tiene, pluviógrafo, anemómetro, medidor de temperaturas máximas y mínimas, nubosidad, humedad relativa.

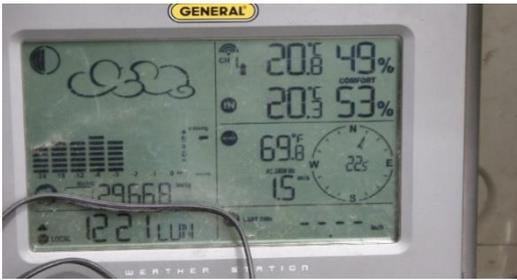


Figura N° 3.21: Data de estación meteorológica

De igual manera se potencializo el tanque de evaporación tipo A, así como un pluviógrafo y un pluviómetro.

En los lisímetros se instalaron tensiómetros a 15 – 30 – 40 y 60 cm, en los cuales se han toman lecturas diarias.



Figura N° 3.22: Instalación de tensiómetros en lisímetros.

Se toman muestras de suelo a los 15 – 30 – 45 y 60 cm, para determinar el contenido de humedad en el suelo y poder calibrar los tensiómetros.



Figura N° 3.23: Muestreo de suelo para determinar contenido de humedad.

Además se realizó las pruebas de velocidades de infiltración y retención utilizando los infiltrometros de doble anillo.



Figura N° 3.24: Pruebas de infiltración en lote de estudio

Se realizaron las pruebas de uniformidad y eficiencia del sistema de riego a goteo

3.2.3 Fase de campo (2).

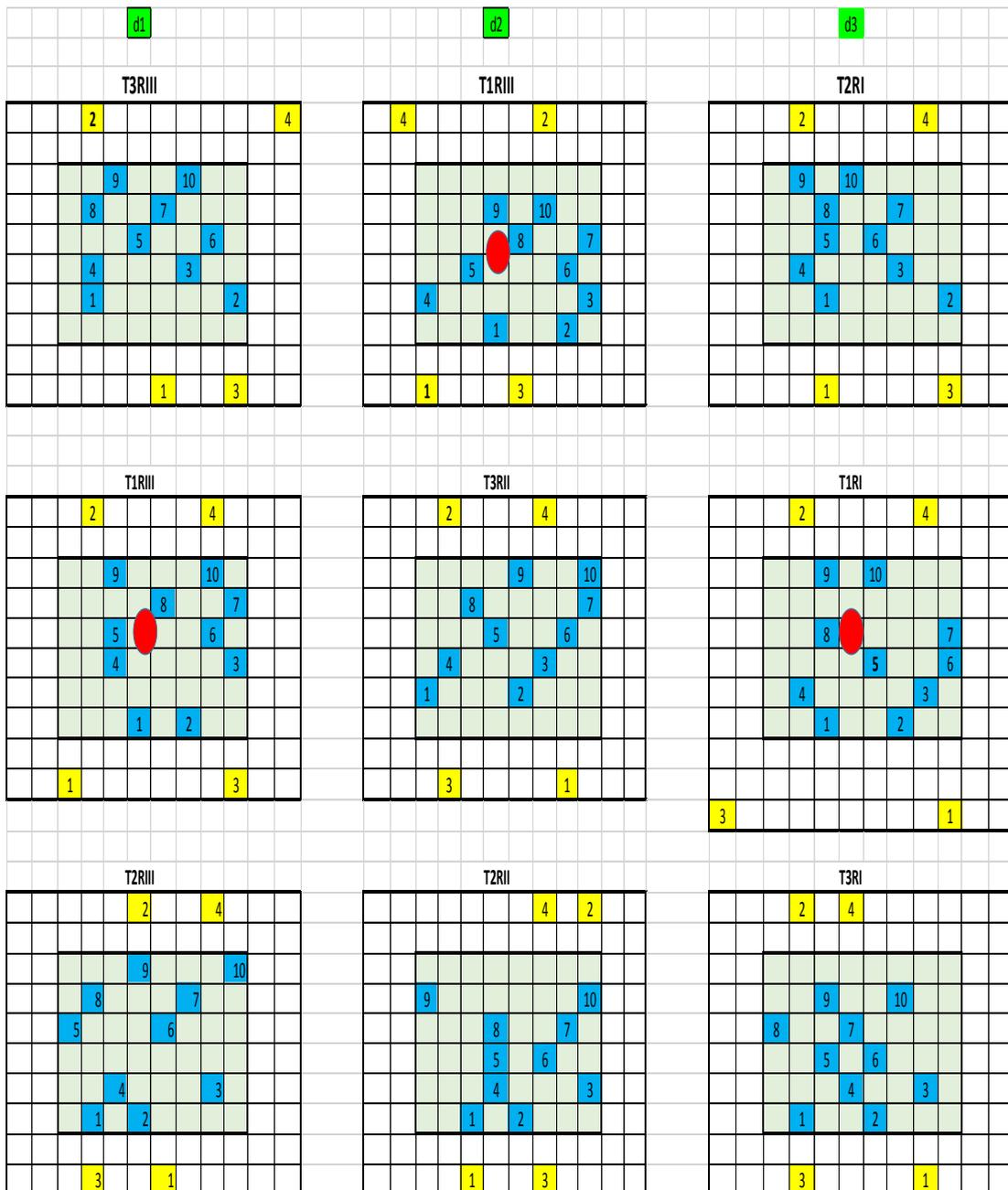
La segunda fase de campo consistió en la aplicación de los tratamientos con la siembra de papa y captura de imágenes con los sobrevuelos con dron.



Figura N° 3.25: Características del campo experimental.



Figura N° 3.26: Disposición del ensayo en el campo foto DRONE



Referencia:

Plantas de la parcela neta proporcionan información de: número de tallos, altura de la planta, diámetro del tallo, contenido de clorofila

Plantas fuera de la parcela neta 1 y 2 proporcionan información de: profundidad radicular; plantas 1, 2, 3 y 4 muestran información sobre tuberías

Lisímetros de drenaje

Valvulas de drenaje

Figura N° 3.27: Disposición del ensayo en el campo

La papa (*Solanum tuberosum* spp). Utilizada fue de la variedad Natividad un híbrido experimental, la cual proporcionó el INIAP (Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias) del 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, se utilizó una semilla por golpe o sitio de siembra, la misma que tuvo una uniformidad de peso aproximadamente de 60 gramos cada una.



Figura N° 3.28: Siembra en el lisímetro

El ciclo del cultivo duro 151 días de siembra a cosecha, 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 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.

En el tratamiento 1 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 que relleno en capas de cada 20 cm definiendo su compactación valiéndonos 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.

3.2.4 Información geoespacial obtenida con Drones.

Las mediciones para correlacionar los mapas obtenidos por detección remota y el estado fisiológico de la planta desde la siembra el 17 de marzo 2015, se recolectó información de la fenología (tuberización, emergencia, floración, profundidad radicular), además de otros

parámetros útiles al momento de evaluar la actividad fisiológica del vegetal como son el contenido de clorofila, altura de la planta, número de tallos y el diámetro de tallos.

Para la toma de datos se delimitó un área denominada parcela neta que contenía 48 plantas, de cada una de las 9 parcelas netas se seleccionó al azar:

- 10 plantas, de las cuales se evaluó el contenido de clorofila, altura de la planta, 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, floración, tuberización y senescencia se determinaron de las 48 plantas de cada parcela neta.

- **Determinación de parámetros biométricos y rendimiento del cultivo.**

- **Porcentaje de emergencia.**

Se contabilizó el número de plantas emergidas y se relacionó con el número de tubérculos sembrados en la parcela y se expresó en porcentaje, se considero el final de esta fase cuando el 70% de las plantas tenían sus 4 hojas verdaderas este parámetro se determino cada 3 días.



Figura N° 3.29. Toma de información de porcentaje de emergencia

- **Altura de planta.**

La altura se midió a partir del cuello del tallo que fue señalado previamente hasta el ápice del tallo, la información se tomó cada 8 días después de la siembra.



Figura N° 3.30. Toma de información de altura de planta

- **Diametro del tallo**

En las plantas muestras seleccionadas al azar al inicio de la brotación con similares características físicas entre ellas se señalaron a la base del cuello de la planta en cuatro tallos, a los mismos que se midieron el crecimiento en diámetro, esta lectura se realizó cada 8 días, la toma de la información se tomó siempre a la misma hora y con la misma polaridad.



Figura N° 3.31. Toma de información de diámetro del tallo

- **Numero de tallos**

En las plantas muestras seleccionadas al azar al inicio de la brotación con similares características físicas entre ellas se contabilizo el numero de tallos, esta lectura se realizo cada 8 dias.



Figura N° 3.32. Toma de información de número de tallos

- **Tuberización.**

Se contabilizó los días transcurridos desde la siembra hasta que el 70% de las plantas de la parcela neta, presentaron estolones con hinchamiento en su extremo. Los valores se expresaron en días después de la siembra (dds).



Figura N° 3.33. Toma de información de tuberización

- **Floración.**

Se contabilizó los días transcurridos desde la siembra hasta que el 70% de las plantas de la parcela neta presentaron flores abiertas. Los valores se expresaron en días después de la siembra (dds) la información se tomo cada 3 días.



Figura N° 3.34. Toma de información de días a la floración

- **Senescencia.**

Se contó el número de días transcurridos desde la siembra hasta cuando el 70% de las plantas de la parcela neta presentaron el follaje coloración café, los valores se expresaron en días después de la siembra (dds) la información se tomo cada 3 días.



Figura N° 3.35. Toma de información de días a la senescencia

- **Contenido de clorofila.**

Se midió el contenido de clorofila de las hojas con la ayuda de un medidor de clorofila MINOLTA SPAD-502, cada ocho días desde que presentaron las 4 hojas verdaderas hasta la senescencia la información se tomo cada 8 días.



Figura N° 3.36. Toma de información de contenido de clorofila

- **Profundidad radicular.**

Se midió cada 8 días desde la siembra hasta la cosecha.



Figura N° 3.37. Toma de información de profundidad radicular

RENDIMIENTOS Y SUS COMPONENTES.

- **Plantas cosechadas.**

Se contabilizó el número de plantas cosechadas dentro de la parcela neta.

- **Número de tubérculos por planta.**

Se tomó las plantas de la parcela neta, de las que se contabilizaron el número de tubérculos por planta y se realizó un promedio como dato final.

- **Rendimiento por planta.**

El rendimiento se calculó en base al peso total de los tubérculos a la cosecha de la parcela neta, dividida para el número de plantas cosechadas, el promedio se expresó en Kg/planta.

- **Rendimiento por tamaño del tubérculo.**

Para la determinación del rendimiento por tamaño del tubérculo se clasificó los tubérculos cosechados de la parcela total en cuatro categorías: papa comercial de primera (peso mayor a 60 g), papa para “semilla” de segunda (peso entre 30 a 60 g.) y papa de desecho (peso menor a 30 g). Los resultados se expresarán en Kg/categoría.

- **Rendimiento total.**

Se determinó cosechando la parcela neta de las tres repeticiones, la misma que se sumó y se sacó un promedio, el resultado se expresó en kg/parcela.

MEDICIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN PARA LOS TRATAMIENTOS

- **Con el lisímetro de drenaje**

La evapotranspiración se calculó a través del balance hídrico, teniendo en cuenta que la evapotranspiración es igual al volumen de ingreso del lisímetro menos el volumen de salida del lisímetro esto me da la diferencia misma que es dividida para el área del lisímetro, más la lluvia. Este procedimiento se realizó para todos los días del ciclo del cultivo.

- **Balance Hídrico.**

El balance hídrico se determinó con la calibración al vacío de los lisímetros utilizando las formulas

Entradas = Sumatoria (salidas) + A (Cambio de almacenamiento en el sistema)

$$\mathbf{R = ETA + D + A} \quad (3.1)$$

R = Agua agregada por riegos o lluvias

ETA = Evapotranspiración actual o real del cultivo en estudio para un periodo considerado

D = Agua de drenaje durante el periodo de análisis dada por:

$$\mathbf{D = N2 - N1} \quad (3.2)$$

N2 y N1 = niveles de agua en el percolante, correspondiente al último primer día de periodo considerado.

A = Variación del contenido de humedad en el sistema.

$$\mathbf{ETA = R - D} \quad (3.3)$$

Cálculo del volumen a aplicar en el lisímetro de drenaje

$$\mathbf{Va = (ETp * ND * Al) c} \quad (3.4)$$

Va = Volumen aplicado

ETp = Evapotranspiración

ND = Número de días que hay de un riego a otro

Al = Área del lisímetro

C = Coeficiente de seguridad para efectuar el riego hasta causar percolación.

En este trabajo de investigación se utilizaron tres estaciones meteorológicas, la primera se instaló una estación 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 procede a subir la altura cada 8 días de acuerdo a la dinámica de crecimiento de las plantas en estudio, para tener la información en tiempo real de velocidad y dirección del viento. Esta estación meteorológica posee sensores para medir la temperaturas, humedad

relativa, velocidad del viento y precipitación, además se cuenta 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.

La segunda 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.

La tercera estación Agro meteorológica utilizada pertenece a la Facultad de Recursos Naturales ESPOCH - INAMHI, 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.

- **Aplicación de riego**

Para el riego se instaló un cabezal a presión en el que consta de una bomba eléctrica, un juego de manómetros, un filtro de grava, un filtro de malla, un filtro de anillos de 120 mesh respectivamente y un inyector venturi automático, para la distribución en cada parcela se instaló una válvula para poder controlar la dotación de agua en tiempos de acuerdo a cada uno de los tratamientos y sus repeticiones, se utilizó una cinta de riego de 16 mm auto compensada 8 Mil (espesor de 200 micrones) TORO AQUETRAXX, con goteros cada 0.3 m, se manejó una presión de trabajo de 15 psi, en las pruebas de uniformidad se logró obtener un caudal de 3.35 litros metro hora, se colocó la cinta de riego superficialmente una fila por cada hilera de plantas, la frecuencia de riego se determinó cuando el agotamiento permisible del agua útil consumió el 30%, para lo cual la tensión de humedad en el suelo se midió con tensiómetros previamente calibrados con el método gravimétrico mismos que fueron

instalados en el campo en cada uno de los tratamientos a profundidades de 15 - 30 y 45 cm respectivamente. Las láminas de riego aplicadas dependieron de la medición de cada tratamiento que se detalla en el cuadro 3.6.

Cuadro N° 3.6: Láminas de riego aplicadas

Tratamiento	Método	Descripción
T1	Método 1	Reposición de la lámina de riego dado por el lisímetro.
T2	Método 2	Reposición de la lámina de riego dado por Tanque tipo A
T3	Método 3	Reposición de la lámina de riego dado por Fórmula.

FUENTE: Juan León Ruiz

3.2.5 Fase de gabinete

3.2.6 Consolidación y procesamiento de datos:

Esta prueba tiene como finalidad obtener un mapa de ET_c instantánea como resultado de la aplicación de la ecuación 3 mencionada en (Allen, Pereira, Raez, & Smith, 2006, pág. 89):

$$K_c = \frac{ET_c}{ET_o} \quad (3.5)$$

- **Medición de la Evapotranspiración Tanque evaporímetro tipo A**

Para el tratamiento dos se utilizó el tanque de evaporación tipo A, que nos permite determinar la evaporación en forma manual en unidades de mm/día, cuyo valor se utiliza en la fórmula 3.6 mencionada por (Allen, Pereira, Raez, & Smith, 2006, pág. 79):

$$ET_o = K_p * E_{pan} \quad (3.6)$$

Donde

ET_o evapotranspiración de referencia [mm día⁻¹],

K_p coeficiente del tanque evaporímetro [-],

E_{pan} evaporación del tanque evaporímetro [mm día⁻¹].

- **Medición de la Evapotranspiración de forma indirecta.**

La ecuación de FAO Penman-Monteith es una representación simple de los factores físicos y fisiológicos que gobiernan el proceso de la evapotranspiración, (Allen, Pereira, Raez, & Smith, 2006, pág. 25), fue desarrollado haciendo uso de la definición del cultivo de referencia como un cultivo hipotético con una altura asumida de 0,12 m, con una resistencia superficial de 70 s m⁻¹ y un albedo de 0,23 y que representa a la evapotranspiración de una superficie extensa de pasto verde de altura uniforme, creciendo activa y adecuadamente regado.

Empleamos la ecuación 3.7 mencionada por (Allen, Pereira, Raez, & Smith, 2006, pág. 25) para determinar la ETo:

$$ET_0 = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1+0,34 u_2)} \quad (3.7)$$

Donde:

ET ₀	evapotranspiración de referencia (mm día ⁻¹)
R _n	radiación neta en la superficie del cultivo (MJ m ⁻² día ⁻¹)
R _a	radiación extraterrestre (mm día ⁻¹)
G	flujo del calor de suelo (MJ m ⁻² día ⁻¹)
T	temperatura media del aire a 2 m de altura (°C)
u ₂	velocidad del viento a 2 m de altura (m s ⁻¹)
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 ⁻¹) constante psicrométrica (kPa °C ⁻¹)

Los métodos para calcular la evapotranspiración partiendo de datos meteorológicos requieren de varios parámetros climatológicos y físicos. Algunos de estos parámetros se miden directamente en estaciones meteorológicas. Otros parámetros se relacionan con los datos comúnmente medidos y se pueden derivar con la ayuda de relaciones directas o empíricas mencionado por (Allen, Pereira, Raez, & Smith, 2006, pág. 29).. Usando la definición de ETo sobre la que se basa la ecuación FAO Penman-Monteith, se pueden determinar los coeficientes del cultivo relacionando la evapotranspiración medida del cultivo (ET_c) con la ETo calculada, es decir: K_c = ET_c/ETo. (Allen, Pereira, Raez, & Smith, 2006, pág. 25).

Para llevar adelante cálculos diarios, semanales, de diez días o mensuales de ETo, además de la localización del sitio (altura sobre el nivel del mar (m) de la zona para la que se determina la ETo y su latitud (grados norte o sur)), la ecuación FAO Penman-Monteith requiere datos de temperatura del aire, humedad atmosférica, radiación y velocidad del viento (Allen, Pereira, Raez, & Smith, 2006, pág. 27).

3.2.7 Generación del modelo de Kc.

- **Levantamiento de fotografía aérea y determinación de Índices de Vegetación**

Para levantar fotografía aérea georreferenciada de las 9 Parcelas de 10 x 10 m, (aprox. 1000 m²) se usó un sistema aéreo no tripulado drone con equipo fotográfico incorporado de alta resolución con dos tipos de sensor uno RGB (Rojo Verde Azul) y el segundo NGB (Infrarrojo, Verde y Azul).

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.



Figura N° 3.38. Sobrevuelo del DRONE

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 0.96. Para medir la clorofila se utilizó un medidor Minolta.



Figura N° 3.39: Toma de información con termómetro infrarrojo

La zona de estudio comprendió un grupo de 9 parcelas ubicado en los predios de la ESPOCH en la cota 2850 m.s.n.m. El área de interés (AOI) corresponde a un área total de aprox. 1000 m², que corresponden a la siguiente Figura.



Figura N° 3.40: Puntos de Control captadas con DRONE

Se definieron 4 puntos de control a partir del GPS de precisión métrica sin post proceso, con el fin de realizar un ajuste en el post-proceso para la generación del ortofotomosaico. El cuadro 3.7 contiene los datos en latitud, longitud y altura de los 4 puntos tomados. Todos y cada uno de los puntos fueron marcados con postes pintados de color blanco en el terreno

para que el reconocimiento en el proceso fotogramétrico por parte del software sea mucho más eficiente.

Cuadro N° 3.7: Puntos de control.

Label	Type	X [m]	Y [m]	Z [m]	Accuracy Horz [m]	Accuracy Vert [m]
mtp4	3D GCP	758016.835	9817330.365	2850.000	0.020	0.020
mtp3	3D GCP	758035.986	9817300.552	2850.000	0.020	0.020
mtp2	3D GCP	758064.515	9817320.296	2850.000	0.020	0.020
mtp1	3D GCP	758047.240	9817353.365	2850.000	0.020	0.020

FUENTE: Pablo Melo



Figura N° 3.41: Puntos de control captadas con DRONE



Figura N° 3.42: Puntos de control en campo captadas con DRONE

- **Preparación de Equipo – calibración**

En la etapa de preparación y calibración se realizó el ensamblaje del vehículo aéreo, calibración de control remoto, conexión de telemetría, revisión de cargas y punto de equilibrio.

- **Generación del plan de vuelo**

En base a las coordenadas de referencia (AOI) y de los puntos de control previamente tomados se definió en el software del plan de vuelo el patrón de vuelo para cubrir el área de interés. En este caso se efectuaron dos vuelos manuales asistidos por telemetría de acuerdo al patrón generado. En la figura 3.43 se puede observar la definición del plan de vuelo de acuerdo al área de interés. Los puntos con una cruz azul corresponden a los extremos de las parcelas, mientras que los puntos verdes representan los lugares desde donde se efectuaron las fotografías

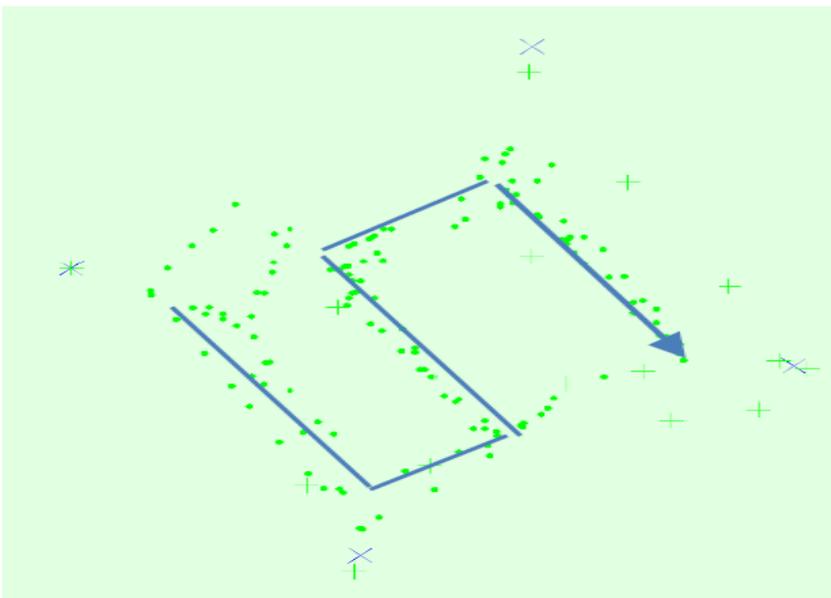


Figura N° 3.43: Plan de vuelo

Los vuelos se realizaron a una altura de 20 metros sobre la superficie del lugar de despegue, los vuelos se planificaron con el objetivo de realizar tomas cada 2 segundos para garantizar una buena sobre posición frontal y lateral entre foto y foto.

- **Toma de fotografía**

En cada sobre vuelo, se efectuaron 2 sesiones de fotografía con una duración aproximada de 5 minutos la primera sesión, y una segunda sesión con una duración aproximada de 6 min. En total se tomaron 151 fotos que cuentan con una referencia geográfica (geotag).

- **Control de calidad de fotos**

Debido a la capacidad de carga útil de la mayoría de los pequeños vehículos aéreos no tripulados, las imágenes a menudo adquiridas con sistemas de este tipo son cámaras digitales sencillas con pequeñas adaptaciones. Las imágenes de las cámaras de este tipo tienen una mayor distorsión en comparación con las imágenes de las cámaras de mapeo tradicional, y por lo tanto se requiere una calibración de la cámara para determinar los parámetros específicos de la misma (Laliberte et al., 2008) Si suficientes puntos de control en tierra de buena precisión están disponibles, un paquete de ajuste de auto-calibración se puede ejecutar mejorando la precisión de la fotografía. (Wu et al., 1995).

En primera instancia se realizó una pre evaluación de las fotos, una calibración y control inicial previo a la generación del ortofotomosaico. Del total de 151 fotos tomadas, 137 pasaron el control (90 %), las cuales fueron seleccionadas para la etapa de orto rectificación.

Procesamiento y calibración inicial de fotos respecto a la altura de vuelo. En relación a la altura de vuelo (20 m) y de los datos de posición de cada una de las fotos, se generó el procesamiento inicial y cálculo de resolución óptima (0.62 cm/pixel). Un área cubierta total de 2000 m² fue ejecutada durante los 2 vuelos. El procesamiento de los datos se los realizo utilizando el sistema de coordenadas WGS 84 UTM zona 17S.

- **Generación de la nube de puntos (densificada y filtrada)**

A partir de los datos de geolocalización incluidos en las fotos se realizó el cálculo de alturas relativas del terreno, con el fin de generar la nube de puntos de amarre o empate entre imágenes. Ver Figura 3.44. Una vez generada la nube de puntos de amarre, se crea la nube de puntos densificada.

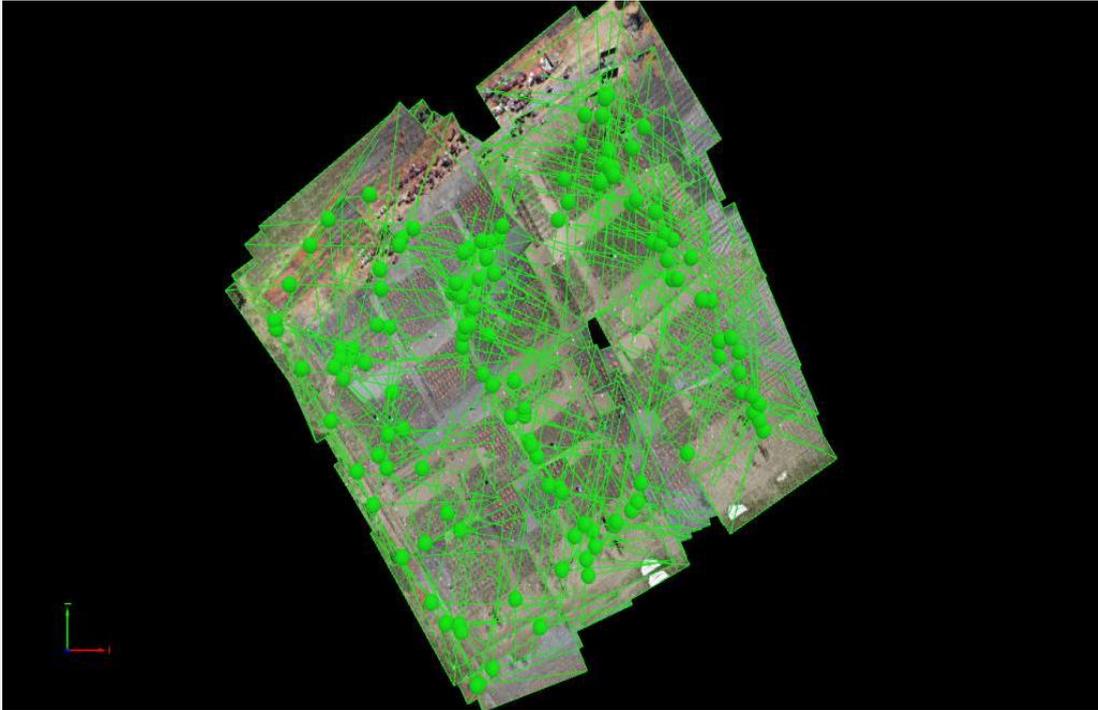


Figura N° 3.44: Patrón de vuelo y set georreferenciado de las tomas captadas con DRONE

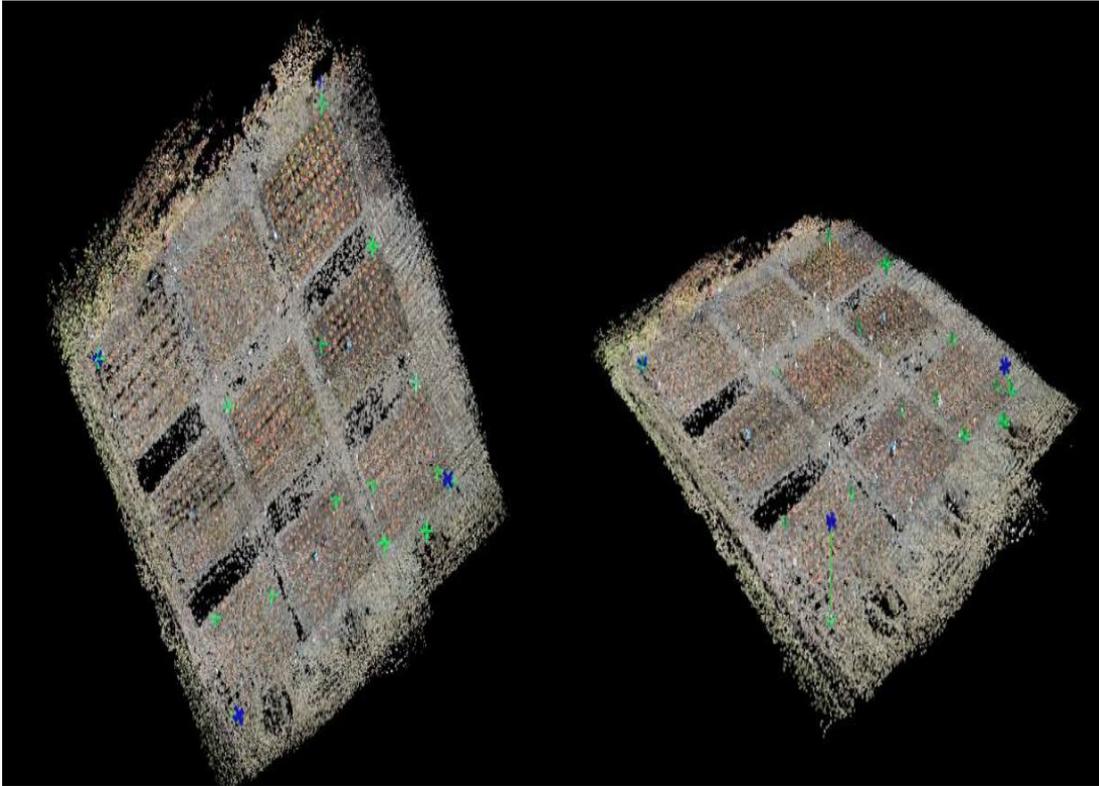


Figura N° 3.45: Nube de puntos de amarre

Desde vista azimutal y lateral. Puntos azules en la imagen corresponden a los puntos de control - captadas con DRONE

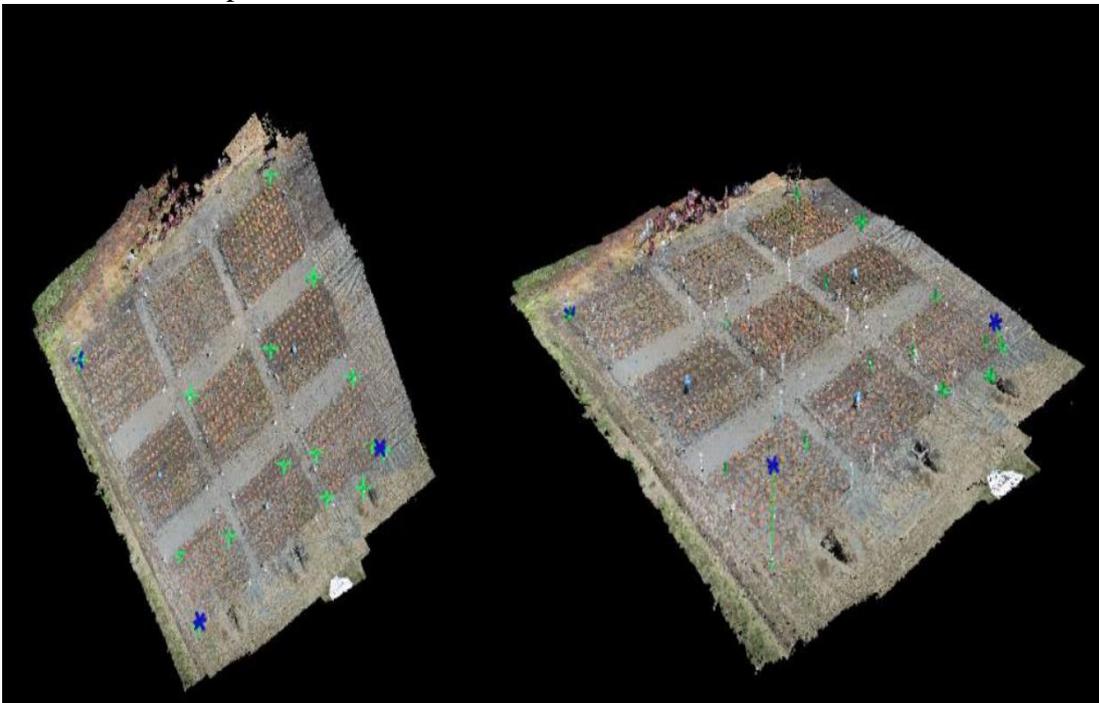


Figura N° 3.46: Nube de puntos densificada y filtrada en vista azimutal y vista lateral.
- captadas con DRONE

- **Generación del modelo digital de superficie (DSM) y del modelo digital del terreno (DTM).**

En base a la estructura de la nube de puntos se genera el modelo digital de superficie (DSM), que corresponde a un modelo numérico continuo que representa las alturas del terreno y de los objetos superficiales (construcciones, vegetación, etc.). (Figura 3.47). En este caso a través del DSM, se pueden observar tanto las características del terreno como de la vegetación.

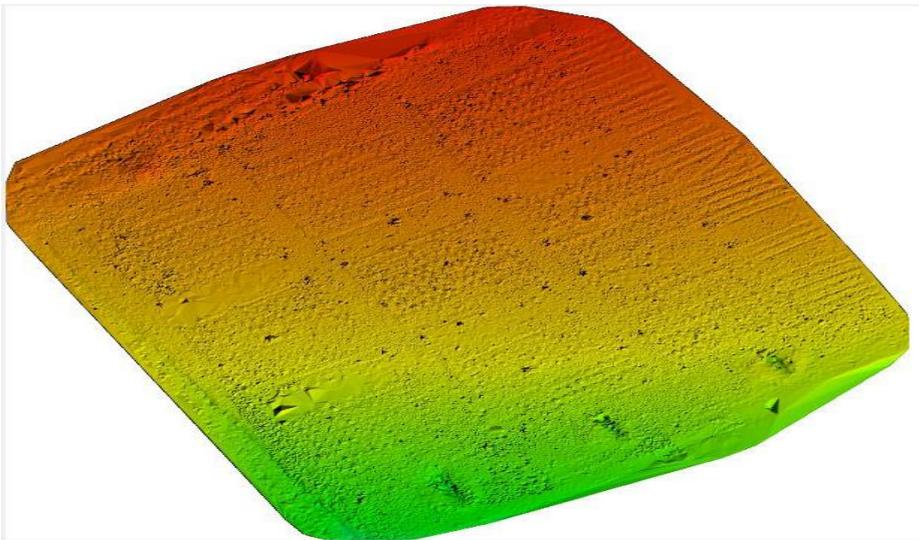


Figura N° 3.47: Modelo Digital de Superficie (DSM) del Área de Interés

- **Generación del ortofotomosaico**

A partir del set de fotos calibradas, se realizó el proceso de orto rectificación de las imágenes con ayuda de los puntos de control en tierra (GCPs). 4 puntos se utilizaron para la ortorectificación y geoposicionamiento del fotomosaico. Se estableció el emparejamiento o matching de las imágenes a partir de los puntos de control y del número de fotos sobrepuestas sobre las escenas (overlapping)

El color rojo representa el menor número de imágenes sobrepuestas, mientras que verde corresponde a un mayor número de imágenes tomadas sobre el área

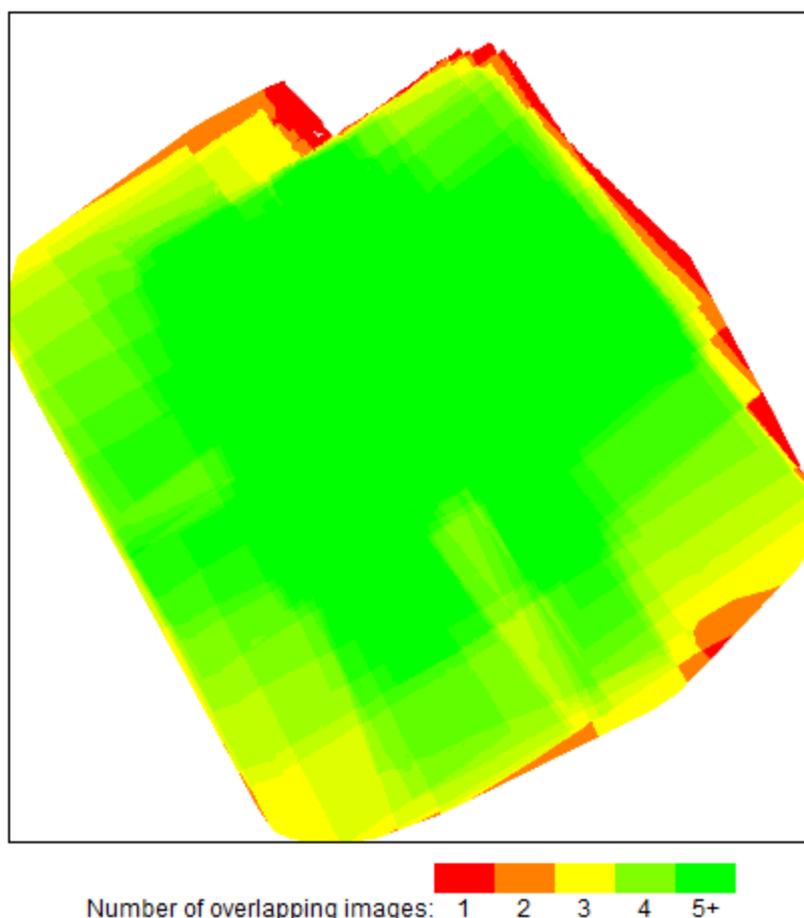


Figura N° 3.48. Número de imágenes con superposición entre ellas

Cuadro N° 3.8: Precisión de localización.

GCP Name	Accuracy XYZ [m]	Error X [m]	Error Y [m]	Verified/Marked
mtp1 (3D)	0.020/ 0.020	0.266	2.575	16 / 16
mtp2 (3D)	0.020/ 0.020	-0.923	0.322	11 / 11
mtp3 (3D)	0.020/ 0.020	0.429	1.658	7 / 7
mtp4 (3D)	0.020/ 0.020	-0.010	-0.007	12 / 12
Mean		-0.059376	1.136902	
Sigma		0.522689	1.038508	
RMS Error		0.526051	1.539820	

FUENTE: Pablo Melo

Precisión de localización por GCP y error medio en las dos direcciones de coordenadas (X, Y). La última columna cuenta el número de imágenes en el que el GCP ha sido verificado automáticamente vs el marcado manualmente. Una vez validados los GCP se puede realizar la orto rectificación y por lo tanto el empate final de imágenes para la generación del ortofotomosaico.



Figura N° 3.49: Ortofotomosaico del área de interés (AOI) captadas con DRONE

- **Generación de los Índices de Vegetación**
 - **Índice Normalizado de Vegetación (NDVI)**

Su cálculo es a través de la siguiente formula:

$$NDVI = \frac{(IRCercano - ROJO)}{(IRCercano + ROJO)} \quad (3.8)$$

Donde:

NDVI= Índice Normalizado de Vegetación

IRCercano = Infrarrojo cercano o visibles

ROJO = Rojo

- **Índice Mejorado de Vegetación (EVI)**

Su cálculo es a través de la siguiente fórmula:

$$EVI = 2.5 * \frac{(IRCercano - ROJO)}{(IRCercano + 6 * ROJO - 7.5 * AZUL + 1)} \quad (3.9)$$

Donde:

EVI= Índice Mejorado de Vegetación

IRCercano = Inflarrojo cercano o visibles

ROJO = Rojo

AZUL = Azul

- **Índice de Vegetación - Suelo Ajustado (SAVI)**

Su cálculo es a través de la siguiente fórmula:

$$SAVI = \frac{1.5 * (IRCercano - ROJO)}{(IRCercano + ROJO + 0.5)} \quad (3.10)$$

Donde:

SAVI= Índice de Vegetación – Suelo ajustado

IRCercano = Inflarrojo cercano o visibles

ROJO = Rojo

Con el fin de poder realizar el cálculo de estos índices a través de las bandas disponibles en el set de imágenes capturadas tanto por el sensor RGB como el NGB, es necesario realizar su calibración y la conversión de esta información a valores de reflectancia. Este proceso fue realizado con los parámetros internos de la cámara a través del software Pix4dmapper.

En base a las fórmulas descritas anteriormente se obtuvieron 3 capas de información cada una representando los índices de NDVI, EVI y SAVI, el resultado de estos índices se observan en las Figuras. 3.51.- 3.52 – 3.50

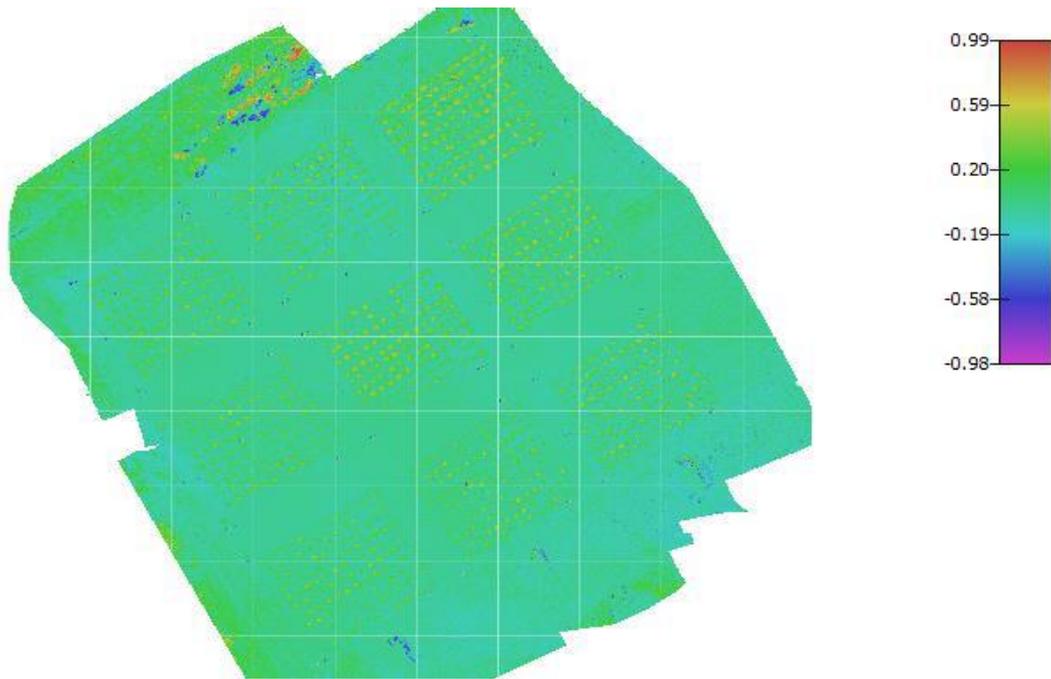


Figura N° 3.50: Mapa SAVI

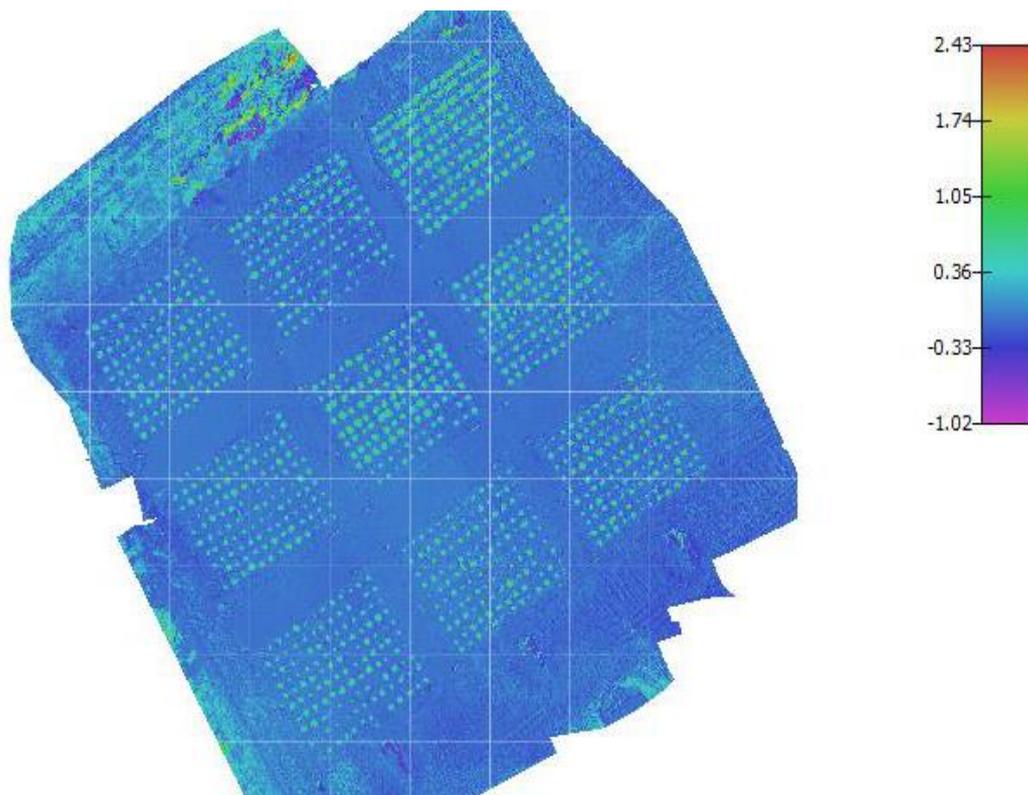


Figura N° 3.51: Mapa NDVI

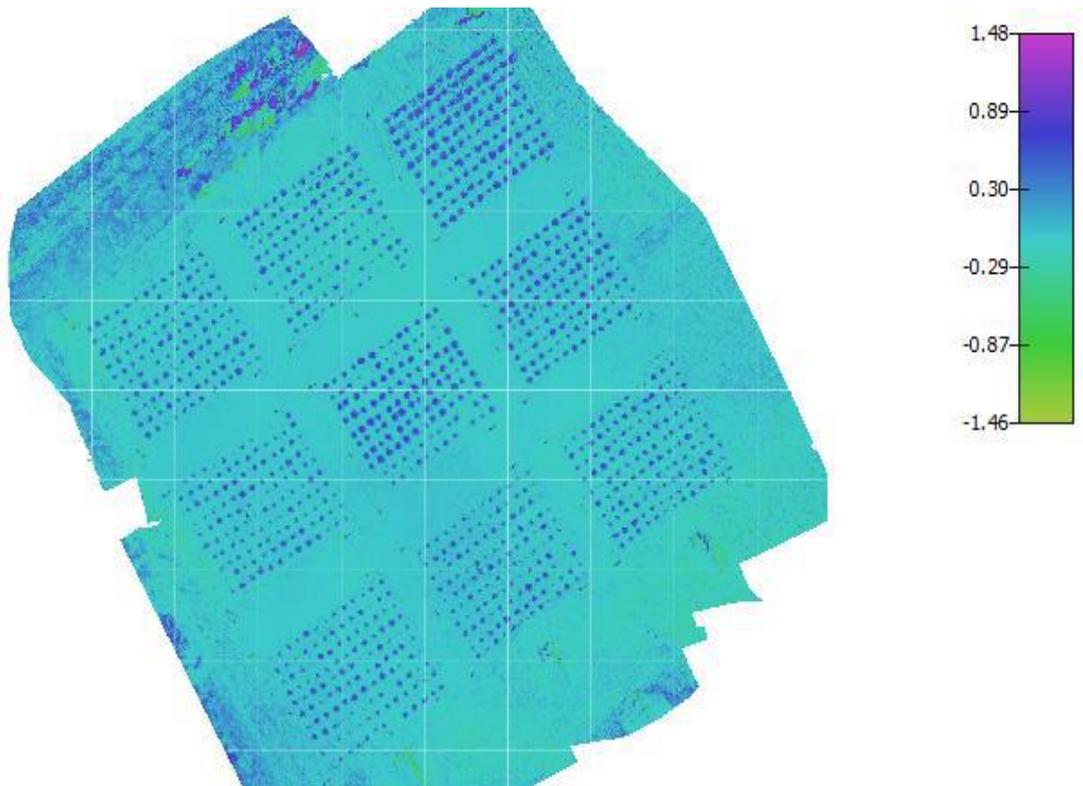


Figura N° 3.52: Mapa EVI

- **Obtención del coeficiente de cultivo mediante fotografías aéreas.**

Con respecto al Kc se utiliza el Algebra de Mapas (calculadora de ArcGIS) y se aplica la ecuación propuesta por (Jochum 2003); es decir que multiplicamos el raster con sus valores de -1 y +1, entonces el programa se encarga de hacer la multiplicación y como resultado es otro raster con los valores calculados, en donde el programa se encarga estadísticamente de arrojar los valores máximos y mínimos de cada uno; es decir que no hay fórmula para calcular los valores máximos y mínimos.

- **Índice de Vegetación de Diferencias Normalizado (NDVI)**

Se empleó el Índice Normalizado Diferencial de Vegetación (NDVI), obtenido de la ecuación (3.8).

Dónde IRCercano y ROJO son las reflectancias en el Infrarrojo cercano y en la banda del rojo.

Para la obtención de las bandas IRCercano y ROJO, se realizaron tomas fotográficas 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

Con esta información se realizó el cálculo de un mapa de NDVI de las parcelas de estudio mediante una combinación de bandas IRCercano y ROJO en ARCGIS según la ecuación 3.8, y con este mapa a su vez se obtuvo el mapa de Kc aplicando la formula 3.14

- **Parámetros Biofísicos: fPAR, IAF, Fc, kc**

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, 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.

- **Fracción de radiación fotosintéticamente absorbida por la cubierta (fAPAR).**

Se llega con la aplicación de la ecuación propuesta por (Asrar en 1992):

$$fPAR = NDVI * 1.222 - 0.1914 \quad (3.11)$$

- **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 se llega con la ecuación propuesta por (Johnson 2003).

$$IAF = 5.7 * NDVI - 0.25 \quad (3.12)$$

- **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 se llega con la ecuación propuesta por (González – Piqueras, 2006).

$$(Fc) = 1.19 * NDVI - 0.16 \quad (3.13)$$

- **Coefficiente del Cultivo (Kc)**

Coefficiente 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.

$$Kc: 1.08 * NDVI + 0.22 \quad (3.14)$$

- **Pruebas experimentales para determinar la ETc.**

Las pruebas experimentales para determinar Etc. información proveniente de lisímetros de drenaje, tanque de evaporación tipo A e información meteorológica, en la investigación se empleó la información recogida al dar seguimiento a los tratamientos y repeticiones utilizadas para determinar el requerimiento hídrico del cultivo de papa variedad Natividad.

La Eto se calculó mediante el lisímetro sembrado con ray grass y la ecuación FAO Penman Monteith con los datos de la estación meteorológica automática ESPOCH-CER para la obtención de ETo y se empleó datos tabulados de Kc, para posteriormente aplicar la ecuación 3.9 mencionada en (Allen, Pereira, Raez, & Smith, 2006, pág. 89) y determinar la ETc del cultivo.

Se presentan la metodología para la cuantificación del estado hídrico de la vegetación, está basada en el uso de imágenes multispectrales de alta resolución y bandas de 1 nm de ancho

para la detección de la fluorescencia clorofílica, parámetro éste relacionado con la fotosíntesis de la planta y que ha sido propuesto como indicador de su estado hídrico. Se ha utilizado lectura directa para determinar la influencia de factores como el contenido de clorofila y el índice de área foliar utilizando el equipo medidor de clorofila que arroja la información en spad.

La metodología utiliza imágenes térmicas e infrarrojas junto con datos meteorológicos para cuantificar la conductancia de la cubierta aplicando un balance de energía a nivel de copa. Esto permite la generación de mapas de conductancia y por lo tanto mostrar la distribución espacial del estrés hídrico.

La metodología se ha validado con medidas de campo, mostrándose como buenos indicadores del nivel de contenido de humedad en el suelo en vegetación y demostrando la viabilidad para su cuantificación mediante plataformas no tripuladas. El uso de estas metodologías, junto con el uso de vehículos aéreos no tripulados, que permiten una alta resolución espacial y temporal, supondrá un avance cualitativo en la aplicación de metodologías de teledetección cuantitativa en agricultura, posibilitando el desarrollo de aplicaciones que permitan la gestión eficiente del riego en cultivos agrícolas.

3.2.8 Generación de las expresiones matemáticas

Como sabemos que la medición de la E_{Tc} del lisímetro es exacta, tomamos como referencia los NDVI del lisímetro para ser llevados los valores de los otros dos métodos estudiados a valores del K_c del lisímetro, los valores reales del lisímetro son 0.67 para la fase inicial, 0.99 para la fase de desarrollo, 1.05 para la fase intermedia y 0.84 para la fase final o senescencia

El modelo para determinar el K_c calculado con agua repuesta con medida con el lisímetro de drenaje, del tanque de evaporación clase A y fórmula empírica se resume en:

K_c Lisímetro = $f(\text{NDVI lisímetro})$

K_c Tanque = $f(\text{NDVI Tanque})$

K_c fórmula = $f(\text{NDVI fórmula})$

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

El modelo se validó con la disponibilidad de datos e información de los cuatro sobrevuelos así como de las estaciones agras meteorológicas. Se obtuvieron mediciones del flujo de calor del suelo y de las temperaturas del aire, los cuales se usaron para estimar los Kc para cada fecha y realizar la validación del modelo.

Los resultados del modelo se compararon con las mediciones reales de flujo de calor del suelo. Se comparó la estimación de la evapotranspiración calculada por el método de lisímetro de drenaje, tanque de evaporación clase A y la formula empírica de Penman Monteith con datos reales de flujo de calor del suelo y la Et calculado con el mismo método pero usando el flujo de calor del suelo obtenido estimado por el modelo propuesto. Se utilizó para este terreno una difusividad térmica de $1100 \times 10.6 \text{ m}^2/\text{hr}$. y una conductividad térmica de 0.6 W/m^2 .

Luego de realizar el ordenamiento y tabulación de la información se presentan los resultados planteados en la presenta investigación de los parámetros en cada uno de los tratamientos que son:

T1 la reposición del agua de riego de acuerdo a la medida que nos da el Lisímetro de drenaje,
T2 la reposición del agua de riego de acuerdo a la medida que nos da tanque de evaporación tipo A.

T3 la reposición del agua de riego de acuerdo a la medida que nos da las fórmulas empíricas

Estos tratamientos correlacionados con imágenes en el infrarrojo cercano y rojo, captadas con el drone, se logró definir 4 mapas de parámetros biométricos que son: Índice de Vegetación Diferencial Normalizado (NDVI), Fracción de Radiación fotosintéticamente activa absorbida por la cubierta (Fc), Fraccion de radiación fotosinteticamante activa (fPAR), Indice de área foliar (IAF), se logró definir el mapa de Kc correspondientes a cada

sobrevuelo, los mapas se definieron con espaciamento de cada 30 días calendario que fueron: 17 de abril, 17 de mayo, 17 junio y 17 de julio del 2015.

Para cumplir con los objetivos de la investigación se tomó información de la fenología del cultivo para determinar las cuatro fases que propone la FAO. Como resultado final se obtuvo la curva de crecimiento y desarrollo identificando las cuatro fases de la papa en cada uno de los tratamientos que más adelante se discute, de igual manera para poder correlacionar la información arrojada con las fotografías aéreas captadas con el dron se procedió a recabar información de los parámetros biométricos como altura de planta, diámetro del tallo, número de tallos, profundidad radicular, contenido de clorofila y finalizando con rendimiento. Es necesario indicar que la información de los parámetros indicados en la fecha de siembra es el inicio y no tiene valor, de igual que la lectura final que tiende a tener el valor mas bajo esta decrece por la misma fisiología de la planta esta tendencia no está reportada.

4.1 RESULTADOS PARAMETROS BIOMÉTRICOS.

4.1.1 Altura de planta

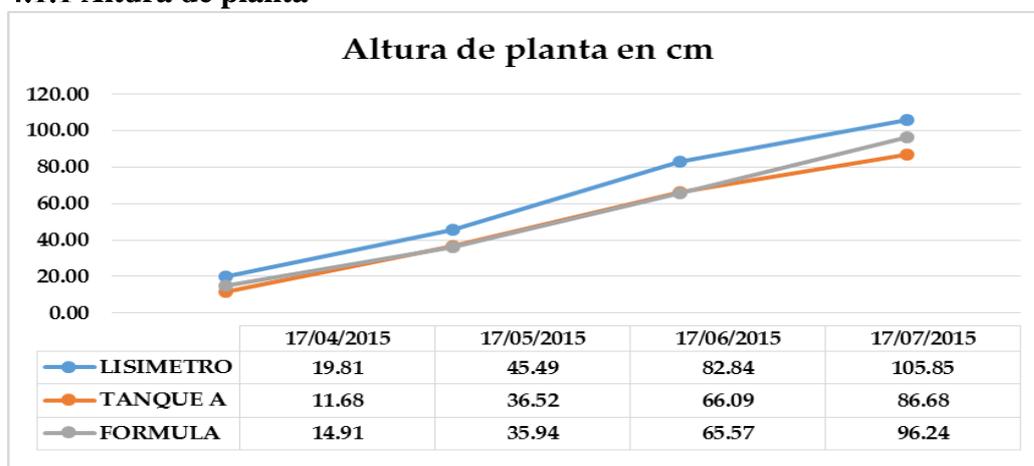


Figura N° 4.1: Altura de planta en cm

Cuadro N° 4.1: ANOVA 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

Fuente: Juan León Ruiz

Como podemos observar en el cuadro 4.1. En el análisis estadístico realizado podemos mencionar que la altura de la planta para el primer sobrevuelo (17 de abril) como resultado tenemos que estadísticamente es no significativo para las repeticiones, mientras que la comparación entre los tratamientos estadísticamente es significativo, liderando la aplicación de la lámina de riego medida con el lisímetro alcanzando una altura media 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 media de 45.49 cm, comparado con las láminas aplicadas con la medida del tanque de evaporación tipo A y las formulas empíricas que alcanzan una media de 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 media de 82,84 cm, versus las láminas aplicadas y medidas con el tanque tipo A y formulas 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 media de 105,85 cm, versus las láminas aplicadas y medidas con el tanque tipo A y formulas empíricas que están por debajo de este rango, en este análisis nos encontramos un coeficiente de variación de 3,74%.

Como podemos observar en la figura N° 4.1, la tendencia de crecimiento y desarrollo de la planta presentan una recta de similares característica ya que la aplicación de las láminas de riego de los tratamientos son similares.

4.1.2 Diámetro del tallo.

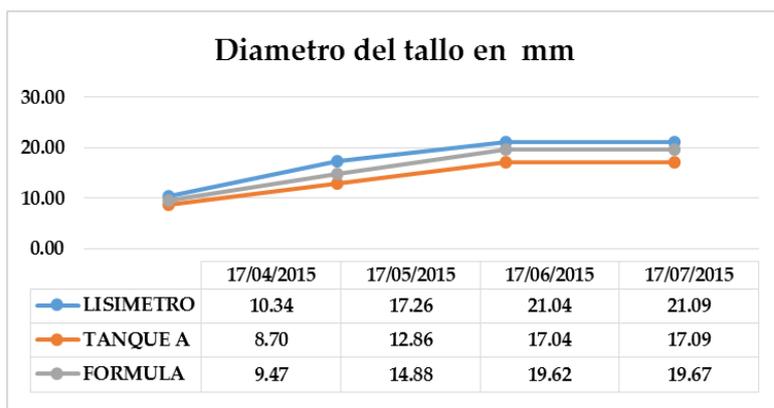


Figura N° 4.2: Diámetro del tallo en mm

Cuadro N° 4.2: ANOVA 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
FORMULA	9.47 A - B	14.88 B	19.62 A	19.67 A

Fuente: Juan León Ruiz

Como podemos observar en el cuadro 4.2. 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 llego a obtener un diámetro de 21,09 mm, en este análisis nos arroja un coeficiente de variación de 3,35%.

En condiciones de campo donde acontecen todos los factores limitantes o no que influyen en la producción del cultivo, el rendimiento es una respuesta a los factores meteorológicos y riego que influyen directamente sobre el mismo (Pereira 2008) y que regulan los procesos de transpiración, fotosíntesis y respiración, de tal manera que definen el crecimiento y desarrollo del cultivo en cuestión, aun cuando las respuestas de esa interacción resultan en extremo complejas y en ocasiones difíciles de interpretar. El estudio del crecimiento es uno de los elementos más importantes a valorar para analizar el comportamiento del rendimiento en general (MacKerron 2008).

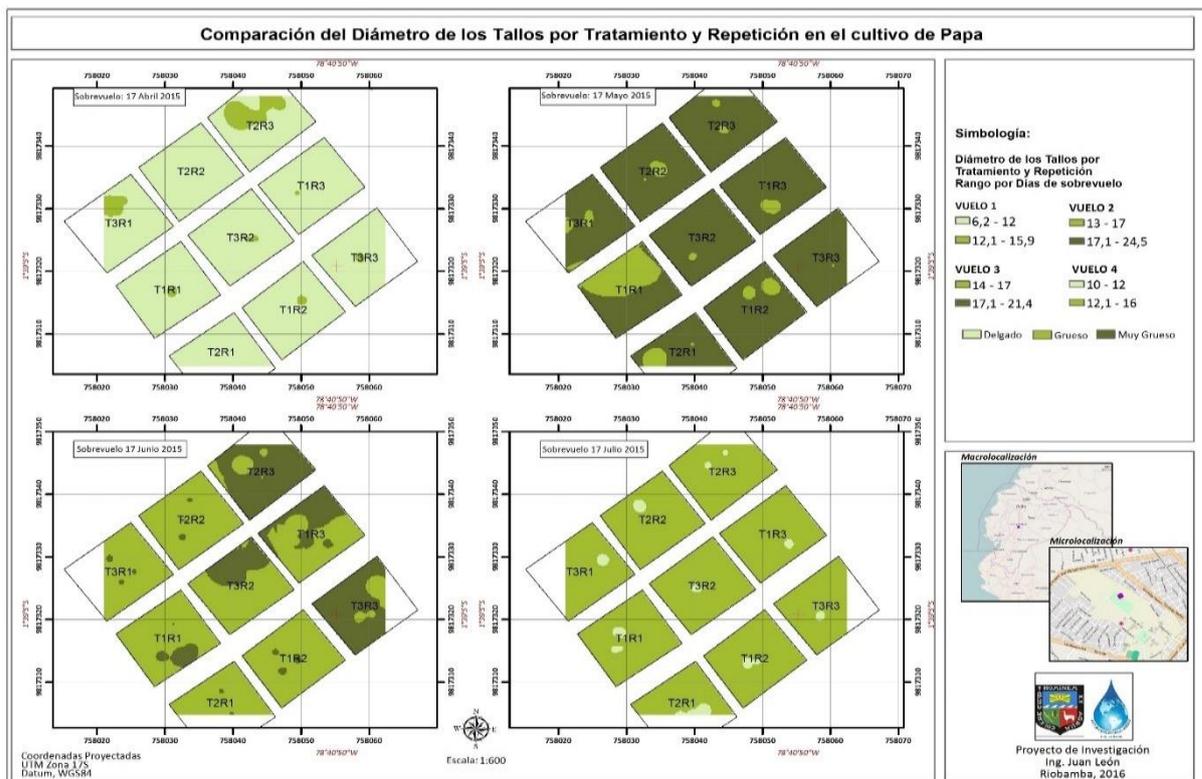


Figura N° 4.3: Mapa de diámetros del tallo por tratamiento y repetición determinado mediante detección remota en los cuarto sobrevuelos.

4.1.3 Numero de tallos

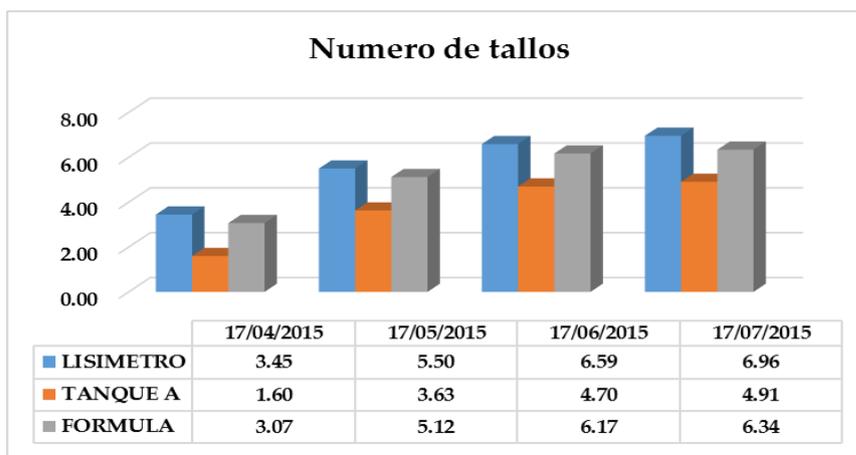


Figura N° 4.4: Numero de tallos

Cuadro N° 4.3: ANOVA 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

Fuente: Juan León Ruiz

Como podemos observar en la tabla 4.3. 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%.

La diferencia que se presenta en cuanto a la duración del ciclo de cultivo, en lo fundamental estuvo determinado por la ocurrencia en el medio periodo (alrededor de los 75 días) de temperaturas elevadas que aceleraron el proceso de envejecimiento del follaje. (Quintero 2009) manifiesta que la duración del ciclo del cultivo tiene un mayor efecto en los rendimientos que se alcancen en papa, pero no en el número de tallos por planta. El número de tallos no mostró diferencias significativas entre las repeticiones, comportándose como valores promedio entre 1,6 y 6,9 tallos por planta, por lo que el efecto que esta variable puede tener en el número de tubérculos y su repercusión en el rendimiento, no se hace evidente (Zamora 2008). Otros autores lograron mayores rendimientos en la medida que las variedades por ellos evaluadas tuvieron una mayor cantidad de tallos, aun cuando en otros casos no se haya verificado dicho comportamiento (Quintero 2009).

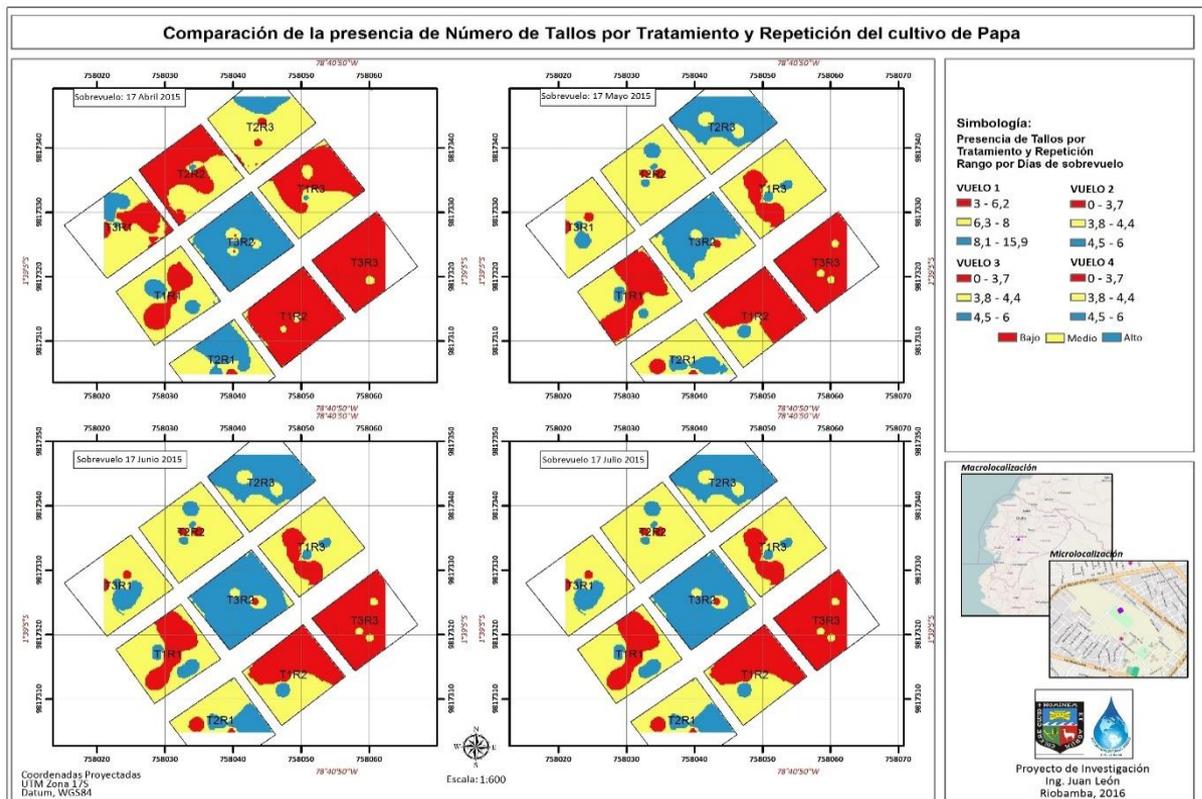


Figura N° 4.5: Mapa de número de tallos por tratamiento y repeticiones determinado mediante detección remota en los cuatro sobrevuelos

Al analizar el número de tallos, se destaca un incremento hasta alcanzar valores máximos que fueron mucho mayores en el sobrevuelo cuarto en relación con los primeros sobrevuelos. Se destaca también que el mayor número de tallos se alcanzó de forma rápida en la aplicación de agua con las formulas. Se comprobó que en este parámetro la aparición de nuevos tallos fue en forma secuencial hasta 30 días antes de la cosecha que se alcanzó un máximo en tallos, momento a partir del cual comienza a declinar ya que entro en su ultima de madurez fisiológica y está cerca de la cosecha (figura N° 4.5)

Se ha comprobado que el desarrollo de la parte aérea de las plantas de papa, no siempre asegura un mayor rendimiento (Alonso 2002) pues un excesivo desarrollo del follaje está relacionado con un desarrollo tardío de los tubérculos, mientras que el desarrollo temprano de los mismos, pueda dar lugar a la presencia de un follaje menos abundante, lo cual se relaciona con el movimiento y distribución de asimilatos en la planta y la demanda de los sitios de consumo, en este caso, en lo fundamental, los tubérculos.

4.1.4 Crecimiento radicular.

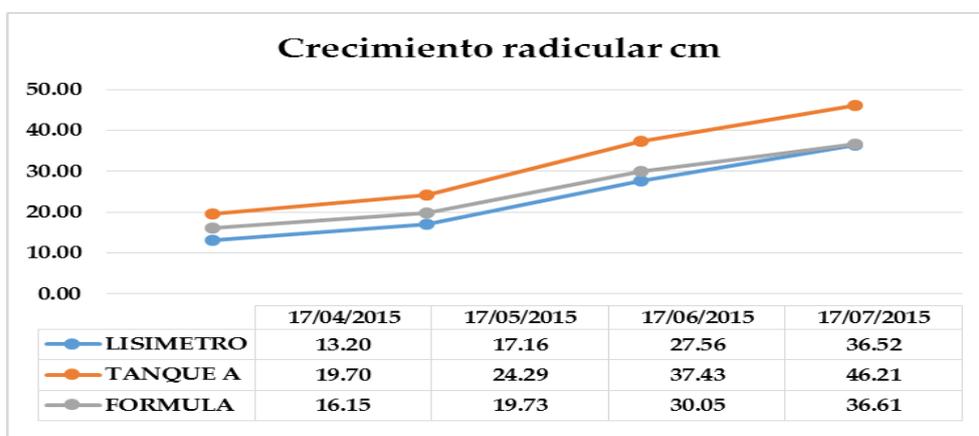


Figura N° 4.6: Crecimiento Radicular cm

Cuadro N° 4.4: ANOVA 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

Fuente: Juan León Ruiz

Como podemos observar en el cuadro 4.4 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%.

La presencia de raíces en la planta con una demanda neta por asimilados, influye fuertemente en los patrones de producción y distribución de la materia seca. La producción de asimilados por las hojas y el punto hasta el cual pueden ser acumulados por el sumidero, representados en este caso por los órganos que son cosechados, tiene una gran influencia en los rendimientos; sin embargo, grandes diferencias entre variedades en cuanto a la forma de hacer esta distribución en las diferentes partes de la planta y su influencia en el rendimiento, pueden ser encontradas (Ñustez 2009); además, se señala también que la caracterización de estos indicadores fisiológicos de acumulación y distribución de materia seca pueden permitir un manejo agronómico y agua en papa.

La mayor demanda por asimilatos se presenta en estadios iniciales en las hojas y en los tallos, pero esto cambia con el crecimiento de los tubérculos, los que constituyen el principal sitio de almacenamiento (Aguilar 2006).

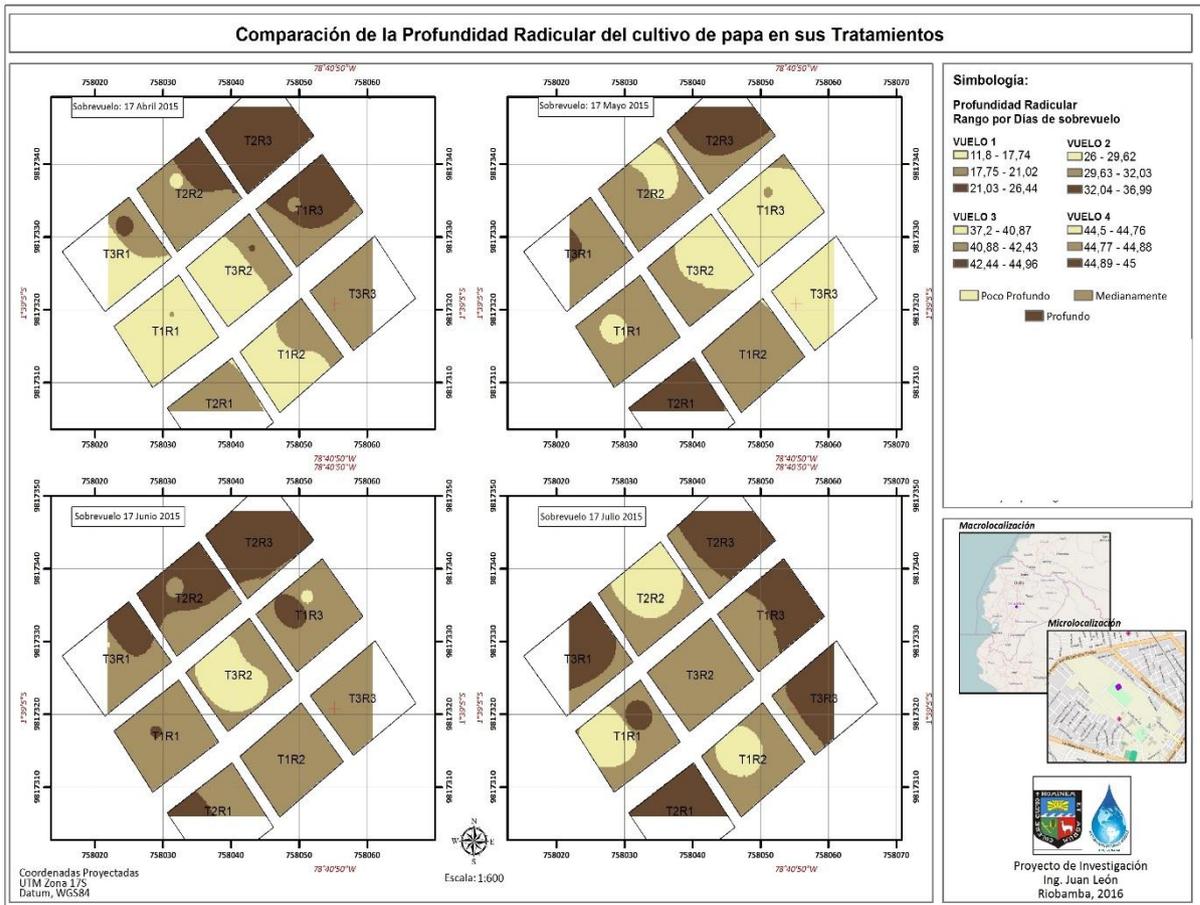


Figura N° 4.7: Mapa profundidad radicular de los tratamientos y repeticiones determinado mediante detección remota de los cuatro sobrevuelos

4.1.5 Contenido de clorofila

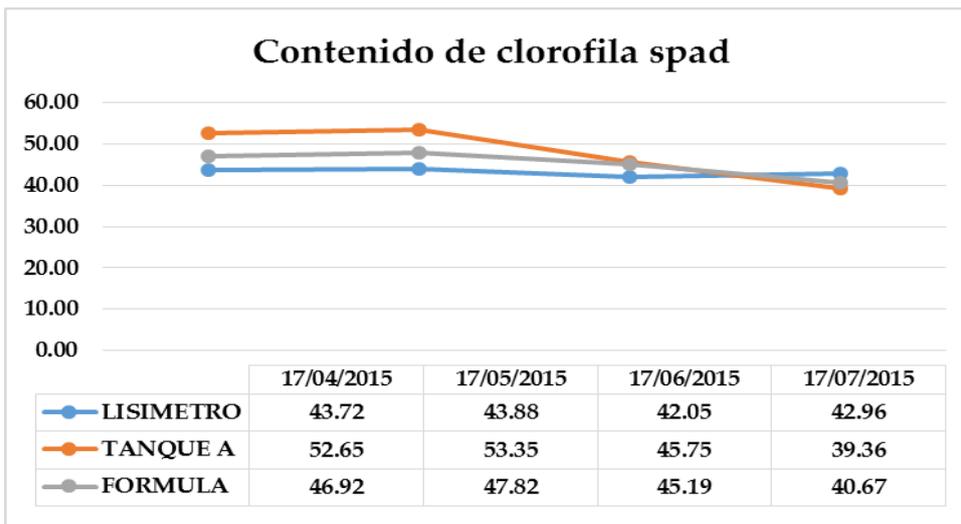


Figura N° 4.8: Contenido de clorofila

Cuadro N° 4.5: ANOVA 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

Fuente: Juan León Ruiz

Como podemos observar en el cuadro 4.5. 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 alcanzo el contenido máximo de clorofila con una media de 52,65 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 alcanzo su mayor contenido con una media de 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 alcanzo el mayor rango con una media de 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%.

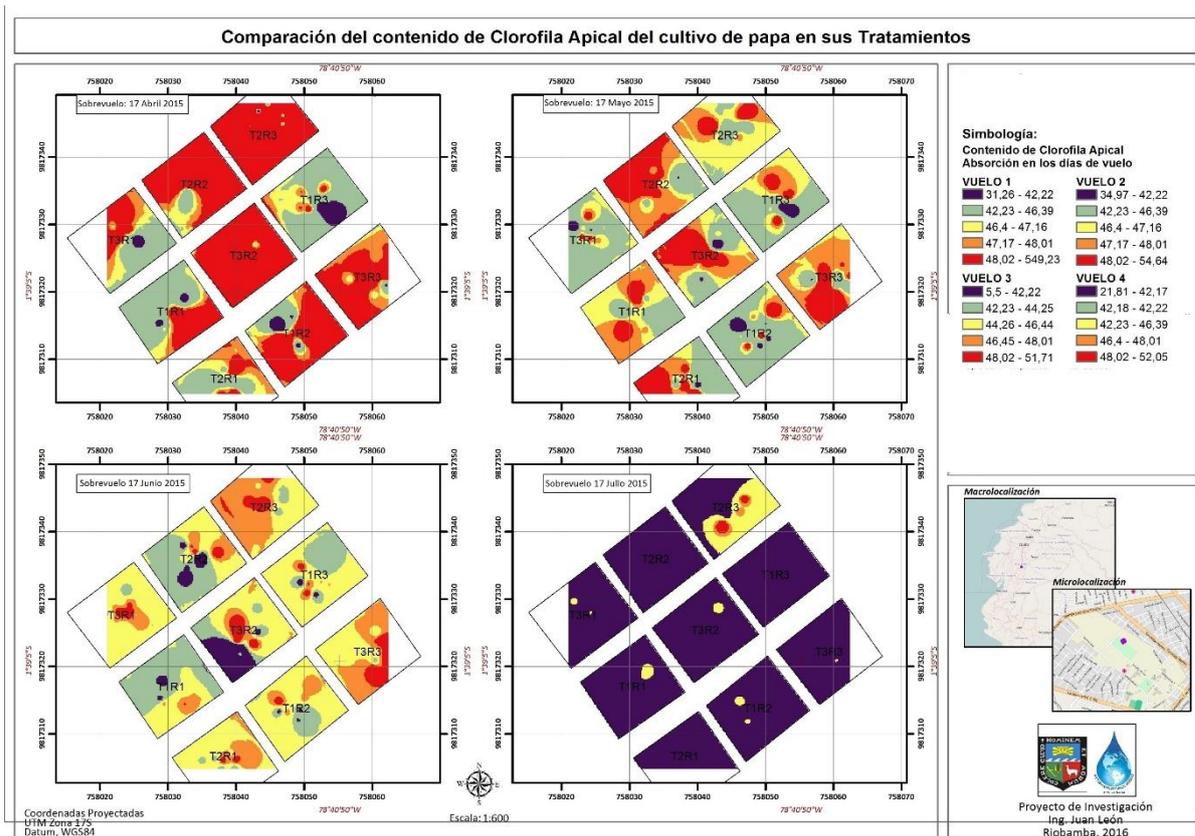


Figura N° 4.9: Mapa del contenido de clorofila de los tratamientos y repeticiones determinado mediante detección remota en los cuatro sobrevuelos.

En la figura N° 4.9 se puede observar que en la época temprana de la estación de crecimiento o desarrollo, durante la expansión de las hojas, se observa un incremento en el contenido de clorofila en todos los tratamientos en forma similar, siendo el principal pigmento que absorbe la luz. Esencialmente toda la luz visible es capaz de promover la fotosíntesis, pero las regiones de 400 a 500 y de 600 a 700 nm son las más eficientes. Así la clorofila pura tiene una absorción muy débil entre 500 y 600 nm, los pigmentos accesorios complementan la absorción de la luz en esta región, suplementando a las clorofilas.

La clorofila es el pigmento que absorbe y controla la cantidad de radiación solar para la fotosíntesis de la planta. La vegetación sana y vigorosa emite una baja reflectividad en el visible por lo que en caso de realizar plenamente la fotosíntesis, la reflectividad será mayor en la banda del verde. En el infrarrojo cercano, la alta reflectividad explica la estructura interna del mesófilo de la hoja, ya que las cavidades existentes, especialmente en el mesófilo esponjoso dispersan la mayor parte de la radiación. El infrarrojo medio, indica la absorción

de agua, de tal forma que, con menor cantidad de agua, mayor reflectividad, por lo que las plantas deshidratadas o enfermas tienen altos valores porcentuales en esta banda.

Sin embargo, en la vegetación enferma, deshidratada o las áreas donde la vegetación no sea abundante, su reflectividad llega a ser anodina, ya que aumenta ligeramente del rojo al infrarrojo medio, no alcanzándose valores de 40 % de reflectividad en el cercano, algo que sí ocurre en la vegetación saludable. Se puede identificar, que a mayor diferencia mostrada de la vegetación entre el rojo y el infrarrojo queda de manifiesto una mayor salubridad de ella, mientras que la vegetación estresada y enferma tiene valores de reflectividad relativamente medios y poco variables entre el rojo y el infrarrojo. El NDVI es utilizado para estimar la cantidad y el grado de desarrollo de una zona vegetal. Hay que indicar que para valores de 0,1 la vegetación con dicho índice se considera en estado crítico, mientras que para 0,5 se considera densa y sana (Holben, 1986).

4.1.6 Etapas de desarrollo del cultivo

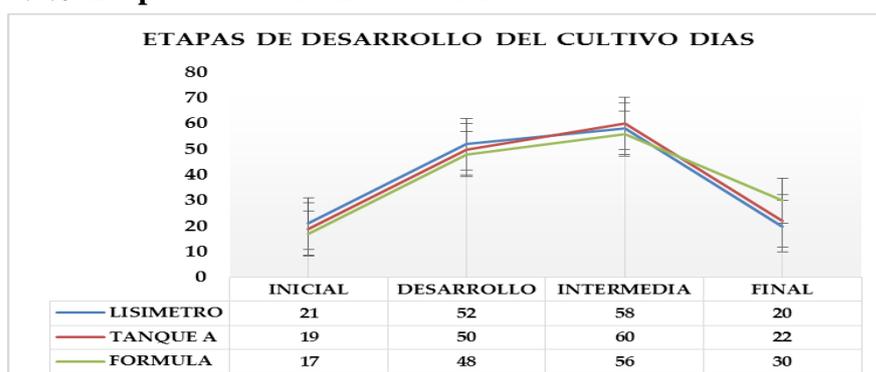


Figura N° 4.10: Etapas de desarrollo del cultivo de los tratamientos

Analizando el comportamiento de desarrollo del cultivo desde la siembra hasta la cosecha podemos determinar que los tres tratamientos tuvieron similares comportamientos, la cosecha de todos los tratamientos se realizó a los 151 días después de la siembra, en la etapa inicial que comienza desde la siembra hasta que las plantas están sobre la superficie del suelo en un 30% determinamos que la diferencia fue de 5 días, el tratamiento de aplicación de agua con láminas de las formulas llegó a la fase inicial a los 17 días, mientras que las plantas que fueron aplicadas con láminas del lisímetro tuvieron 21 días. Para la etapa de desarrollo que empieza en el momento desde la brotación de los tallos hasta inicios de floración el tratamiento de la formula llegó a los 48 días y el tratamiento con lisímetro llegó a este estado a los 52 días dando una diferencia de comportamiento fenológico de apenas 4 días. Para la

etapa Intermedia que va desde la floración hasta que empieza a tuberización el tratamiento aplicado el agua de riego con la formula sigue liderando es así que a este estado llega a los 56 días, a comparación del tratamiento que se aplica agua de riego con la medida del tanque de evaporación tipo a llega a este estado a los 60 días. Para llegar a la etapa final o senescencia que empieza desde el momento de la tuberización y finaliza en la cosecha las plantas aplicadas el agua de riego con la lámina de los lisímetros llega a los 20 días, mientras que el tratamiento que tarda más en esta etapa es el que se aplica con las fórmulas que llega a esta etapa a los 30 días mostrando una diferencia de 10 días para esta fase.

El estado de la planta es determinado tanto por procesos de crecimiento como de desarrollo (Ritchie 1991). El desarrollo puede entenderse como el paso a través de fases fenológicas consecutivas y se caracteriza por una ordenada tasa de aparición de órganos vegetativos y reproductivos (Keulen 1986). El desarrollo es un proceso irreversible de cambios en un organismo, con un patrón más o menos fijo según la especie (Goudriaan 1994), pero las sucesivas etapas del desarrollo no siempre son fácilmente reconocibles. El desarrollo se relaciona con el crecimiento a través de la tasa de repartición de asimilatos entre los órganos de la planta (Bedwell 1990). Dos aspectos del crecimiento de los cultivos merecen especial atención: la tasa de crecimiento y la eficiencia del proceso de crecimiento (Penning 1989) mencionan que los componentes clásicos del análisis de crecimiento giran en torno a la materia seca e incluyen índices fisiotécnicos como la partición de asimilación, tasa de crecimiento y el índice de área foliar. (Beadle 1989) que para el análisis de crecimiento solamente se necesitan dos tipos de mediciones: el tamaño del sistema asimilatorio y el peso seco de la planta (hojas, tallos, raíces, tubérculos, frutos).

Como se observa en la figura 4.10, 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 %, 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.

El desarrollo de la parte aérea del cultivo de papa durante la temporada tuvo la evolución temporal, para los tratamientos de densidad de plantación comercial y baja. La dinámica que

mostró la cobertura fue representada hasta que el cultivo alcanza a cerrar el surco, lo que aproximadamente corresponde al final de la etapa de crecimiento expolineal (Goudriaan 1994)

En general el cultivo se desarrolló bastante sano, en términos de enfermedades del follaje en todos los tratamientos, y no fue posible distinguir grados de deformaciones en los tubérculos por efecto de los distintos niveles de agua aplicada al cultivo.

4.2 RESULTADOS DEL Kc ESTIMADO MEDIANTE DRONES.

4.2.1 Índices de vegetación. NDVI

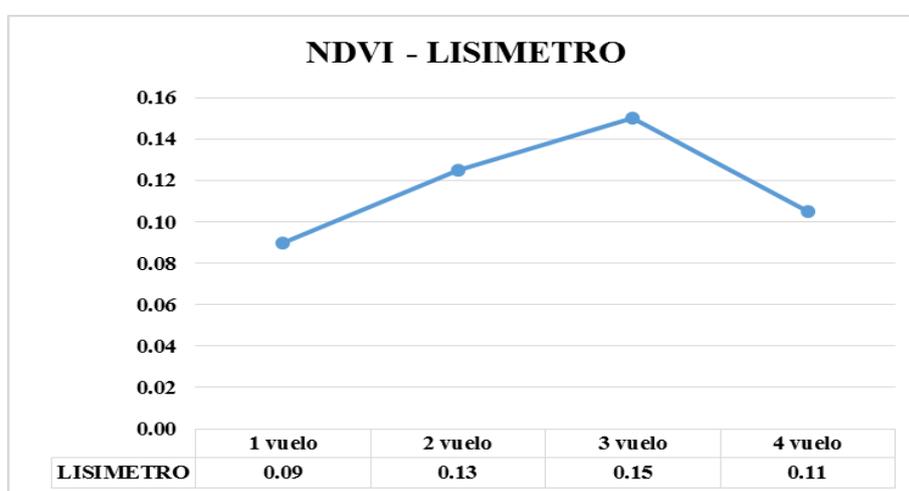


Figura N° 4.11: Índice de Vegetación Diferencial Normalizado. NDVI

Para la determinación del NDVI con fotografías captadas con dron para el tratamiento que recibe la lámina de riego con medida proporcionada por el lisímetro podemos indicar que, (figuras N° 4.11- 4.15 – 4.16 – 4.17 – 4.18) la información arrojada con fotografías aéreas con respecto al NDVI del lisímetro en el primer sobrevuelo se logra definir un valor de 0.09 nm esto se debe a que en el transcurso del primer mes la cobertura vegetal es baja y el cultivo de papa está en su fase inicial y su cobertura vegetal no es tan notoria se están formando las hojas verdaderas, para el segundo sobrevuelo se puede notar un crecimiento en la curva con un valor que alcanza a los 0.13 nm de NDVI en esta fecha las plantas se encuentran en el estado de desarrollo lo que significa que las plantas están en proceso de crecimiento en altura y cobertura vegetal, para el tercer sobrevuelo las plantas han llegado a su máxima altura y crecimiento vegetal demostrando su máxima expresión en el NDVI alcanzando su valor más

alto del ciclo del cultivo con 0.15 nm, ya que las plantas por su edad tiene su área foliar completa lo que está expuesta a la captación del drone y presenta sus valores máximos, en lo que corresponde al cuarto sobrevuelo podemos notar que los valores del NDVI bajan al 0.11 ya que entra en la fase de maduración o senescencia es el estado fisiológico de la planta que empieza su proceso final de tuberización y la expresión en el área foliar baja completamente, se debe anotar que desde este periodo el proceso fotosintético cada la planta es nula, fisiológicamente la planta su energía desgasta en la tuberización ya que está cerca de la cosecha.

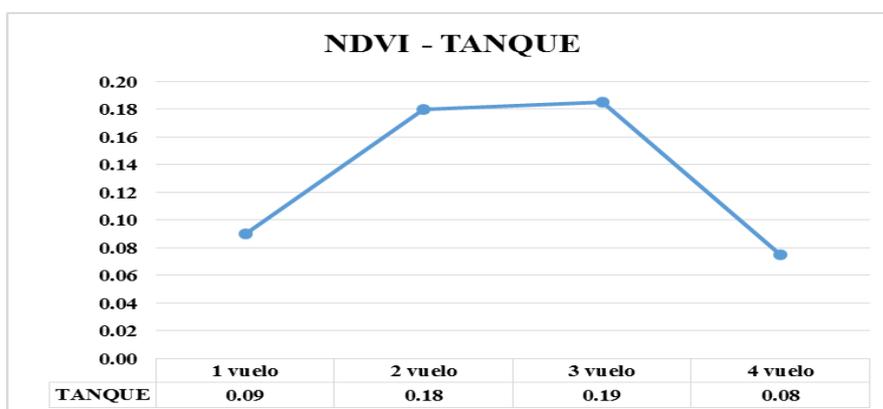


Figura N° 4.12: Índice de Vegetación Diferencial Normalizado. NDVI

Para la determinación del NDVI con fotografías captadas con drone para el tratamiento que recibe la lámina de riego con medida proporcionada por el tanque de evaporación tipo A podemos indicar que, (figura N° 4.12 – 4.15 – 4.16 – 4.17 – 4.18) la información arrojada con fotografías aéreas con respecto al NDVI del lisímetro en el primer sobrevuelo se logra definir un NDVI de 0.09 nm esto se debe a que en el transcurso del primer mes la cobertura vegetal es baja y el cultivo de papa está en su fase inicial y su cobertura vegetal no es tan notoria se están formando las hojas verdaderas, para el segundo sobrevuelo se puede notar un crecimiento en la curva con un valor que alcanza a los 0.18 nm de NDVI en esta fecha las plantas se encuentran en el estado de desarrollo lo que significa que las plantas están en proceso de crecimiento en altura y cobertura vegetal, para el tercer sobrevuelo las plantas han llegado a su máxima altura y crecimiento vegetal demostrando su máxima expresión en el NDVI alcanzando su valor más alto del ciclo del cultivo con 0.19 nm, ya que las plantas por su edad tiene su área foliar completa lo que está expuesta a la captación del drone y presenta sus valores máximos, en lo que corresponde al cuarto sobrevuelo podemos notar que los valores del NDVI bajan al 0.08 ya que entra en la fase de maduración o senescencia

es el estado fisiológico de la planta que empieza su proceso final de tuberización y la expresión en el área foliar baja completamente, se debe anotar que desde este periodo el proceso fotosintético cada la planta es nula, fisiológicamente la planta su energía desgasta en la tuberización ya que está cerca de la cosecha. Los valores difieren con los arrojados con el lisímetro posiblemente porque la lámina de riego aplicada en cada riego es mayor a la aplicada con el lisímetro y los procesos fisiológicos en cada fase no son iguales.

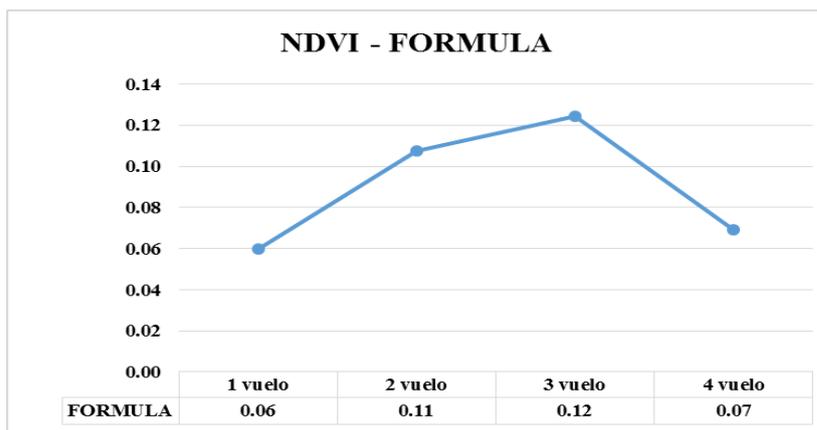


Figura N° 4.13: Índice de Vegetación Diferencial Normalizado. NDVI

Para la determinación del NDVI con fotografías captadas con dron para el tratamiento que recibe la lámina de riego con medida proporcionada por la formula podemos indicar que, (figura N°4.13- 4.15 – 4.16 – 4.17 – 4.18) la información arrojada con fotografías aéreas con respecto al NDVI del lisímetro en el primer sobrevuelo se logra definir un NDVI de 0.06 nm esto se debe a que en el transcurso del primer mes la cobertura vegetal es baja y el cultivo de papa está en su fase inicial y su cobertura vegetal no es tan notoria se están formando las hojas verdaderas, para el segundo sobrevuelo se puede notar un crecimiento en la curva con un valor que alcanza a los 0.11 nm de NDVI en esta fecha las plantas se encuentran en el estado de desarrollo lo que significa que las plantas están en proceso de crecimiento en altura y cobertura vegetal, para el tercer sobrevuelo las plantas han llegado a su máxima altura y crecimiento vegetal demostrando su máxima expresión en el NDVI alcanzando su valor más alto del ciclo del cultivo con 0.12 nm, ya que las plantas por su edad tiene su área foliar completa lo que está expuesta a la captación del dron y presenta sus valores máximos, en lo que corresponde al cuarto sobrevuelo podemos notar que los valores del NDVI bajan al 0.07 ya que entra en la fase de maduración o senescencia es el estado fisiológico de la planta que empieza su proceso final de tuberización y la expresión en el área foliar baja completamente, se debe anotar que desde este periodo el proceso fotosintético cada la planta

es nula, fisiológicamente la planta su energía desgasta en la tuberización ya que está cerca de la cosecha. Los valores difieren con los arrojados con el lisímetro y con el tanque de evaporación tipo A posiblemente porque la lámina de riego aplicada en cada riego es menor a la aplicada con el lisímetro y los procesos fisiológicos en cada fase no son iguales.

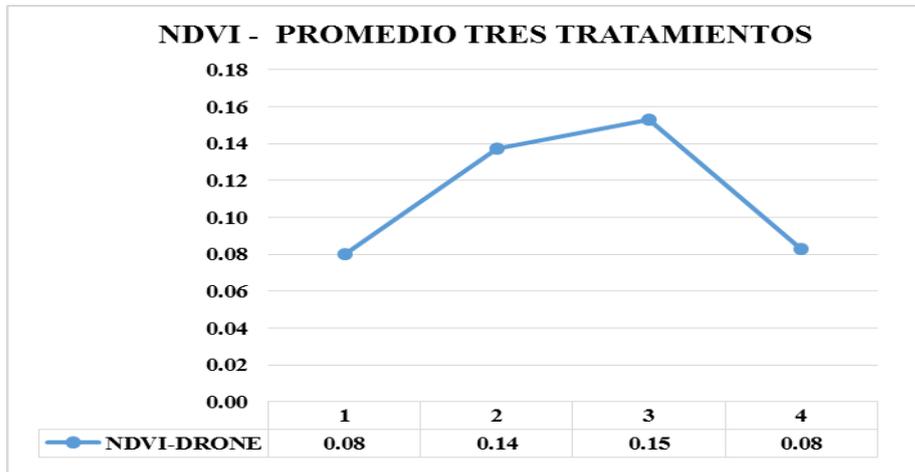


Figura N° 4.14: Índice de vegetación diferencial normalizado promedio en cada fecha de sobrevuelo

De acuerdo a los valores obtenidos en el cálculo de NDVI, se observa que de acuerdo al promedio calculado de las parcelas en el vuelo inicial alcanza una media de 0.08, que significa que la planta está en etapa inicial después de la germinación al tener las primeras hojas verdaderas, en este periodo la planta solo desarrolla hojas y tallos acumulando la energía suficiente para la floración. En el vuelo dos alcanzan una media hasta de 0.14, lo que significa que se encuentra en floración para la producción de tubérculos en excelentes condiciones. En el vuelo tres alcanza su máxima expresión con una media de 0.15 y en el cuarto vuelo una media es idéntica la una media inicial de 0.08 esto quiere decir que las hojas y tallos están en estado de madurez y se tornan de coloración amarillenta y finalizando por secarse esta en la etapa final o senescencia.

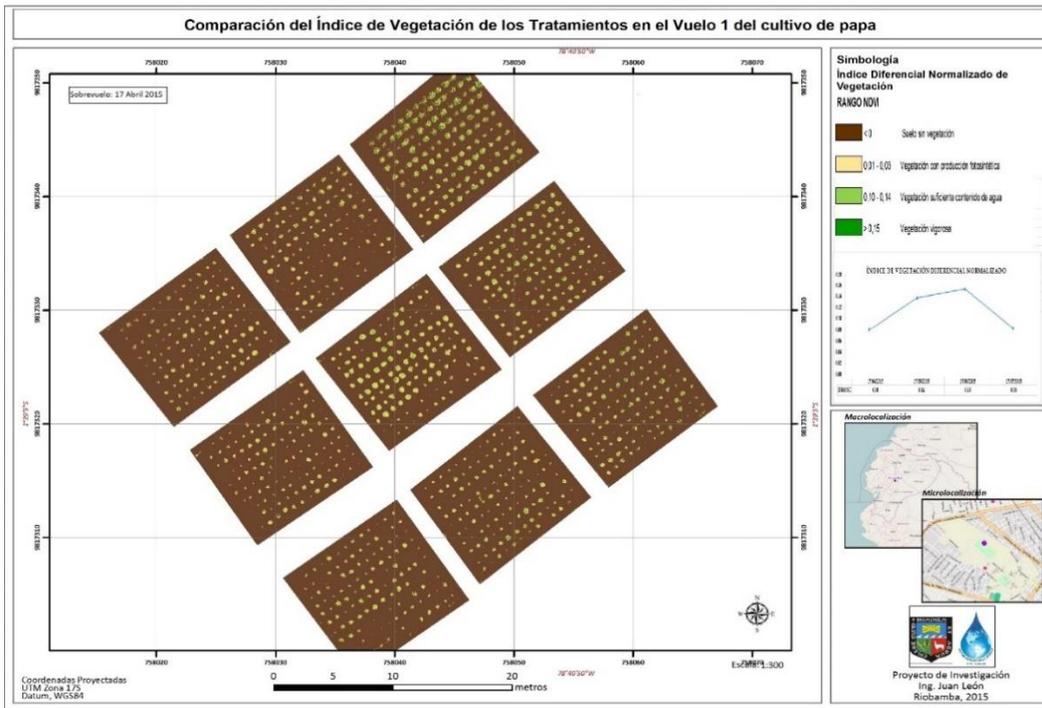


Figura N° 4.15: Mapa del índice de vegetación de los tratamientos y repeticiones determinado mediante detección remota primer sobrevuelo

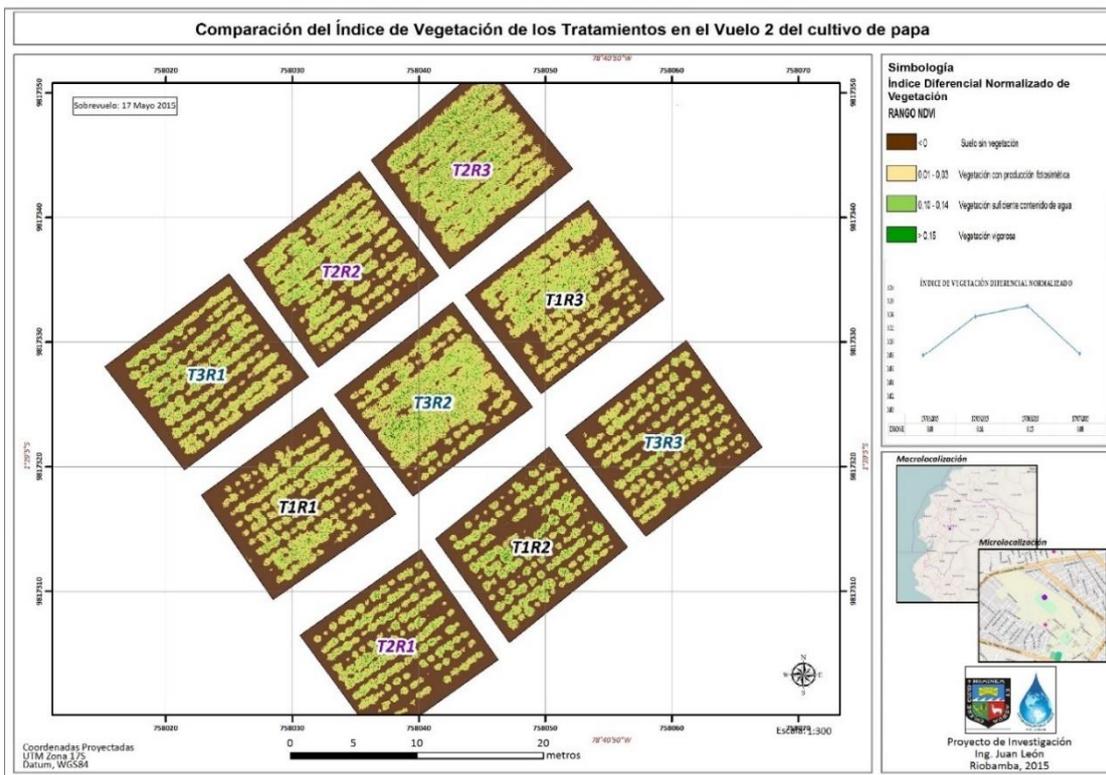


Figura N° 4.16: Mapa del índice de vegetación de los tratamientos y repeticiones determinado mediante detección remota segundo sobrevuelo.

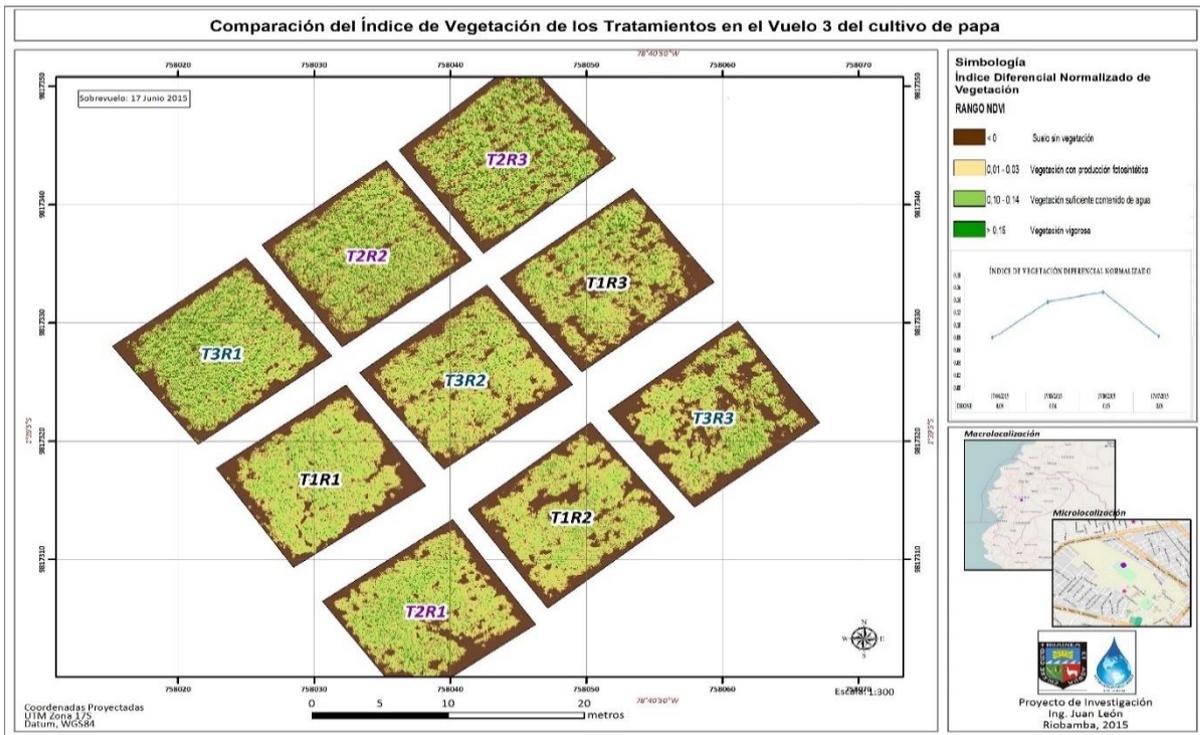


Figura N° 4.17: Mapa del índice de vegetación de los tratamientos y repeticiones determinado mediante detección remota tercer sobrevuelo.

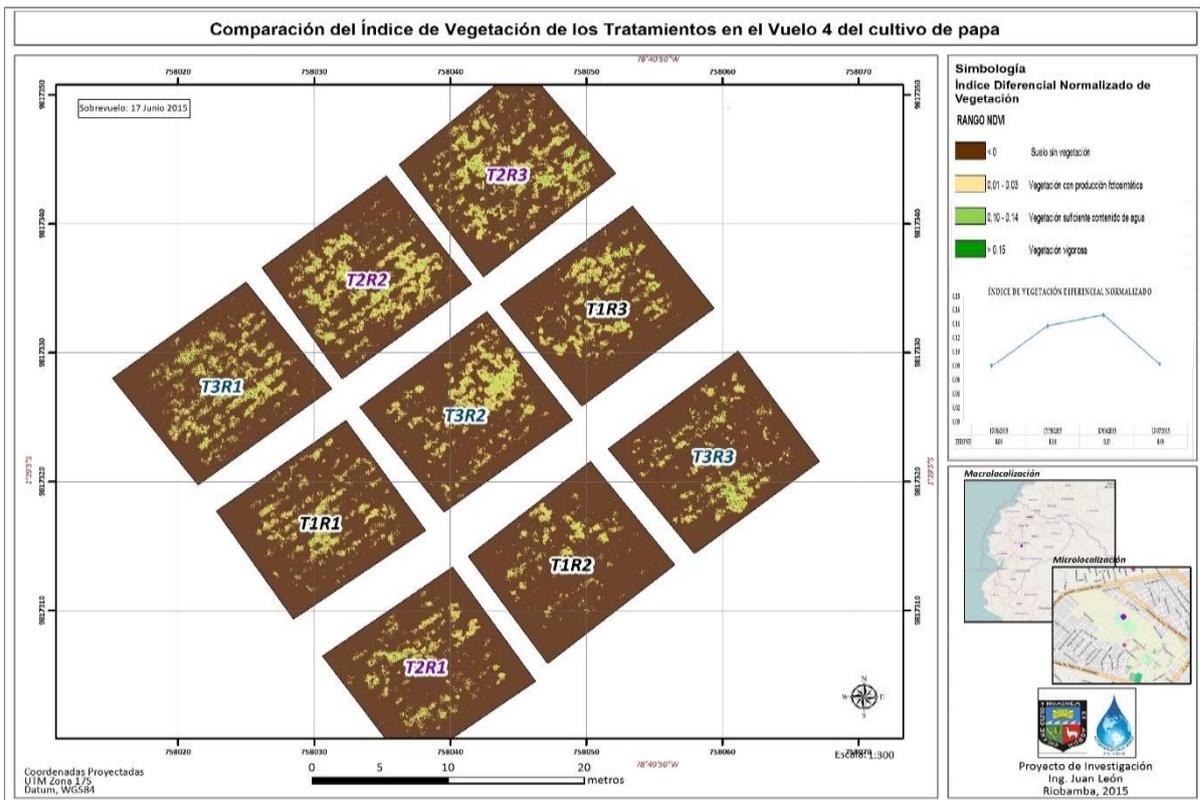


Figura N° 4.18: Mapa del índice de vegetación de los tratamientos y repeticiones determinado mediante detección remota cuarto sobrevuelo.

4.2.2 Índices de área foliar IAF

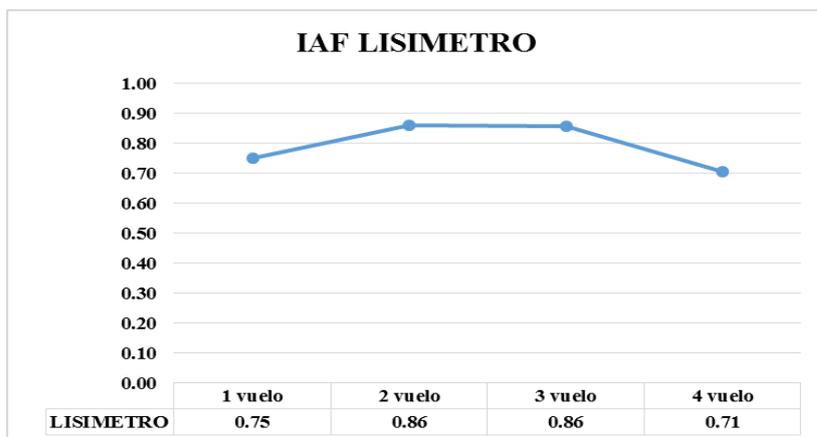


Figura N° 4.19: Índice de área foliar IAF lisímetro

El índice de área foliar está muy relacionado con el NDVI del vegetal, ya que la curva de desarrollo son similares, es así que para el primer sobrevuelo en la determinación del IAF para el tratamiento que recibe la lámina de riego con medida del lisímetro (figura N° 4.19 4.22 – 4.23 - 4.24 – 4.25) alcanza una medida de 0.75 al momento la planta se encuentra en la fase inicial el área foliar no está bien definida para ser captada por el dron, para el segundo y tercer sobrevuelo las plantas se encuentran en el estado de desarrollo el área foliar está en estado de crecimiento alcanza su máxima expresión en cobertura vegetal, se puede notar que entre la fase de desarrollo y la fase intermedia los valores arrojados son iguales alcanzando 0.86 nm, finalmente para el cuarto sobrevuelo las plantas se encuentran en la fase final o senescencia en la que el vegetal no tiene actividad fotosintética y alcanza un valor de 0.71 nm.

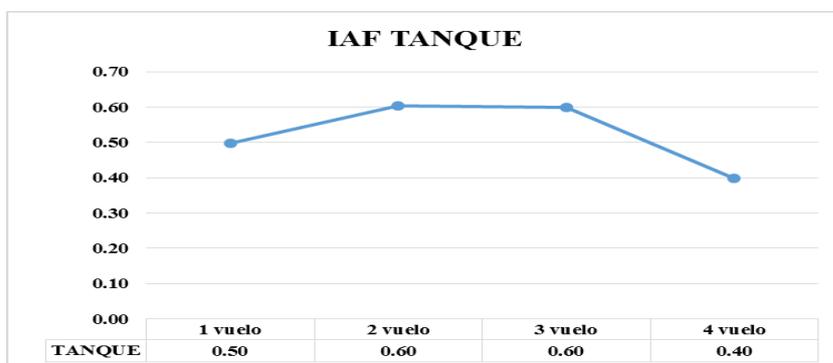


Figura N° 4.20: Índice de área foliar IAF tanque evaporación tipo A

El índice de área foliar está muy relacionado con el NDVI del vegetal, ya que la curva de desarrollo son similares, es así que para el primer sobrevuelo en la determinación del IAF para el tratamiento que recibe la lámina de riego con medida del tanque de evaporación tipo A(figura N° 4.124-.22 – 4.23 - 4.24 – 4.25) alcanza una medida de 0.50 al momento la planta se encuentra en la fase inicial el área foliar no está bien definida para ser captada por el drone, para el segundo y tercer sobrevuelo las plantas se encuentran en el estado de desarrollo el área foliar está en estado de crecimiento alcanza su máxima expresión en cobertura vegetal, se puede notar que entre la fase de desarrollo y la fase intermedia los valores arrojados son iguales alcanzando 0.60 nm, finalmente para el cuarto sobrevuelo las plantas se encuentran en la fase final o senescencia en la que el vegetal no tiene actividad fotosintética y alcanza un valor de 0.41 nm.

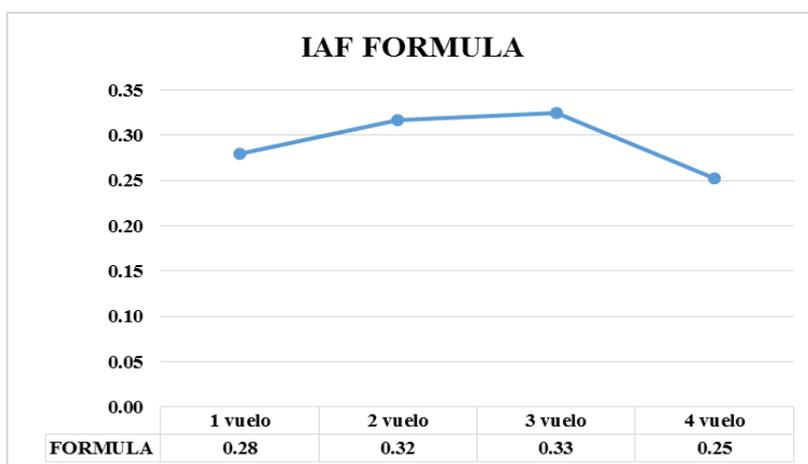


Figura N° 4.21: Índice de área foliar IAF formula

El índice de área foliar está muy relacionado con el NDVI del vegetal, ya que la curva de desarrollo son similares, es así que para el primer sobrevuelo en la determinación del IAF para el tratamiento que recibe la lámina de riego con medida de la formula (figura N° 4.21 - 4.22 – 4.23 - 4.24 – 4.25) alcanza una medida de 0.28 al momento la planta se encuentra en la fase inicial el área foliar no está bien definida para ser captada por el drone, para el segundo y tercer sobrevuelo las plantas se encuentran en el estado de desarrollo el área foliar está en estado de crecimiento alcanza su máxima expresión en cobertura vegetal, se puede notar que entre la fase de desarrollo alcanza un valor de 0.32 y la fase intermedia los valores arrojados son de 0.33 nm, finalmente para el cuarto sobrevuelo las plantas se encuentran en la fase final o senescencia en la que el vegetal no tiene actividad fotosintética y alcanza un valor de 0.25 nm.

La superficie foliar tiene una gran importancia, pues de ella depende la interceptación de la radiación fotosintéticamente activa, necesaria para la producción de biomasa y el correspondiente aporte al incremento del tamaño en masa de los tubérculos, lo cual asegurará un adecuado rendimiento, en dependencia del valor que alcance el índice de área foliar. Por otra parte, la superficie foliar a partir de la cual es posible determinar el índice de área foliar es indispensable para estimar la productividad y el consumo de agua de los cultivos, (Norman y Campbell 1989),

En Ecuador, y en particular con respecto al cultivo de papa, no existe experiencia en la utilización de instrumentos que midan el IAF a través de la interceptación de la radiación. Por esta razón, se procedió a cotejar el funcionamiento de uno de estos aparatos con respecto a la determinación que se obtiene por medio de fotografías digitales, a modo de método de referencia. Como la utilización del dron constituye una alternativa operativamente sencilla, pero realiza estrictamente una lectura de carácter puntual. En un caso el IAF del dron corresponde a un valor medio de cada lectura tomados en cuatro sobrevuelos en distintas fechas en el lugar que se instaló el ensayo para hacer la determinación fotogramétrica de cada tratamiento. La representación muestra el carácter lineal de la relación al K_c del lisímetro, con el coeficiente angular de la recta de regresión cercano a la unidad. También se advierte que la dispersión tiende a aumentar a medida que el tamaño de la planta se hace más grande, lo que puede ser consecuencia de la pérdida de precisión del dron en condiciones de saturación lumínica. Se observa que para valores de IAF mayores a 0.8, el cambio que muestra la interceptación de la radiación es muy reducido.

La determinación del IAF que realiza el dron se basa en la inversión de un modelo simplificado de (Norman y Campbell 1989), que asume una relación exponencial negativa entre la radiación solar interceptada y el IAF. A fin de mostrar el comportamiento de esta relación a partir de las mediciones de radiación fotosintéticamente activa por encima y por debajo de la canopia. En todo el transcurso del ensayo se observa que la relación entre la radiación interceptada ($1- PAR_a/PAR_d$) y el IAF calculado se mantuvo uniforme, en el sentido de comparar entre el primero y cuarto sobrevuelo con el segundo y tercer sobrevuelos, mismos que fueron ejecutados durante los diferentes momentos del ciclo, es decir con valores de área foliar bajos y altos. La curva se justifica por cuanto los valores de IAF fueron calculados en condiciones muy semejantes durante el ciclo, tanto con respecto al ángulo cenital como a la fracción f_b . Por su parte, el coeficiente de extinción lumínica (k)

se asumió invariable durante el ciclo para una distribución foliar esférica. Este aspecto debería ser revisado de manera particular, por cuanto en papa fue sugerida su variación sistemática durante el ciclo respecto al desarrollo del área foliar (Gordon *et al.*, 1997), al igual que bajo la influencia de la densidad de siembra o la distancia entre filas de plantas, como también se ha observado en distintos cultivos anuales (Rosenthal *et al.*, 1993).

También muestra que cuando los valores de IAF son superiores a 0.5, la fracción de radiación interceptada cambia muy poco, de forma tal que su contribución para captar energía luminosa y aprovecharla para producir materia seca resulta, a partir de este valor, progresivamente menos importante. Estas curvas no difieren mayormente de la propuesta por el modelo de (Jefferies y Heilbronn 1991), en particular cuando el IAF es inferior a 3 y asumiendo el carácter genérico que presentan las estimaciones del modelo.

Por su parte, la variación del IAF expresa de manera equivalente el crecimiento de la parte aérea hasta alcanzar cobertura completa, y luego comienza a declinar gradualmente durante la etapa de senescencia. Estas curvas exhiben un comportamiento típico que, para las de cobertura, es semejante al presentado por (Millard *et al.* 1990), aunque en este caso alcanzan la condición de cobertura completa un poco antes, alrededor del día 50 después de la emergencia, probablemente porque el ciclo transcurre con niveles térmicos elevados al comienzo del ciclo. La condición de cobertura durante todas las fechas observadas fue siempre alta, pero estas diferencias fueron disminuyendo a medida que el cultivo se aproximó a cobertura completa.

Por su parte, el desarrollo del IAF tuvo un comportamiento similar al que presentan (Allen y Scott 1980) para diferentes densidades de siembra. La densidad superior alcanza más rápido en la temporada un IAF de 3, como así también tiene un pico máximo más elevado de 4,5, pero que rápidamente desaparece. En el caso de la densidad más baja el máximo resulta inferior (3,5) y ocurre ligeramente más tarde. En ambos casos son picos de corta duración, asociado al comportamiento de vuelco del cultivo (Allen y Scott, 1980), de forma tal que tienen presumiblemente poca importancia desde el punto de vista de la interceptación de la radiación.

Las curvas de IAF presentan un crecimiento de tres fases, similar al propuesto por (Gordon *et al.* 1997) en su modelo de desarrollo de la canopia para variedades específicas de papa. Asimismo, una vez alcanzado el valor de IAF máximo, la tendencia es que posteriormente

no existan diferencias importantes entre el IAF de ambas densidades de siembra, de manera similar a lo reportado por (Allen y Scott 1980) en la etapa final del ciclo.

Una verificación a la propuesta de (Burstall y Harris 1983), que consideran posible estimar la intercepción de la luz utilizando tanto mediciones de cobertura del suelo como de IAF, fue realizada analizando la relación entre ambas expresiones.

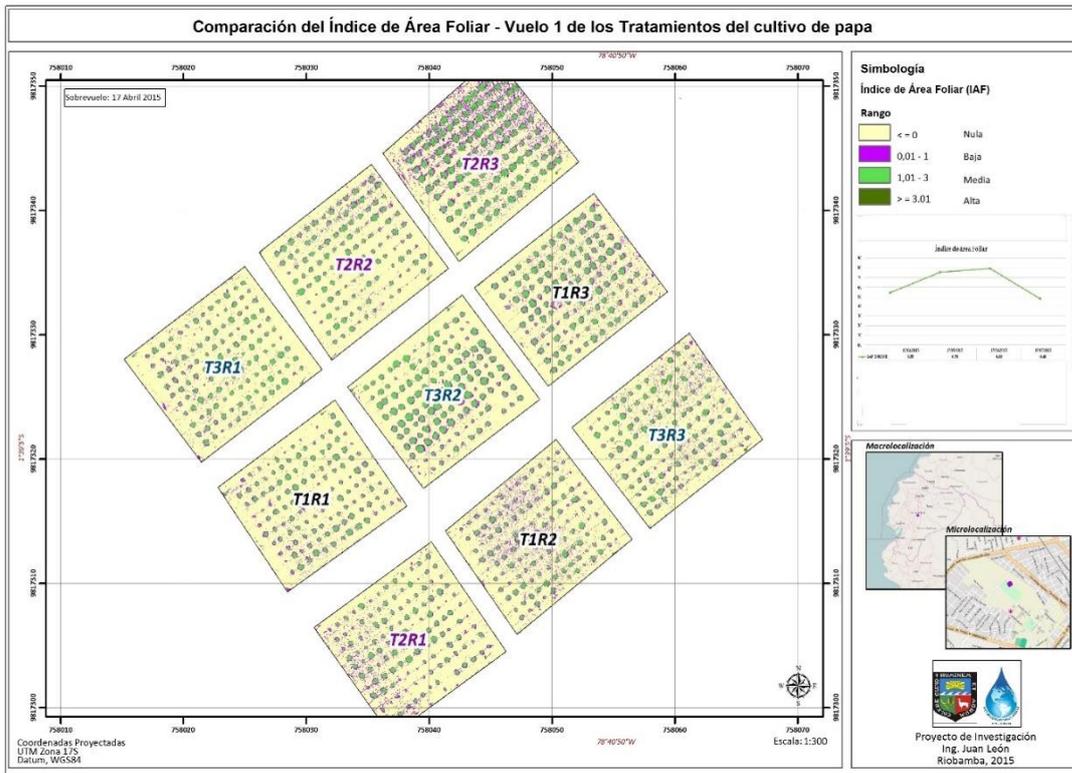


Figura N° 4.22: Mapa de índices de área foliar de los tratamientos y repeticiones determinado mediante detección remota del primer sobrevuelo.

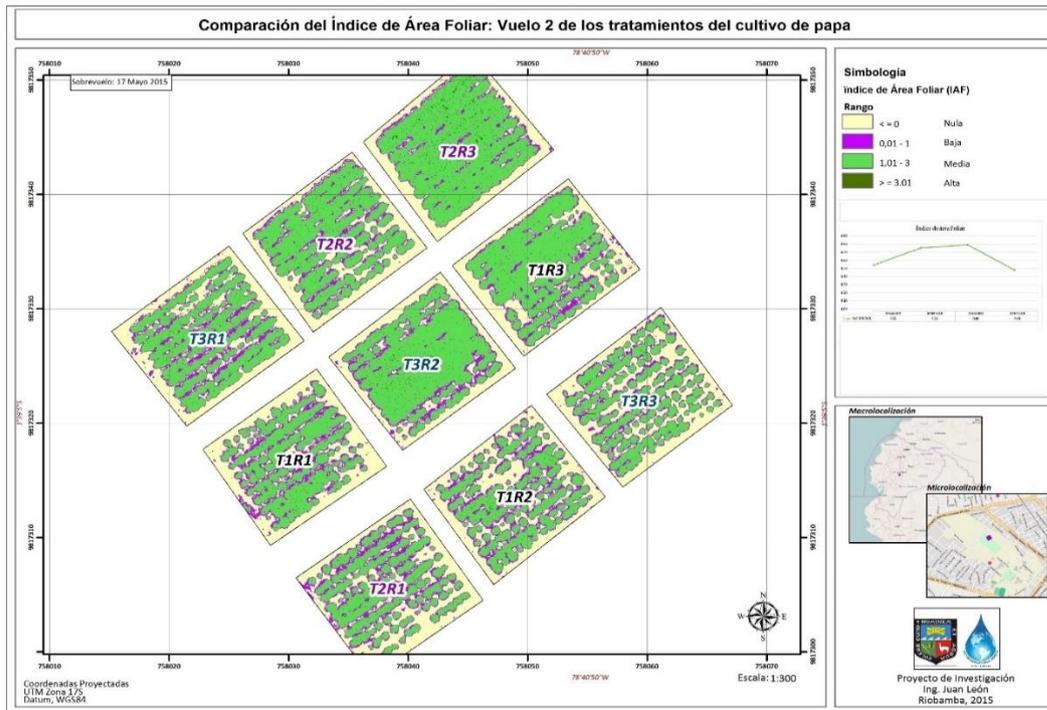


Figura N° 4.23: Mapa índices de área foliar de los tratamientos y repeticiones determinado mediante detección remota del segundo sobrevuelo.

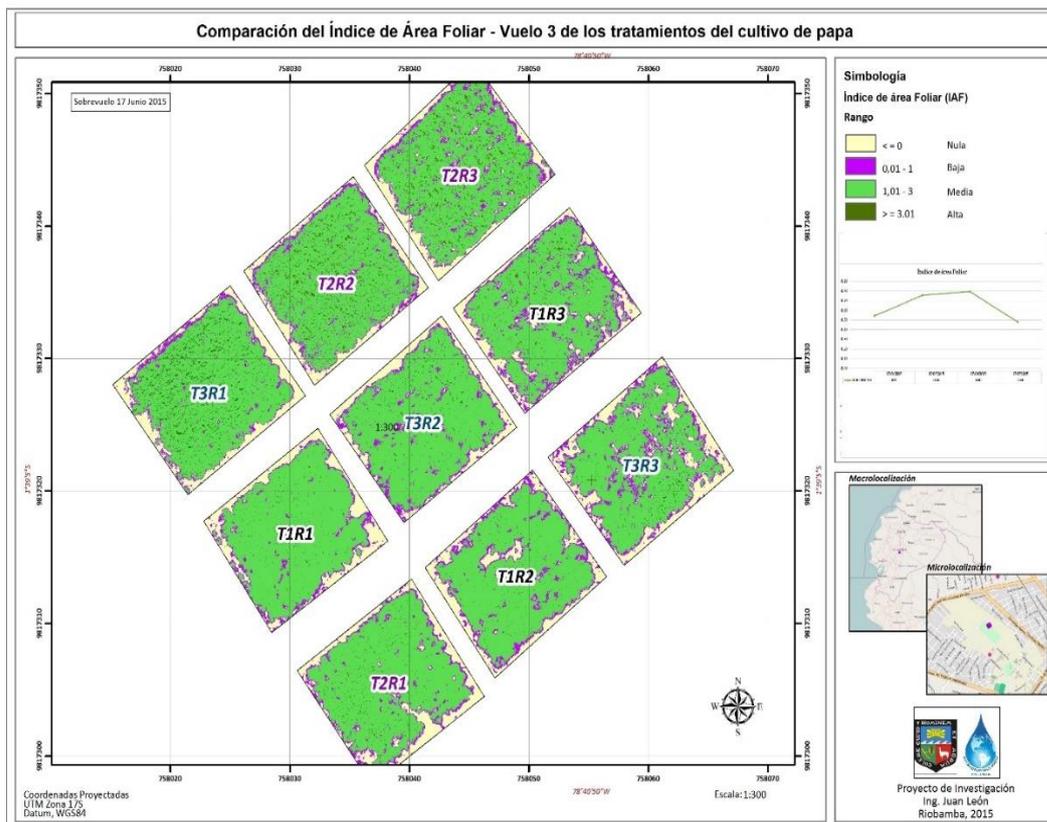


Figura N° 4.24: Mapa índice de área foliar de los tratamientos y repeticiones determinado mediante detección remota del tercer sobrevuelo

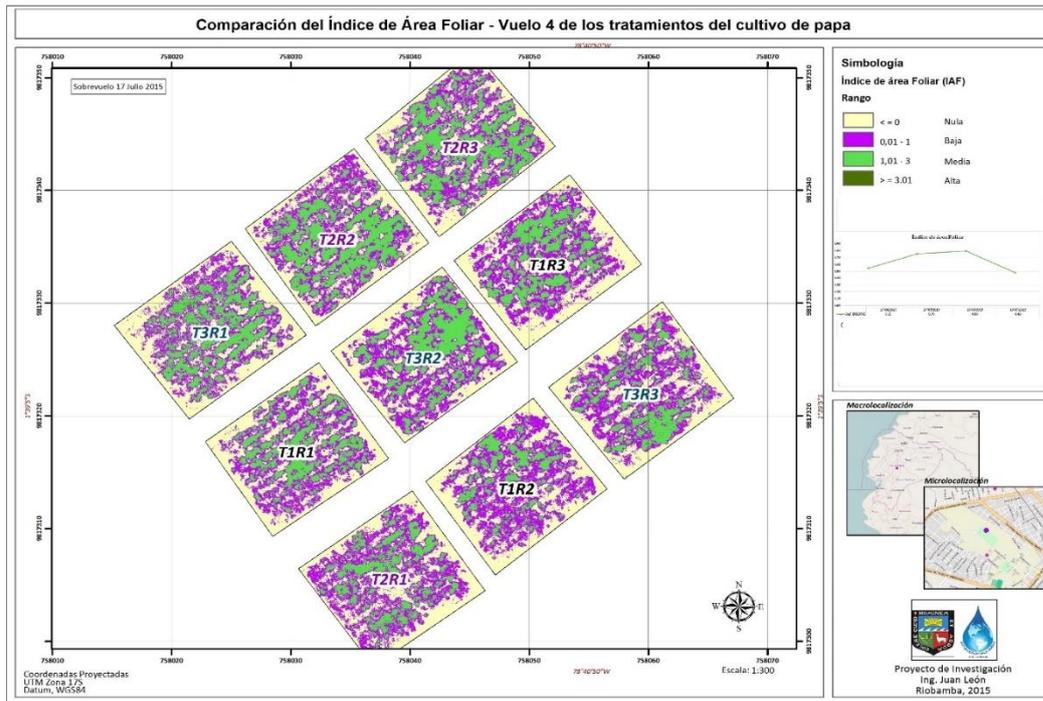


Figura N° 4.25: Mapa índice de área foliar de los tratamientos y repeticiones determinado mediante detección remota del cuarto sobrevuelo.

- **Fracción de Radiación Fotosintéticamente Activa fPAR**

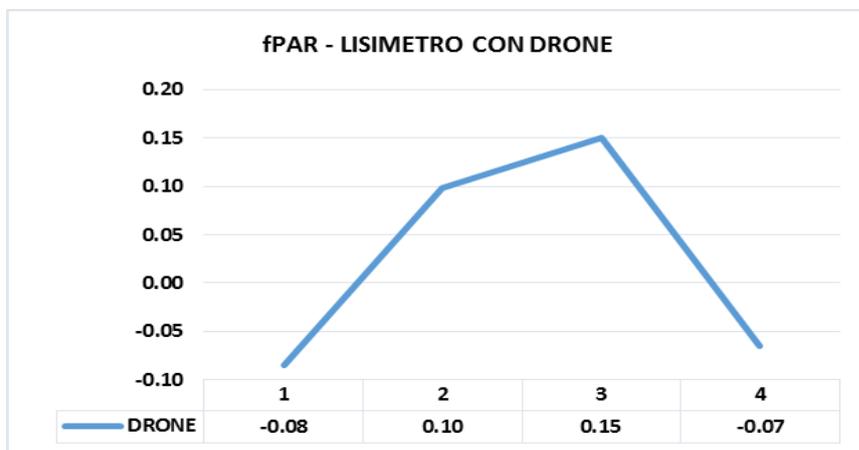


Figura N° 4.26: Fracción de radiación Fotosintéticamente Activa fPAR lisímetro

Como podemos observar en la figura 4.26 – 4.29 – 4.30 – 4.31 4.32 de fracción de radiación fotosintéticamente activa para la información con el lisímetro nos arroja que para la etapa inicial del cultivo alcanza un valor de -0.08 nm estos valores menores a la unidad se debe a que las plantas están en pleno proceso de brotación y su expresión en la superficie del suelo es mínima, para el segundo sobrevuelo que es en la fase de desarrollo alcanza un valor de 0.10 nm esta fase está en pleno desarrollo no entra todavía a su máxima expresión en el

campo, para el tercer sobrevuelo que las plantas se encuentran en estado de su máximo crecimiento denominada la fase intermedia y alcanza un valor de 0.15 nm que es el valor máximo ya que las plantas se encuentran en su máxima expresión visible, finalmente para el cuarto sobrevuelo nos encontramos el valor más bajo q incluso la primera fase ya que las plantas están en su etapa o fase final o senescencia y la actividad fotosintética es mínima ya que la planta está en el proceso de engrose final del tubérculo y el área foliar está completamente deshidratada.

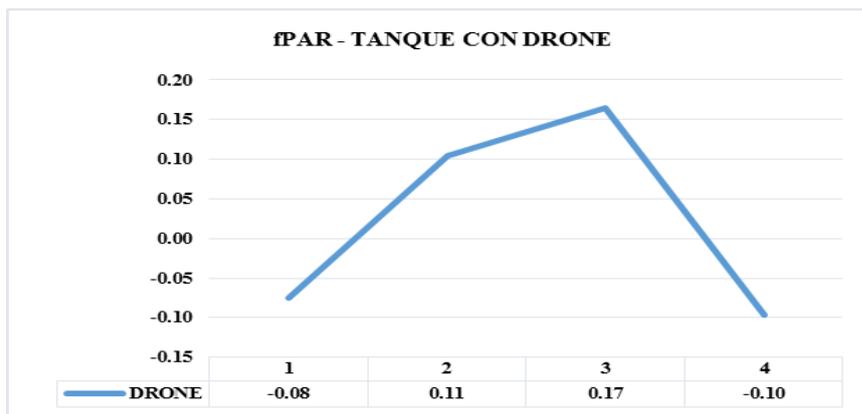


Figura N° 4.27: Fracción de radiación Fotosintéticamente Activa fPAR tanque de evaporación tipo A

Como podemos observar en la figura 4.27 4.29 – 4.30 – 4.31 4.32de fracción de radiación fotosintéticamente activa para la información con el tanque de evaporación tipo A nos arroja que para la etapa inicial del cultivo alcanza un valor de -0.08 nm estos valores menores a la unidad se debe a que las plantas están en pleno proceso de brotación y su expresión en la superficie del suelo es mínima, para el segundo sobrevuelo que es en la fase de desarrollo alcanza un valor de 0.11 nm esta fase está en pleno desarrollo no entra todavía a su máxima expresión en el campo, para el tercer sobrevuelo que las plantas se encuentran en estado de su máximo crecimiento denominada la fase intermedia y alcanza un valor de 0.17 nm que es el valor máximo ya que las plantas se encuentran en su máxima expresión visible, finalmente para el cuarto sobrevuelo nos encontramos el valor de – 0.10 ya que las plantas están en su etapa o fase final o senescencia y la actividad fotosintética es mínima ya que la planta está en el proceso de engrose final del tubérculo y el área foliar está completamente deshidratada.

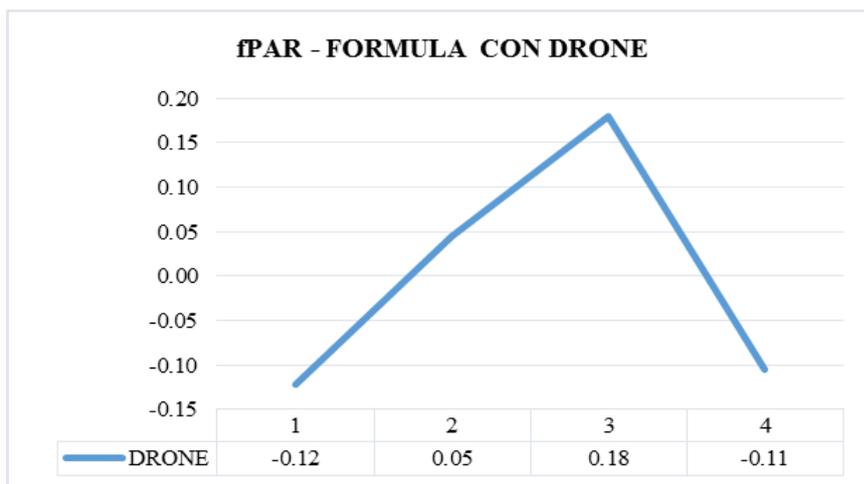


Figura N° 4.28: Fracción de radiación Fotosintéticamente Activa fPAR formula

Como podemos observar en la figura 4.28 - 4.29 – 4.30 – 4.31 4.32 de fracción de radiación fotosintéticamente activa para la información con el lisímetro nos arroja que para la etapa inicial del cultivo alcanza un valor de -0.12 nm estos valores menores a la unidad se debe a que las plantas están en pleno proceso de brotación y su expresión en la superficie del suelo es mínima, para el segundo sobrevuelo que es en la fase de desarrollo alcanza un valor de 0.05 nm esta fase está en pleno desarrollo no entra todavía a su máxima expresión en el campo, para el tercer sobrevuelo que las plantas se encuentran en estado de su máximo crecimiento denominada la fase intermedia y alcanza un valor de 0.18 nm que es el valor máximo ya que las plantas se encuentran en su máxima expresión visible, finalmente para el cuarto sobrevuelo nos encontramos el valor más bajo q incluso la primera fase ya que las plantas están en su etapa o fase final o senescencia y la actividad fotosintética es mínima ya que la planta está en el proceso de engrose final del tubérculo y el área foliar está completamente sin proceso fotosintético.

Hasta que el cultivo alcanza cobertura máxima, que no llega a 100% en ninguno de los tratamientos Jefferies y Heilbronn, (1991), la representación gráfica muestra la existencia de una relación lineal, con un coeficiente de ajuste ($R^2 = 0,93$) altamente significativo ($P < 0,01$), entre el porcentaje de cobertura y la fAPAR. Por su parte, la relación exponencial entre %C y el IAF revela que en cobertura completa el cv. Spunta presenta valores de IAF próximos a 3 ($P < 0,01$). Las curvas de ajuste de los dos tratamientos por separado no presentan diferencias respecto al comportamiento del conjunto, por lo que se lo puede considerar característico. La relación entre %C y fAPAR no resulta exactamente 1:1 y, si bien la utilización directa del valor de cobertura es más sencilla, de esta forma se producirían

ligeras subestimaciones sobre la radiación interceptada al comienzo del ciclo y sobreestimaciones algo más importantes hacia el final. Este grafico elaborado con información independiente (obtenida del tratamiento TDA), se aprecia en este caso que la curva de ajuste entre %C y fAPAR presenta, respecto de la curva identidad, valores más elevados al principio del ciclo y luego más bajos al aproximarse a cobertura completa.

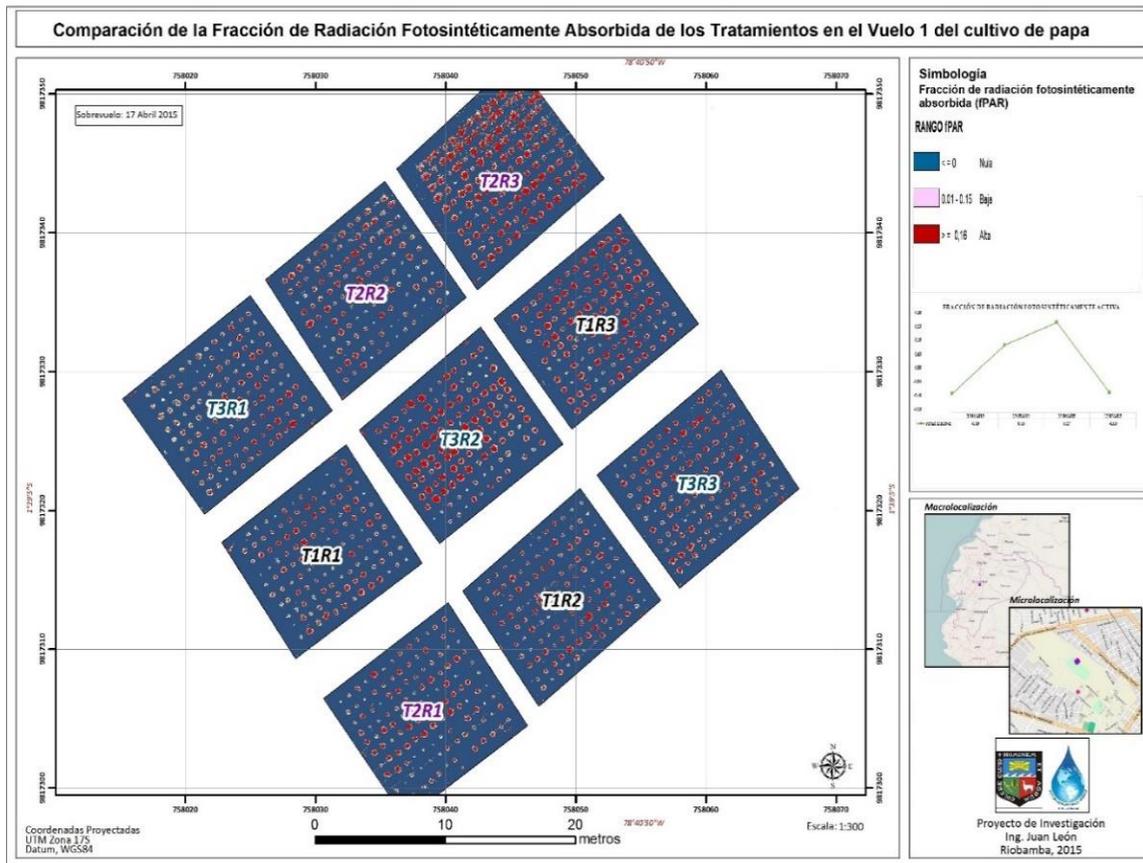


Figura N° 4.29: Mapa radiación fotosintéticamente absorbida de los tratamientos y repeticiones determinado mediante detección remota en el primer sobrevuelo

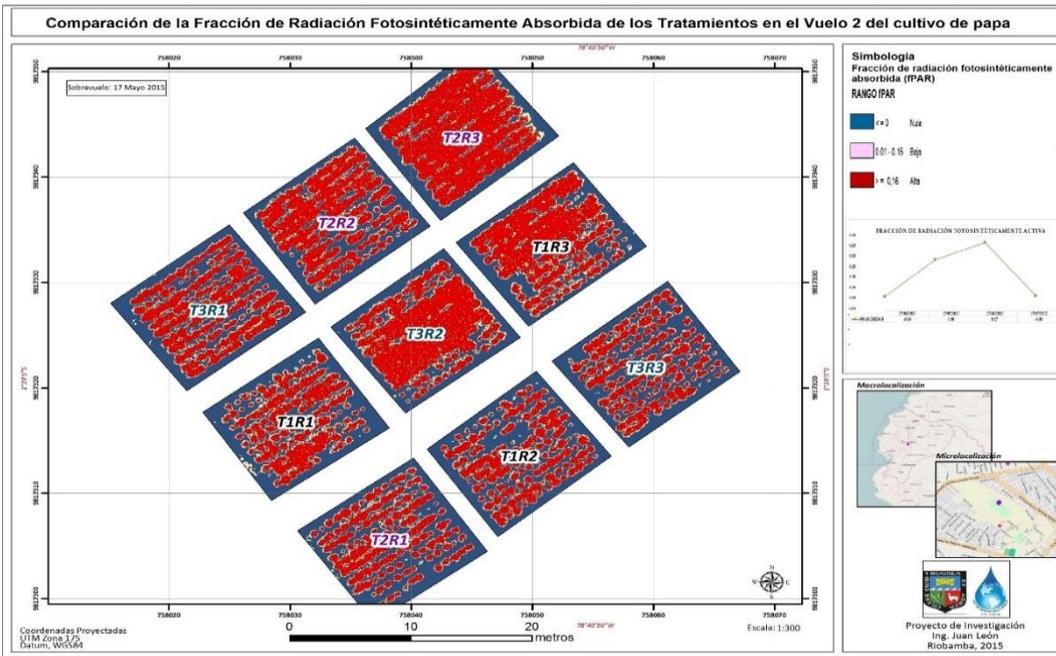


Figura N° 4.30: Mapa de radiación fotosintéticamente absorbida de los tratamientos y repeticiones determinado mediante detección remota del segundo sobrevuelo

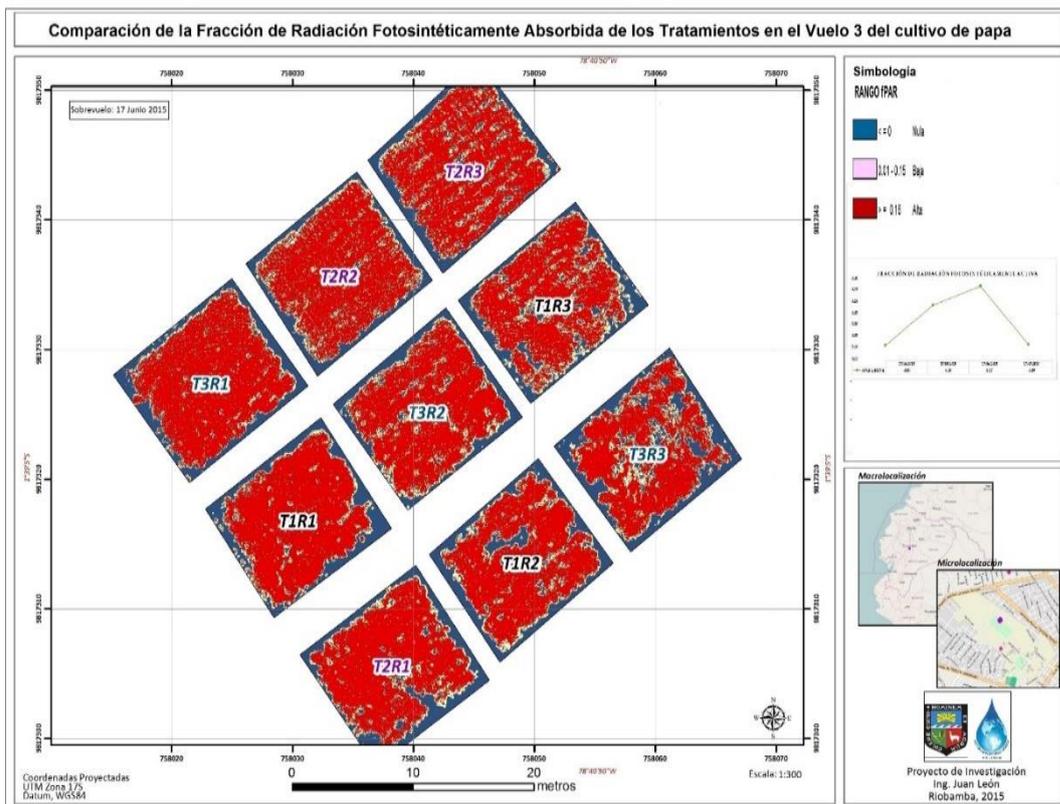


Figura N° 4.31: Mapa de radiación fotosintéticamente absorbida de los tratamientos y repeticiones determinado mediante detección remota del tercer sobrevuelo

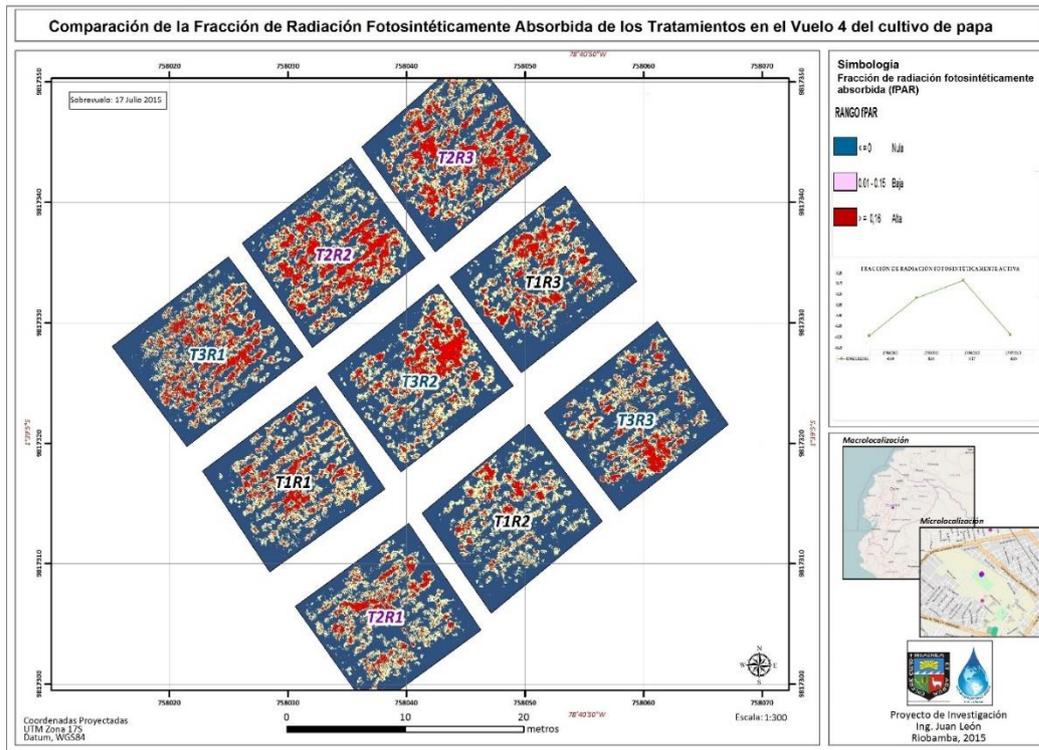


Figura N° 4.32: mapa de radiación fotosintéticamente absorbida de los tratamientos y repeticiones determinado mediante detección remota del cuarto sobrevuelo

- **Fracción de radiación fotosintéticamente activa F_c**



Figura N° 4.33: Fracción de radiación fotosintéticamente activa F_c lisímetro

Como podemos observar en las figuras 4.33 – 4.36 – 4.37 – 4.38 – 4.39 podemos analizar que la fracción de radiación fotosintéticamente activa en el lisímetro tiene una tendencia similar a la curva del K_c que en la primera fase se encuentran las plantas en su mínima expresión de brotación por lo tanto no toda la vegetación está en la superficie del suelo por esta razón los valores son negativos de -0.06, en la fase de desarrollo se nota que la lectura

sube a 0.03 como las plantas en su totalidad ya han germinado están expuestas en la superficie del suelo tiene más exposición para demostrar esta expresión de fotosíntesis activa, para la fase intermedia que es de su máximo crecimiento foliar alcanza el mismo valor que la fase de desarrollo, para la fase final o senescencia el valor de la actividad fotosintética baja a -0.03 ya que los tallos se encuentran en estado de deshidratación y la planta está en proceso de tuberización.



Figura N° 4.34: Fracción de radiación fotosintéticamente activa Fc tanque de evaporación tipo A

Como podemos observar en la figura 4.34 – 4.36 – 4.37 – 4.38 – 4.39 podemos analizar que la fracción de radiación fotosintéticamente activa en el tanque de evaporación tipo A tiene una tendencia similar a la curva del Kc que en la primera fase se encuentran las plantas en su mínima expresión de brotación por lo tanto no toda la vegetación está en la superficie del suelo por esta razón los valores son negativos de -0.05, en la fase de desarrollo se nota que la lectura sube a 0.04 como las plantas en su totalidad ya han germinado están expuestas en la superficie del suelo tiene más exposición para demostrar esta expresión de fotosíntesis activa, para la fase intermedia que es de su máximo crecimiento foliar alcanza el valor de 0.09 es el valor más alto del periodo , para la fase final o senescencia el valor de la actividad fotosintética baja a -0.07 ya que los tallos se encuentran en estado de deshidratación y la planta está en proceso de tuberización

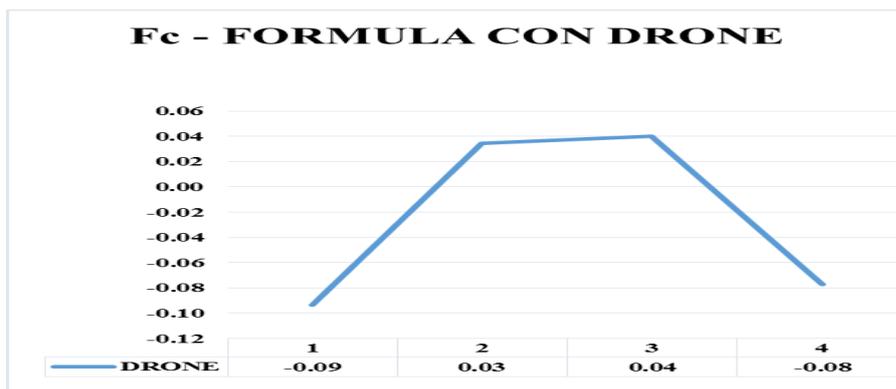


Figura N° 4.35: Fracción de radiación fotosintéticamente activa Fc formula

Como podemos observar en la figura 4.35 – 4.36 – 4.37 – 4.38 – 4.39 podemos analizar que la fracción de radiación fotosintéticamente activa en la formula A tiene una tendencia similar a la curva del Kc que en la primera fase se encuentran las plantas en su mínima expresión de brotación por lo tanto no toda la vegetación está en la superficie del suelo por esta razón los valores son negativos de -0.09, en la fase de desarrollo se nota que la lectura sube a 0.03 como las plantas en su totalidad ya han germinado están expuestas en la superficie del suelo tiene más exposición para demostrar esta expresión de fotosíntesis activa, para la fase intermedia que es de su máximo crecimiento foliar alcanza el valor de 0.04 es el valor más alto del periodo , para la fase final o senescencia el valor de la actividad fotosintética baja a -0.08 ya que los tallos se encuentran en estado de deshidratación y la planta está en proceso de tuberización

Fracción de cobertura vegetal verde, es 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. En el vuelo uno presenta valores por debajo del 0 ya que corresponde al crecimiento inicial de la planta donde no presenta una gran cobertura vegetal verde; no siendo así en el vuelo dos donde, alcanza el valor máximo de Fc. En el vuelo tres y cuatro los valores decrecen progresivamente, que corresponde a la etapa de maduración y senescencia del cultivo.

Corresponde a la proporción de la radiación incidente que es absorbida por las plantas, en su relación directa con el crecimiento de las plantas, evaluando la energía consumida en el proceso fotosintético. Como describe la gráfica, en la etapa inicial de crecimiento de la planta no presenta valores de absorción de radiación porque está por debajo de 0, no siendo así en

el vuelo dos, ya que presenta el valor más alto que corresponde a la etapa de floración y el crecimiento máximo de la planta. En el vuelo cuatro se observa ya un decrecimiento de la radiación absorbida.

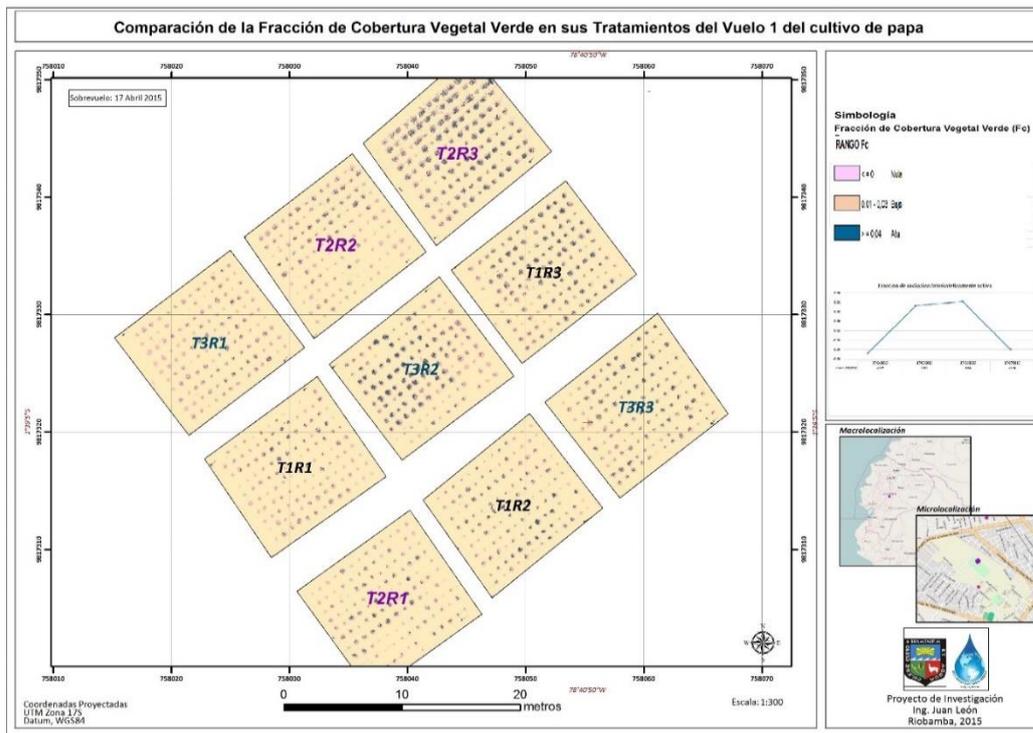


Figura N° 4.36: Mapa de cobertura vegetal de los tratamientos y repeticiones determinado mediante detección remota del primer sobrevuelo

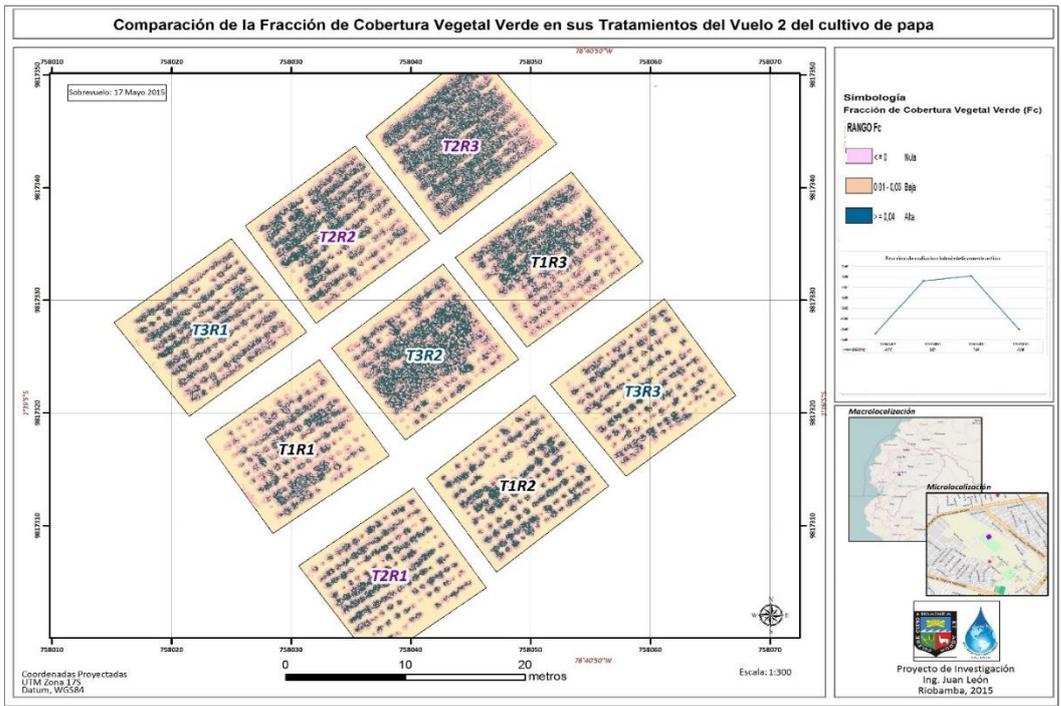


Figura N° 4.37: Mapa de cobertura vegetal de los tratamientos y repeticiones determinado mediante detección remota del segundo sobrevuelo

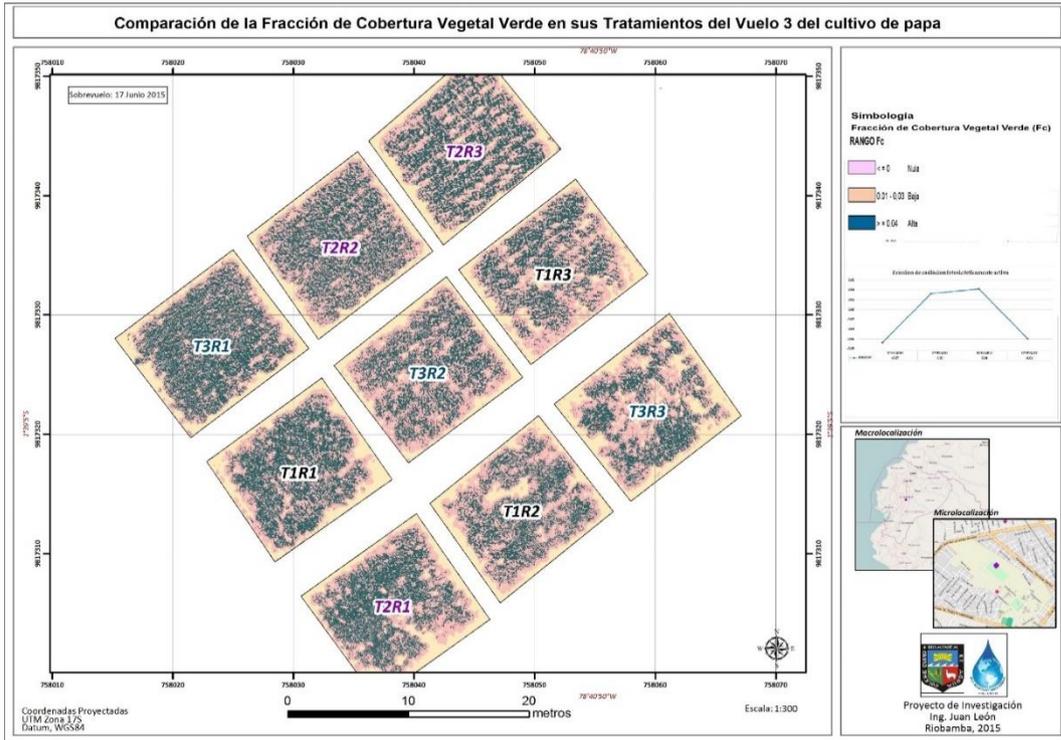


Figura N° 4.38: Mapa de cobertura vegetal de los tratamientos y repeticiones determinado mediante detección remota del tercer sobrevuelo

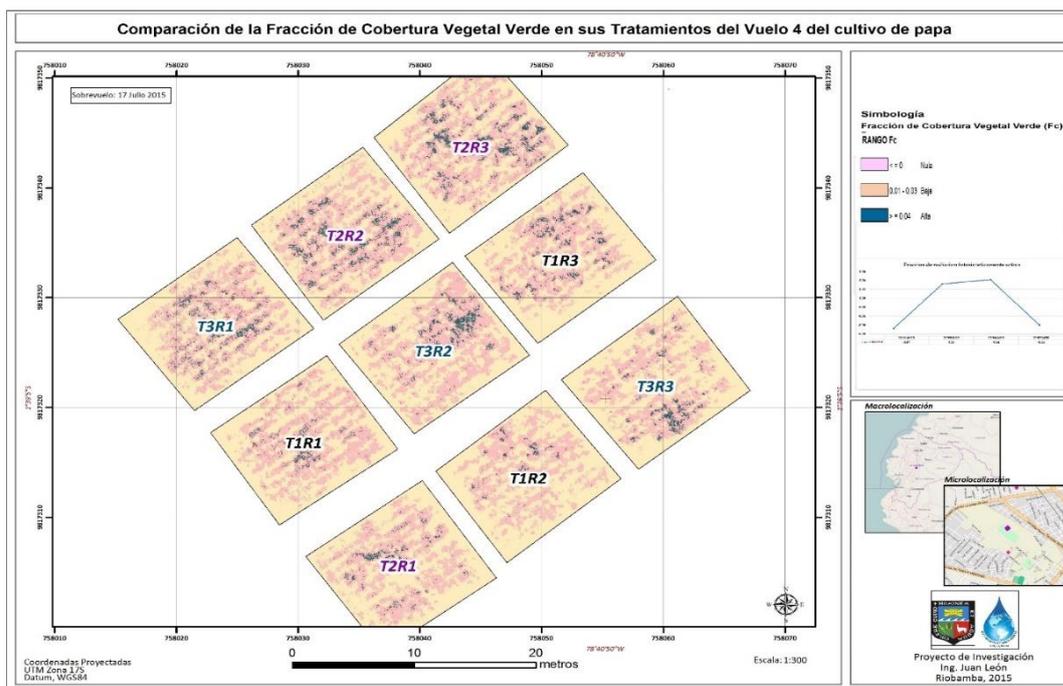


Figura N° 4.39: Mapa de cobertura vegetal de los tratamientos y repeticiones determinado mediante detección remota del cuarto sobrevuelo

4.2.3 Coeficiente del cultivo Kc

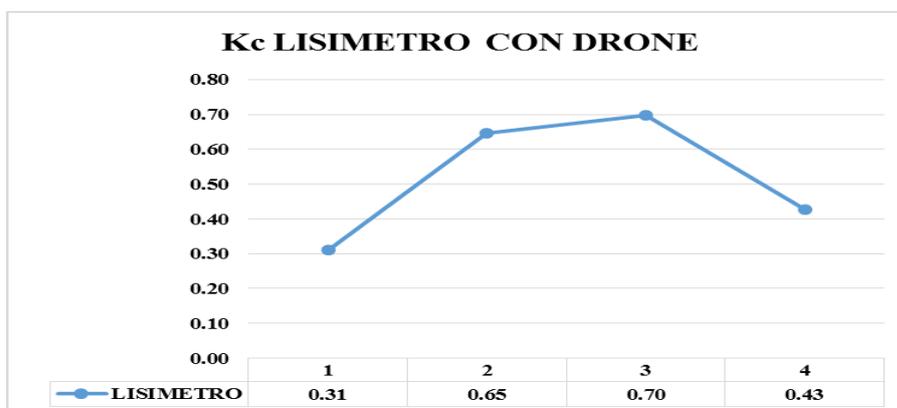


Figura N° 4.40: Coeficiente del cultivo Kc lisímetro

El Kc determinado con valores de NDVI del lisímetro nos identifica que para la primera fase que es la inicial alcanza un valor de 0.31, para la fase de desarrollo un valor de 0.65, para la fase intermedia un valor de 0.70 y para la fase final o senescencia baja hasta 0.43

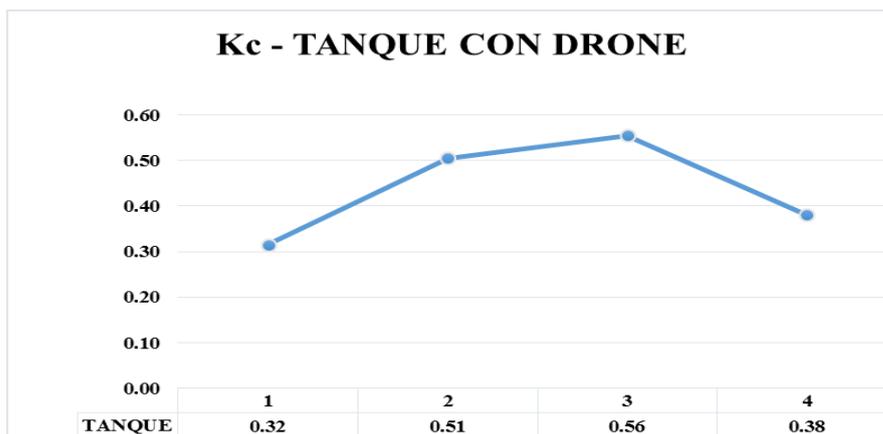


Figura N° 4.41: Coeficiente del cultivo Kc tanque evaporación tipo A

El Kc determinado con valores de NDVI del tanque de evaporación tipo A nos identifica que para la primera fase que es la inicial alcanza un valor de 0.32, para la fase de desarrollo un valor de 0.51, para la fase intermedia un valor de 0.56 y para la fase final o senescencia baja hasta 0.38

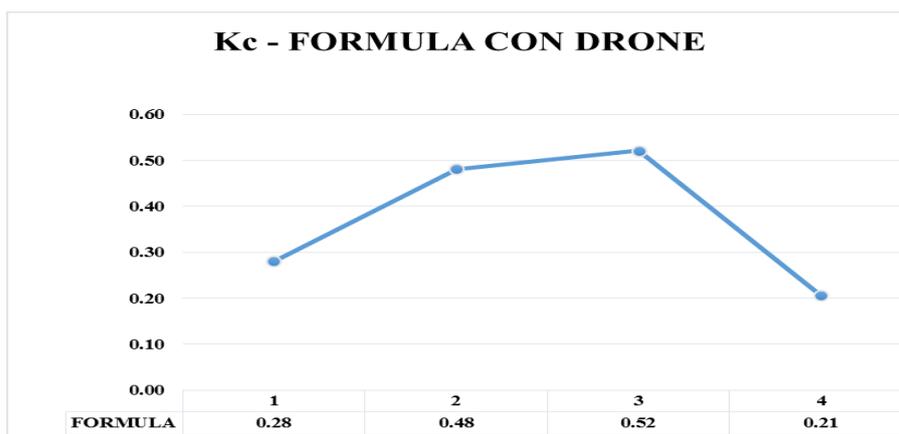


Figura N° 4.42: Coeficiente del cultivo Kc formula

El Kc determinado con valores de NDVI de la formula nos identifica que para la primera fase que es la inicial alcanza un valor de 0.28, para la fase de desarrollo un valor de 0.48, para la fase intermedia un valor de 0.52 y para la fase final o senescencia baja hasta 0.21

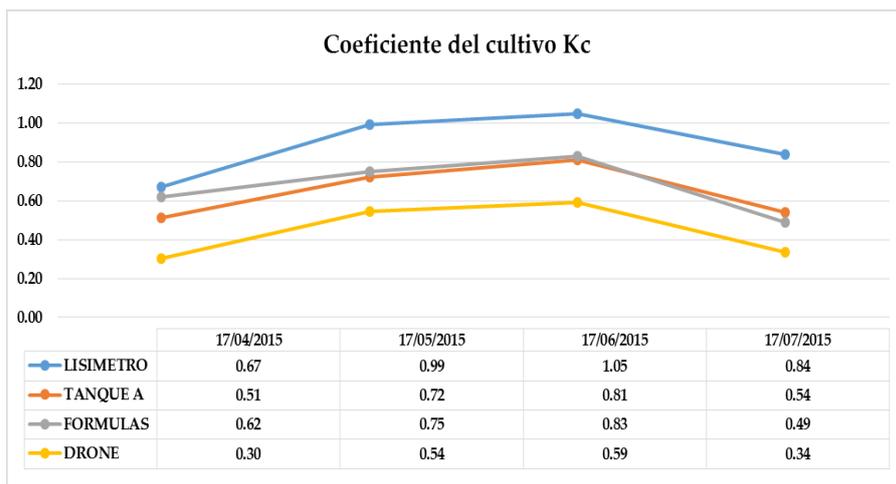


Figura N° 4.43: Coeficiente del cultivo Kc promedio tratamientos.

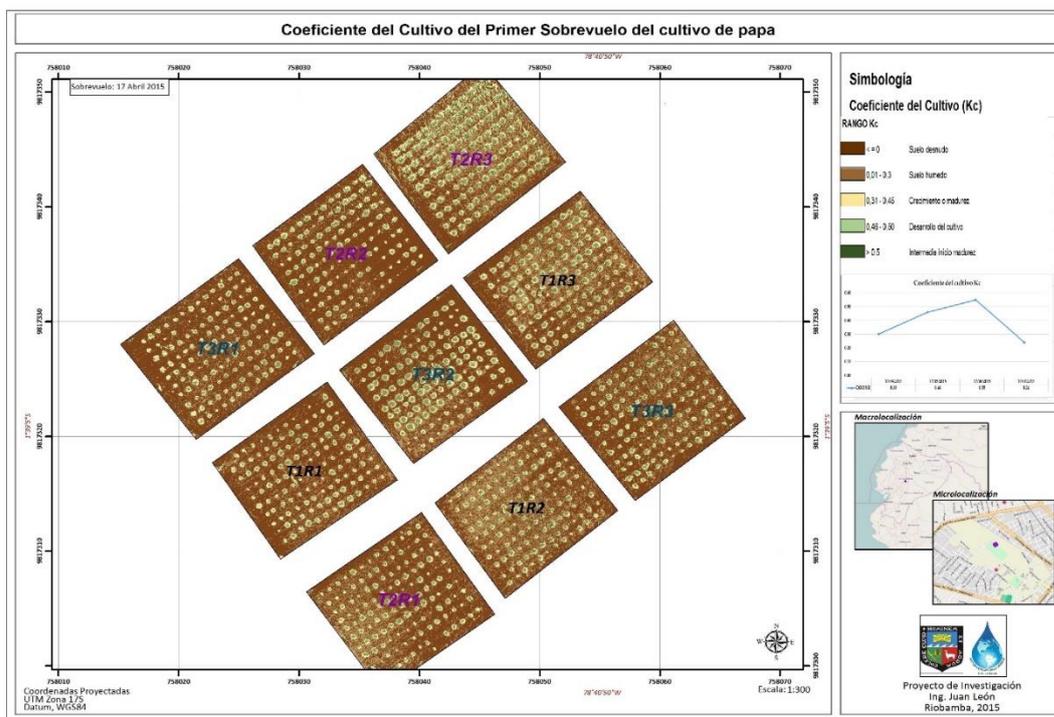
Como podemos observar en la figura 4.43. El resultado final la relación encontrada del coeficiente del cultivo para la papa comparando los métodos del lisímetro de drenaje, tanque de evaporación, tipo A, formulas empíricas y fotografías tomadas con el drone podemos indicar que se nota claramente la distribución de los Kc en las etapas, de cada uno de los tratamientos tienen tendencias similares, por lo cual se requiere hacer ajuste con un cociente que relacione directamente el lisímetro con las fotografías del drone. El factor de ajuste hallado es para a fase inicial se debe multiplicar por 2.22, para la fase de desarrollo por el factor 1.82, para la fase intermedia 1.78 y para la fase final o de senescencia 2.49

Existen diversas metodologías utilizadas para la determinación del consumo de agua necesario para un cultivo. Por ejemplo, (Tosso 1976), señala que el consumo de agua de un cultivo se determina in situ mediante el uso de la bandeja de evaporación tipo A, siendo ésta una técnica que permite aplicar el agua de riego al cultivo en función de factores relacionados con el estado de desarrollo fenológico (Kc). Por su parte, (Doorenbos y Pruitt 1975) reportan referencialmente los siguientes valores de coeficientes de cultivo (Kc) para el cultivo de papa: estados iniciales de 0,4 a 0,5; desarrollo vegetativo de 0,7 a 0,8; estado medio de desarrollo de 1,05 a 1,2; estado tardío de desarrollo de 0,85 a 0,95; estado de maduración de 0,7 a 0,75. Valores similares a los determinados en este estudio.

En este contexto, (García Huidobro 1980) señala que para el cultivo de papa, el coeficiente de cultivo alcanza su máximo valor cuando se inicia el desarrollo de tubérculo hasta el término del crecimiento del follaje. Bajo las condiciones climáticas de la Novena Región de Chile (37°- 40° Latitud Sur; 70° -74° Longitud Oeste), (Jerez et al. 1994), utilizando

riego por aspersión, reportan los siguientes valores de coeficiente de cultivo (Kc) para papa por mes: octubre 0,25; noviembre 0,41; diciembre 0,7; enero 0,77; febrero 0,74 y marzo 0,59.

El Coeficiente de cultivo Kc comienza siendo pequeño y aumenta a medida que la planta cubre más el suelo. Los valores máximos de coeficiente de cultivo se alcanzan en la floración, se mantienen durante la fase media y finalmente decrecen durante la fase de maduración, como lo indica la gráfica, que inicia con valores 0.30 alcanzando valores máximos en el tercer vuelo.



Fuente: Juan León Ruiz- Pamela Paula

Figura N° 4.44: Mapa del coeficiente del cultivo Kc de los tratamientos y repeticiones determinado mediante detección remota del primer sobrevuelo

Del sobrevuelo del día 17 de abril presentamos el mapa de Kc en la Figura 4.44, 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 .

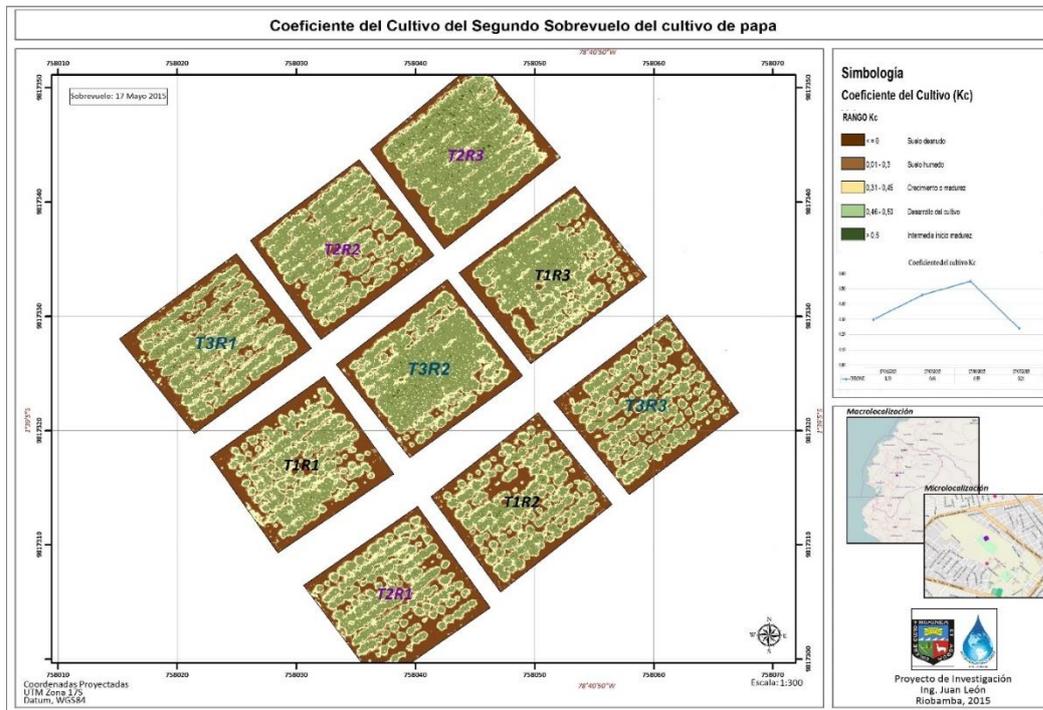


Figura N° 4.45: Mapa del coeficiente del cultivo Kc de los tratamientos y repeticiones determinado mediante detección remota del segundo sobrevuelo

De la segunda toma realizada el día 17 de mayo de 2015 se obtuvo el mapa de Kc de cultivo mostrado en la Figura 4.45, 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. 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.

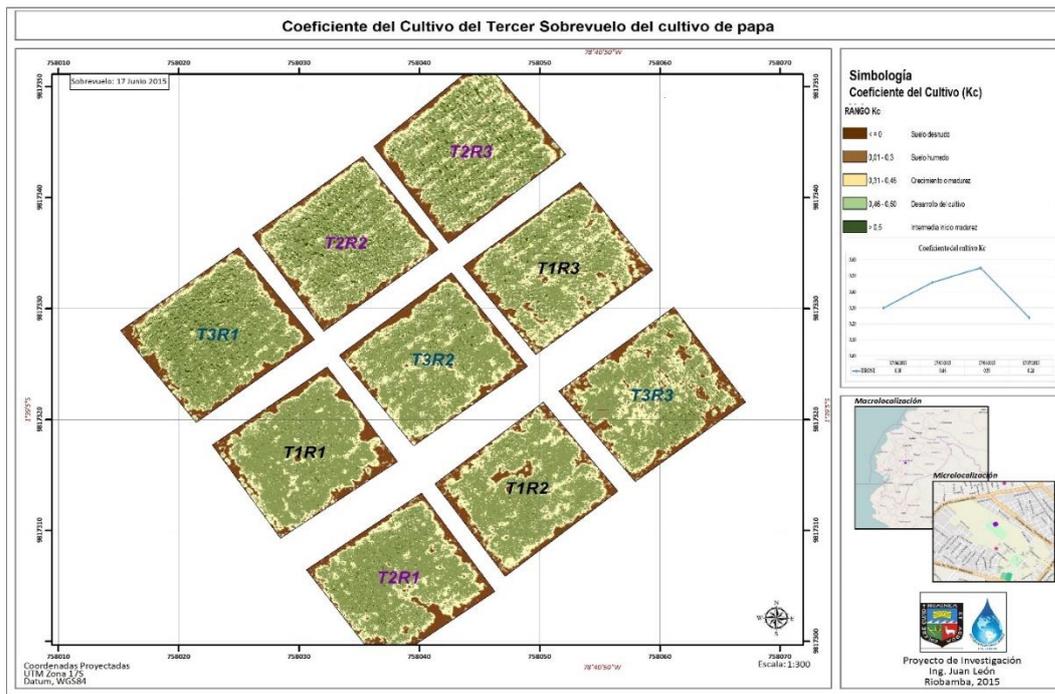


Figura N° 4.46: Mapa del coeficiente del cultivo Kc de los tratamientos y repeticiones determinado mediante detección remota del tercer sobrevuelo

La Figura 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).

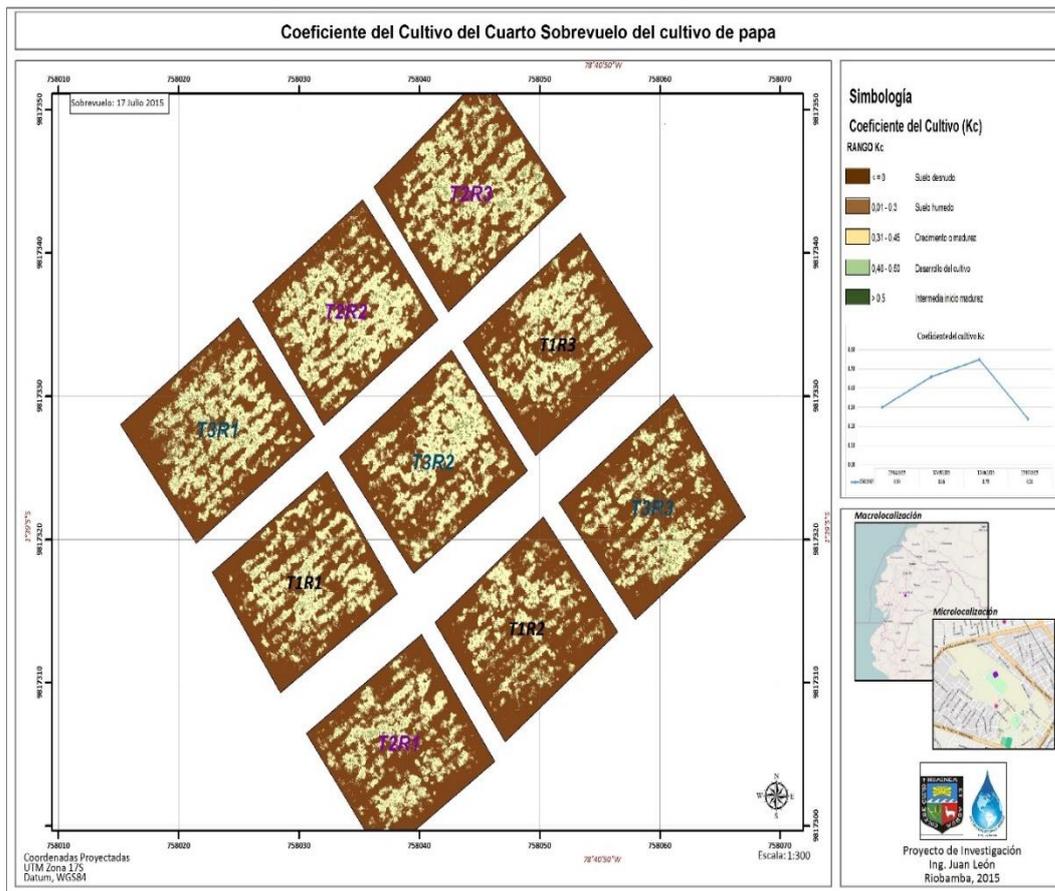


Figura N° 4.47: Mapa del coeficiente del cultivo Kc de los tratamientos y repeticiones determinado mediante detección remota del cuarto sobrevuelo

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 4.44 – 4.45 – 4.46 – 4.47 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.

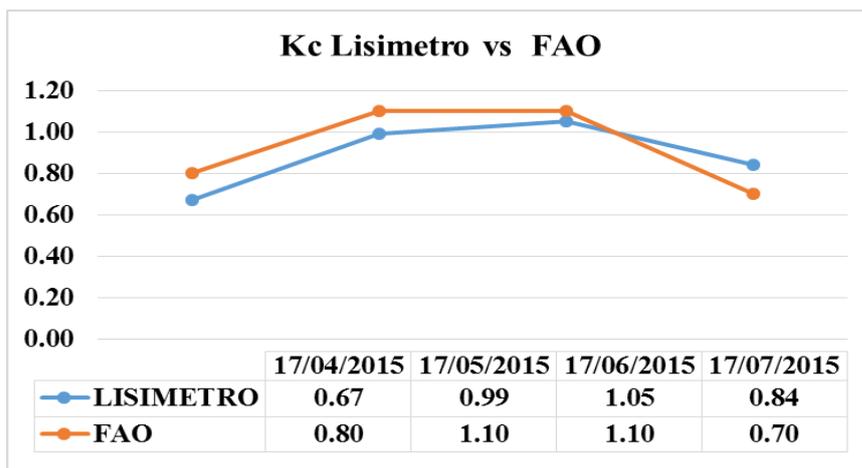


Figura N° 4.48: Coeficiente del cultivo Kc comparado con la FAO

Haciendo un análisis entre el Kc determinado por el lisímetro en el estudio con el Kc de la FAO las curvas características son similares es así que el lisímetro para la fase inicial nos da un valor de 0.67 mientras que la FAO nos da un valor de 0.8, para la fase de desarrollo el lisímetro en el estudio nos arroja un valor de 0.99 y la FAO 1.10, para la fase intermedia el lisímetro del ensayo nos arroja un valor de 1.05 mientras que la FAO nos da un valor de 1.10 y para la fase final el lisímetro del ensayo nos da un valor de 0.84 que es ligeramente más alto que el valor de la FAO, esto demuestra la exactitud de los valores del lisímetro del estudio que en todo caso nos indica que aplicado la lámina de riego demostrada con los lisímetros el consumo y ahorro de agua es menor en las tres primeras fases del desarrollo del cultivo de papa.(figura N° 4.48)

4.3 EVALUACIONES DE RENDIMIENTO Y VOLUMEN DE AGUA UTILIZADA

4.3.1 Rendimiento

- **Numero de tubérculos por tratamiento**

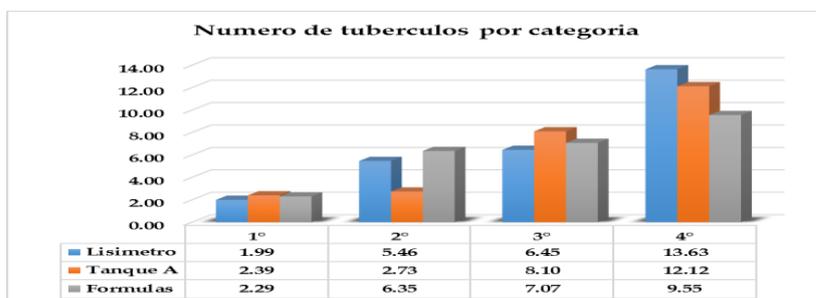


Figura N° 4.49: Numero de tubérculos por categoría por tratamientos

Cuadro N° 4.6: ANOVA número de tubérculos por categoría.

	1°	2°	3°	4°
Lisímetro	1.99 A	5.46 A	6.45 A	13.63 A
Tanque A	2.39 A	2.73 B	8.1 A	12.12 A
Formulas	2.29 A	6.35 A	7.07 A	9.55 B

Fuente: Juan León Ruiz

Como podemos observar en la figura 4.49 en la variable número de tubérculos por categoría y por planta, en lo que corresponde a los tubérculos de la primera categoría entre repeticiones y entre tratamientos estadísticamente nos indican que son no significativos con un coeficiente de variación de 6.70 ubicándose los tres tratamientos del rango A. Para la segunda categoría como resultado obtenemos que estadísticamente es no significativo entre las repeticiones pero para los tratamientos son altamente significativos con una media de 5.46 tubérculos para el tratamiento (cuadro N° 4.6) con lisímetro ubicado con el rango A, para el tratamiento dos nos indica una media de 2.73 tubérculos que se ubica en el nivel B y para el tratamiento tres presenta 6.35 tubérculos y se ubica en el nivel A, para esta variable nos encontramos un coeficiente de variación de 10.26. Para la tercera categoría como resultado obtenemos que estadísticamente es no significativo tanto para las repeticiones así como para los tratamientos con una media de 6.45 tubérculos para el tratamiento con lisímetro ubicado con el rango A, para el tratamiento dos nos indica una media de 8.10 tubérculos que se ubica en el nivel A y para el tratamiento tres presenta 7.07 tubérculos y se ubica en el nivel A, para esta variable nos encontramos un coeficiente de variación de 8.99. Para la cuarta categoría como resultado obtenemos que estadísticamente es no significativo entre las repeticiones pero para los tratamientos son altamente significativos con una media de 13.63 tubérculos para el tratamiento con lisímetro ubicado con el rango A, para el tratamiento dos nos indica una media de 12.12 tubérculos que se ubica en el nivel A y para el tratamiento tres presenta una media de 9.55 tubérculos y se ubica en el nivel B, para esta variable nos encontramos un coeficiente de variación de 6.94.

- **Peso promedio por tubérculo por categoría.**

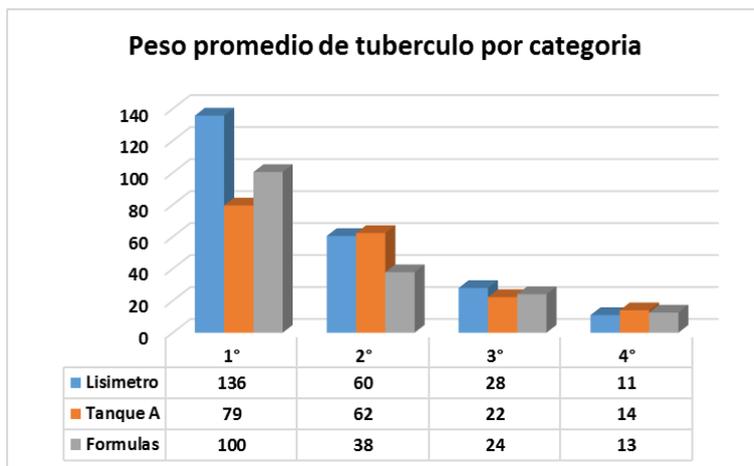


Figura N° 4.50: Peso en gramos por tubérculo y por categoría

Para la determinación de la categoría se clasificarán los tubérculos cosechados de la parcela total en tres: papa comercial de primera (peso mayor a 60 g), papa comercial de segunda “semilla” (peso entre 30 a 60 g.) tercera (peso menor a 30 g). y papa desecho deformes y menuda cuarta categoría

- **Rendimiento kg/parcela**

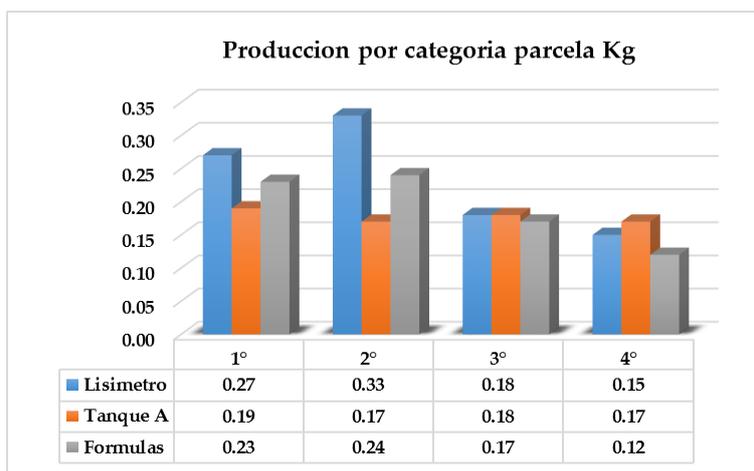


Figura N° 4.51: Rendimiento kg/parcela

Cuadro N° 4.7: ANOVA producción por categoría por parcela.

	1°	2°	3°	4°
Lisímetro	0.27 A	0.33 A	0.18 A	0.15 A
Tanque A	0.19 C	0.17 B	0.18 A	0.17 A
Formulas	0.23 B	0.24 B	0.17 A	0.12 A

Fuente: Juan León Ruiz

En la presente investigación, las principales diferencias en el rendimiento y concentración de calibres fueron acentuadas por la presencia de agua durante la etapa de llenado de tubérculo, período que coincide con el máximo valor Kc del cultivo y por lo tanto, cuando más requerimientos netos presenta. En este sentido se podría concluir que la variedad Natividad, responde positivamente a un riego frecuente y tardío, resultando fundamental mantener el riego durante la etapa de desarrollo y floración. En este sentido, (Nissen 1999) reporta para la papa incrementos en la zona de Valdivia del 111,4% y 152,2% para riegos frecuentes y poco frecuentes, respectivamente, en relación a un testigo seco.

Los presentes resultados también mostraron que el componente producción por parcela en kg determina en menor grado el rendimiento final (figura N°4.51). Esto se explica, probablemente porque en la variedad Natividad este componente se define antes de iniciar los meses críticos de déficit hídrico para el área de estudio.

En el cuadro N° 4.7 se aprecia que para producción en la primera categoría estadísticamente para las repeticiones presenta que es significativo y para tratamientos altamente significativo, el tratamiento con lisímetro se ubica en el rango A con una media de 0.27, el tratamiento dos con una media de 0.19 ubicándose en el rango C y para el tratamiento tres con una media de 0.23 ubicándose en el rango B, en el análisis de la producción primera categoría por parcela en Kg logramos determinar un coeficiente de variación de 2.83.

Para producción en la segunda categoría por parcela estadísticamente para las repeticiones presenta que es significativo y para tratamientos altamente significativo, el tratamiento con lisímetro se ubica en el rango A con una media de 0.33, el tratamiento dos con una media de 0.17 ubicándose en el rango B y para el tratamiento tres con una media de 0.24 ubicándose en el rango B, en el análisis de la producción de la segunda categoría por parcela en Kg logramos determinar un coeficiente de variación de 12.43.

Para producción en la tercera categoría estadísticamente para las repeticiones presenta que tanto para repeticiones como para tratamientos es no significativo, los tres tratamientos se ubican en el rango A, el tratamiento con lisímetro con una media de 0.15, los tratamientos dos y tres con una media de 0.18 cada uno, en el análisis de la producción tercera categoría por parcela en Kg logramos determinar un coeficiente de variación de 28.17.

Para producción en la cuarta categoría estadísticamente para las repeticiones presenta que tanto para repeticiones como para tratamientos es no significativo, los tres tratamientos se ubican en el rango A, el tratamiento con lisímetro con una media de 0.15, el tratamiento dos con una media de 0.17 y el tratamiento tres con una media de 0.12, en el análisis de la producción de cuarta categoría por parcela en Kg logramos determinar un coeficiente de variación de 16.80.

- **Rendimiento total por categoría kg/ha**

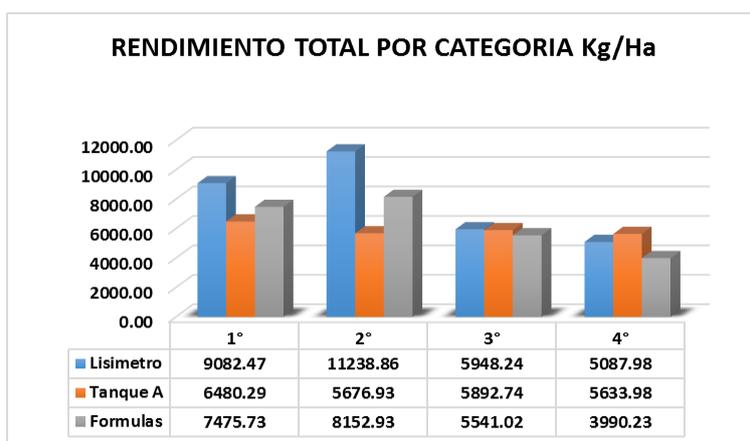


Figura N° 4.52: Rendimiento total por categoría Kg/ha

Cuadro N° 4.8: ANOVA para rendimiento total kg/ha por categoría

	1°	2°	3°	4°
Lisímetro	9082.47 A	11238.86 A	5948.24 A	5087.98 A
Tanque A	6480.29 C	5676.93 B	5892.74 A	5633.98 A
Formulas	7475.73 B	8152.93 B	5541.02 A	3990.23 A

Fuente: Juan León Ruiz

En el análisis de varianza (cuadro N° 4.8) para el rendimiento total en kilogramos por hectárea por categoría podemos indicar para la primera categoría la comparación entre los

tratamientos es altamente significativo, mientras que para las repeticiones es significativo, ubicándose en primer lugar la producción aplicada la lámina de riego con lisímetro que alcanza un peso de 9092 kg, para el tratamiento aplicado la lámina de riego con la formula alcanza el segundo lugar con un peso de 7475 kg y en tercer lugar nos encontramos el rendimiento aplicado la lámina de riego con el tanque de evaporación tipo A que alcanza un peso de 6480 kilogramos por hectárea respectivamente este análisis presenta un coeficiente de variación de 2.71%.

En el análisis de varianza para el rendimiento total en kilogramos por hectárea por categoría podemos indicar para la segunda categoría la comparación entre los tratamientos es altamente significativo, mientras que para las repeticiones es significativo, ubicándose en primer lugar la producción aplicada la lámina de riego con lisímetro que alcanza un peso de 11238, para el tratamiento aplicado la lámina de riego con la formula alcanza el segundo lugar con un peso de 8152 y en tercer lugar nos encontramos el rendimiento aplicado la lámina de riego con el tanque de evaporación tipo A que alcanza un peso de 5676 kilogramos por hectárea respectivamente este análisis presenta un coeficiente de variación de 12.46 %.

En el análisis de varianza para el rendimiento total en kilogramos por hectárea por categoría podemos indicar para la tercera y cuarta categoría la comparación entre los tratamientos y repeticiones nos indica que estadísticamente son no significativos, por lo tanto los tres tratamientos se encuentran en la misma ubicación.

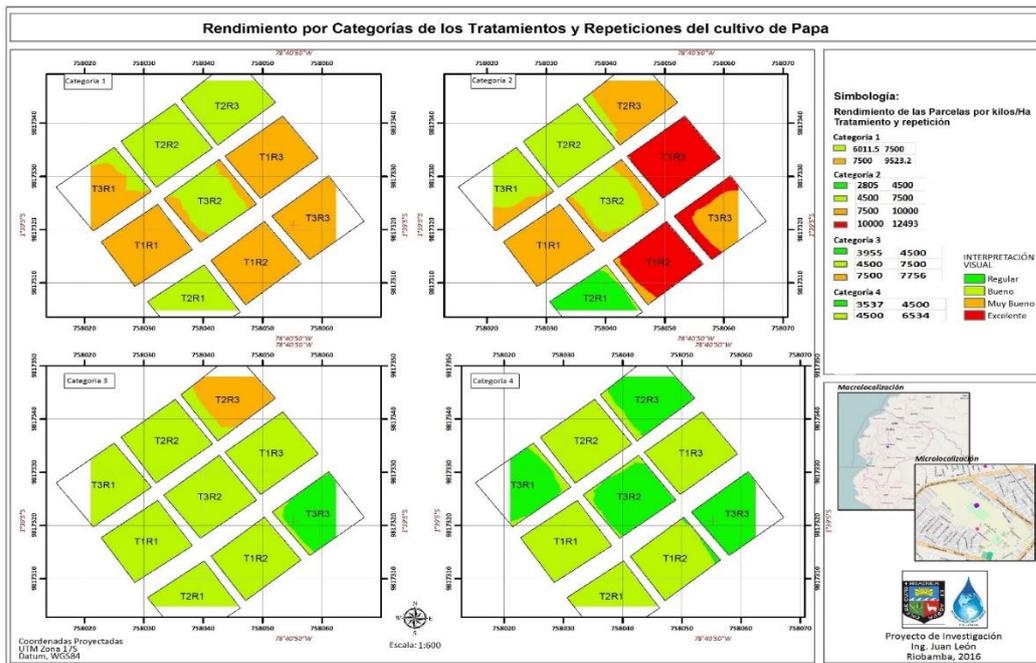


Figura N° 4.53: Mapa del rendimiento por categorías de los tratamientos y repeticiones determinado mediante detección remota

- Rendimiento total ton /ha

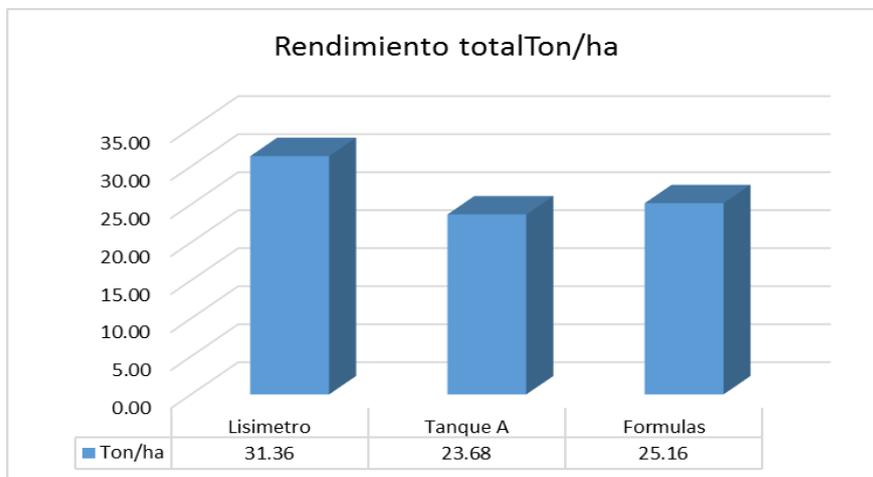


Figura N° 4.54: Rendimiento total Ton/ha

Cuadro N° 4.9: ANOVA para rendimiento total ton /ha

	Kg/ha	Ton/ha
Lisimetro	31357.55 A	31.35 A
Tanque A	23683.91 B	23.68 B
Formulas	25159.11 B	25.15 B

Fuente: Juan León Ruiz

La cosecha se realizó en forma manual en el mes de agosto del 2015. Los tubérculos cosechados fueron llevados a laboratorio, clasificados por calibre, para posteriormente determinar su peso en términos de kilogramos por hectárea. Los datos obtenidos fueron sometidos a un análisis de varianza y al test de comparación de media de Tukey. Se usó el programa computacional IBM SPSS Statistics Base v 22.0.

Los resultados obtenidos cuadro N° 4.9 muestran que existieron diferencias altamente significativas entre tratamientos mientras que para las repeticiones muestran que estadísticamente son no significativos. La aplicación de la lámina de riego medida y aplicada con el lisímetro durante el ciclo del cultivo siembra cosecha, alcanzó los mayores rendimientos, con 31.357 kg/ha, mientras que para los tratamientos que se aplicaron la lámina de riego de acuerdo a la medida con el tanque de evaporación Tipo A y formulas empíricas se obtuvo un rendimiento de 23.683 y 25.159 kg/ha respectivamente y un coeficiente de variación del 4.96%. Los rendimientos fueron inferiores, estas diferencias fueron estadísticamente altamente significativas en relación al tratamiento uno. Ubicándose el tratamiento uno en el rango A mientras que el tratamiento dos y tres que tuvieron similares producciones se ubican en el rango B.

Lo anterior confirma lo manifestado por (Nissen et al. 1985) que la papa responde positivamente a riegos frecuentes y uniformemente distribuidos, período que coincide con los estados de definición del número de tubérculos por planta y la etapa de llenado de tubérculos. Los tratamientos incluyen frecuencias diarias, las cuales coinciden con las frecuencias promedios determinadas por (Nissen et al. 1985). Las diferencias observadas entre los tratamientos estuvieron más bien asociadas a la presencia de agua durante el período de llenado de tubérculos. La ausencia de riegos, ya sea semanales o quincenales durante el mes de febrero, afectó significativamente el rendimiento del cultivo.

Los resultados presentados, concuerdan con los obtenidos mediante frecuencias de riego semanales (espaciados cada 7 días) por (Varas et al. 1995). Además, coinciden con los reportados por (Opena y Porter 1999), quienes reportan mayores respuestas del rendimiento mediante riegos moderados, con incrementos cercanos al 36%.

No obstante, señalan que la respuesta al riego es diferencial entre diferentes temporadas agrícolas, lo cual se atribuye a variaciones en los patrones de disponibilidad de agua durante

los diferentes estados de crecimiento y que va asociado a la distribución de las precipitaciones y la planificación del riego.

Por otra parte, los resultados productivos presentados se asocian directamente con la distribución de los tubérculos por calibre (Guglielmetti 1989 y Haverkort 1986) han demostrado que el factor riego es muy importante en la producción de papa, particularmente cuando no hay limitantes nutricionales y de población de plantas. También se ha determinados que la producción de la papa es menos sensible a un déficit de agua en los estados vegetativos iniciales y durante la maduración. En consecuencia, un buen suministro de agua es necesario desde el inicio de la tuberización hasta la madurez. Además, un adecuado suministro de agua antes de la tuberización incrementa el número de tubérculos por planta y adicionalmente el tamaño del tubérculo (Miller y Maertín, 1985).

4.3.2 Relacion de agua utilizada y la produccion

- **Lámina de agua aplicada por tratamiento**

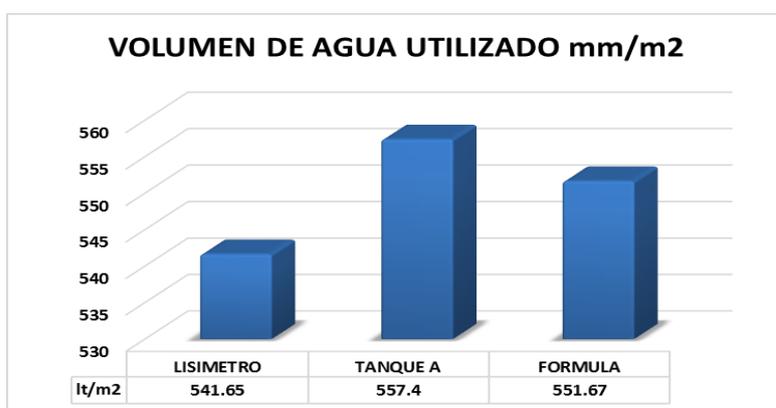


Figura N° 4.55: Lámina de agua por tratamiento utilizado por m²

Como se puede apreciar en la figura N° 4.55, los volúmenes aplicados en cada uno de los tratamientos son similares, dándose un ahorro de agua cuando se utiliza los lisímetros como medios de medida de los requerimientos hídricos en papa variedad Natividad, para el tratamiento de aplicación con el lisímetro se utilizó 541,65 milímetros en el que se incluye la precipitación en este tratamiento es en el que menor agua se ha utilizado en el ciclo del cultivo ya que el lisímetro es integrador y se cumple la relación agua suelo planta atmosfera y determina el requerimiento hídrico real del cultivo, mientras que para el tratamiento dos de aplicación con medida del tanque de evaporación tipo A se define que se utilizó 557,4

milímetros de agua incluida la precipitación en este tratamiento se utiliza mayor cantidad de agua, es lógico ya que se toma en consideración netamente los datos de evaporación diaria del tanque tipo A, mientras que para el tratamiento tres se logra definir que se utilizó 551,67 milímetros esta valor es menor al utilizado con el tratamiento tres ya que para este tratamiento se toman en consideración otros factores como temperaturas, radiación entre otros, esta información concuerda con lo manifestado con respecto del total de agua aplicada al el cultivo de papa, (Doorenbos y Pruit 1975 y Haverkort 1986) que indican que requerimientos son de 400 a 800 mm de agua por temporada en el cultivo de papa. Para el caso del estudio se definió que los requerimientos fueron de 541.65 mm con información del lisímetro, 557.4 mm con la información del tanque tipo A y 551.67 mm para el tratamiento con la formula respectivamente.

- **Volumen de agua utilizado por tratamiento m³/ha**

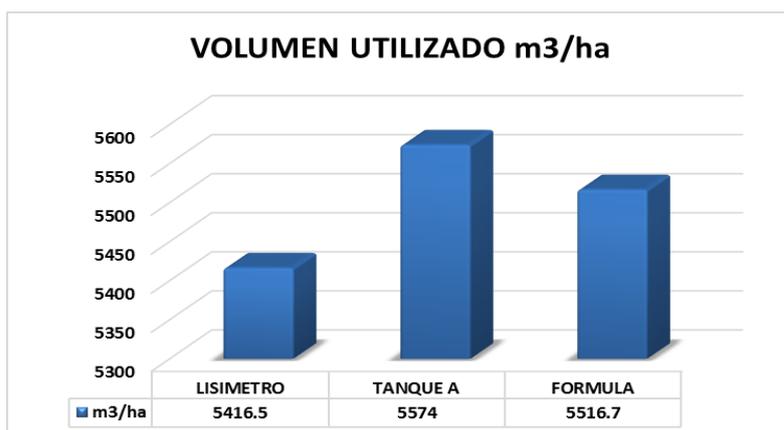


Figura N° 4.56: Volumen de agua utilizado por tratamiento en m³/ha

Al hacer este tipo de estudios es necesario diferenciar la aplicación de agua en relación a la distribución de calibres por planta. Por ejemplo, resultados obtenidos por (Sandoval 1993), indican que aplicaciones crecientes de cantidades de agua se asocian a incrementos de rendimiento de papa para consumo y no así para la producción de semilla.

Algunas variedades responden mejor al riego en estados tempranos de la formación de tubérculos, mientras que otras muestran una mejor respuesta hacia el final del período vegetativo. Variedades de pocos tubérculos pueden algunas veces ser menos sensibles a déficit de humedad que aquellas de muchos tubérculos (Doorenbos y Pruit, 1975).

Sanders (1997), señala que la humedad de suelo adecuada es de $-0,35$ kPa, siendo el período más crítico de déficit hídrico el que se presenta después de la floración. Para el caso de la investigación se manejó el riego por goteo manteniendo la humedad en el suelo en capacidad de campo medida con tensiómetros, los riegos administrados se realizaron diariamente

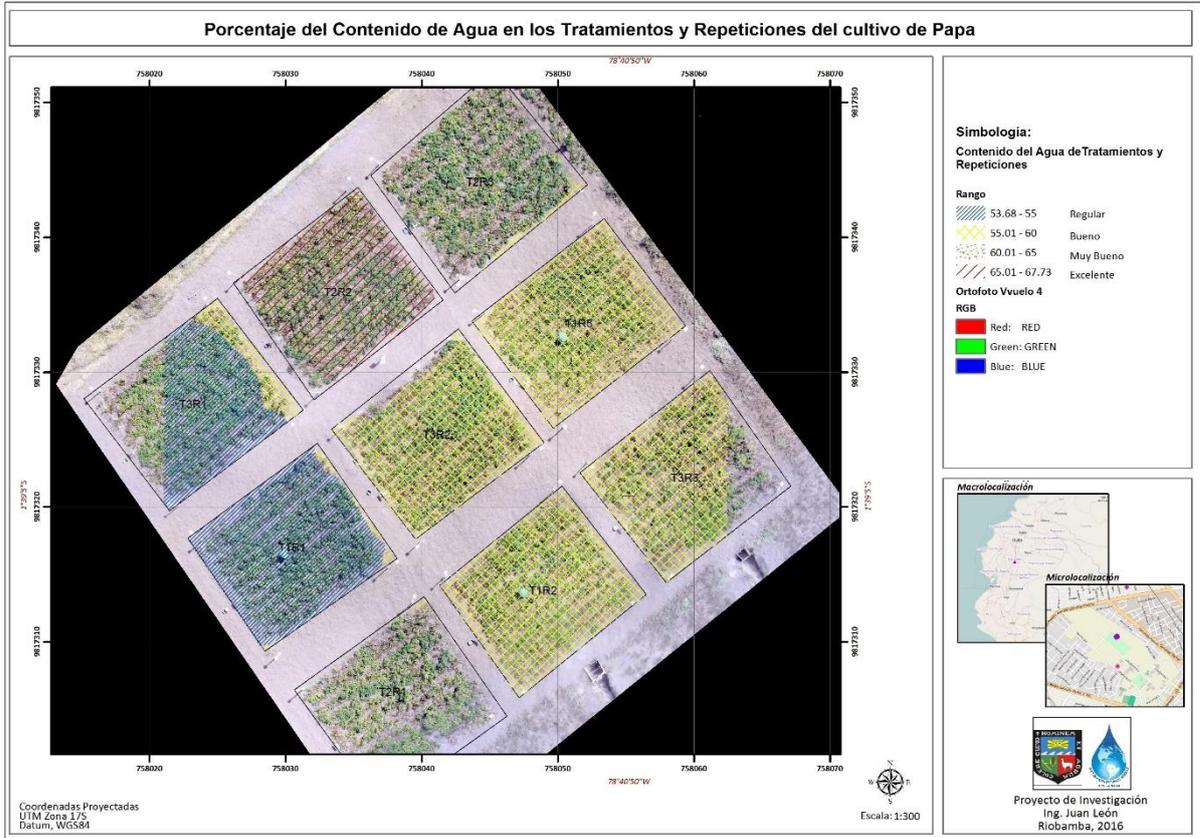


Figura N° 4.57: Mapa del contenido de agua en plantas de los tratamientos y repeticiones determinado mediante detección remota

- **Contenido de agua en planta**

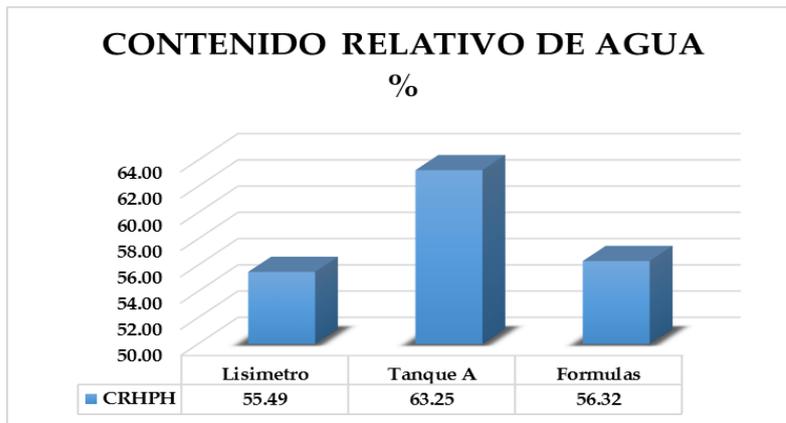


Figura N° 4.58: Contenido de agua en la planta

Cuadro N° 4.10: Contenido de agua en la planta

	%
Lisimetro	55.49 B
Tanque A	63.24 A
Formulas	56.32 A B

Fuente: Juan León Ruiz

En relación al efecto de los tratamientos sobre el peso seco a la cosecha, no se observan diferencias significativas entre tratamientos. Estos resultados coinciden con el observado en el contenido de materia seca de tubérculos (Desirée por Nissen et al. 1986), quienes encontraron que el riego no tuvo efectos significativos sobre este parámetro.

Solano 2003, indica que la acumulación de materia seca en un vegetal es un proceso que además de los factores internos de la planta, gobernado en este caso específico por el comportamiento de la fotosíntesis y la respiración, depende en gran medida también, de los externos del ambiente. En este sentido se debe tener en cuenta que un aumento de la temperatura provoca aumentos tanto de la fotosíntesis como de la respiración, pero después de alcanzarse cierto valor, la respiración puede continuar incrementando, mientras que la fotosíntesis disminuye, por lo que se puede presentar una disminución del peso seco.

La producción de materia seca total es el resultado de la eficiencia del follaje del cultivo en la intercepción y utilización de la radiación solar disponible durante el ciclo de crecimiento (Santos 2010) Sin embargo, esta eficiencia puede estar influenciada por la cantidad de

radiación solar, la habilidad de las hojas para fotosintetizar, el índice de área foliar, la arquitectura de la planta, la respiración, entre otros, lo que se resume en factores internos de crecimiento relacionados con el genotipo y factores externos relacionados con el ambiente y las prácticas de manejo utilizadas durante el ciclo. En la práctica, la concentración de materia seca que se alcance en los tubérculos (Subedi 2009) resulta un índice útil que define la calidad de los tubérculos y el uso que de ellos se haga para diferentes fines.

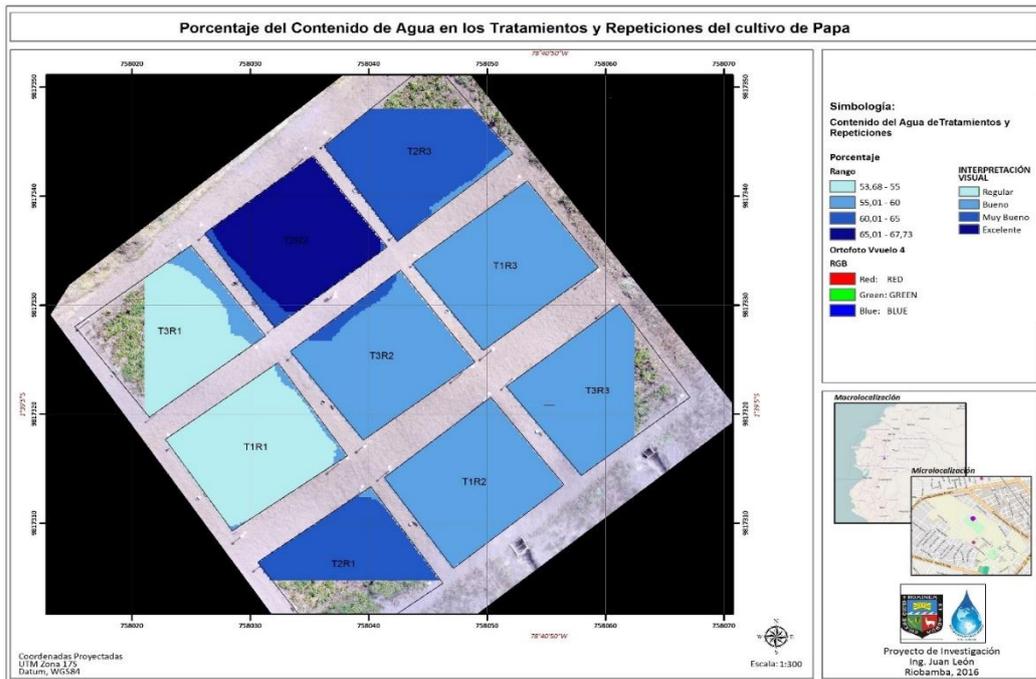


Figura N° 4.59: Mapa del contenido de agua en plantas de los tratamientos y repeticiones determinado mediante detección remota

Vázquez (1996) indica que la papa es relativamente sensible al déficit de agua, por lo que no debe agotarse más de un 30 a 35% del total del agua disponible, especialmente durante la formación y crecimiento de los tubérculos. La intensidad de consumo de agua se incrementa considerablemente hasta los 42 días posteriores a la siembra sufriendo ligeros cambios para comenzar a reducirse nuevamente a partir de los 84 días; paralelamente a las interacciones en el consumo de agua, varía la intensidad de la respiración. El efecto del déficit de humedad acelera el envejecimiento del cultivo y la reducción del número de tallos en las primeras estaciones vegetativas

Lo anterior concuerda con lo señalado por Jara 1999, quien afirma que una disminución del agua aprovechable en el suelo disminuye los rendimientos. Además de ello, estimula la respiración y acelera el envejecimiento del cultivo

- **Volumen de agua utilizado lt/kg de producción**

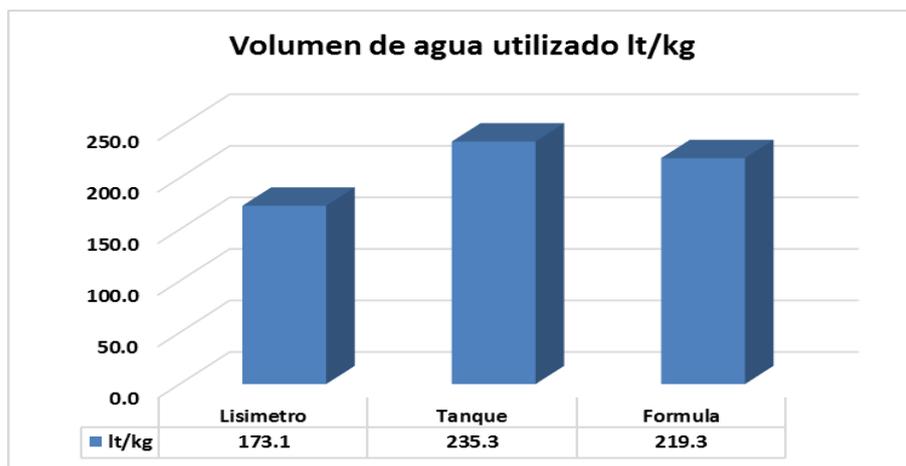


Figura N° 4.60: Volumen de agua utilizada lt/kg de producción

Cuadro N° 4.11: Agua utilizada lt/kg de rendimiento.

	RENDIMIENTO	VOLUMEN	
	Ton/ha	M3/Ha	lt/kg
Lisímetro	31.36	5426.5	173.1
Tanque	23.68	5574	235.3
Formula	25.16	5516.7	219.3

Fuente: Juan León Ruiz

En la figura N° 4.60 presenta el consumo de agua en litros por cada kilogramo de producción, para el tratamiento de la aplicación de agua con medida de los lisímetros se concluye que para producir un kg de papa utilizamos 173 litros, para producir el mismo kilogramo de papa para el tratamiento aplicado con medida del tanque de evaporación se utilizó 235 litros y para la aplicación tomando en consideración las formulas se utilizó 219 litros respectivamente.

Al respecto Martínez y Moreno, (1992) manifiestan que a partir de estudios de campo fue posible determinar al menos dos períodos críticos de necesidades hídricas en el cultivo de la

papa; inmediatamente después de la emergencia y durante la tuberización lo que concuerda con nuestro estudio.

Los mismos autores indican que los cultivos que no sufren estrés hídrico producen aproximadamente 6 t/ha de tubérculos por cada 25 mm de agua usados por la planta, así que si se aplican 100 mm la respuesta al riego debe ser de 20 t/ha asumiendo 15% de pérdidas durante la aplicación. Con un riego correcto la planta tiene una respuesta de rendimiento de aproximadamente 0,2 t/ha/mm de agua, lo cual lo hace muy rentable. Lo que concuerda con los valores de nuestro estudio

En toda la bibliografía consultada se reconoce la necesidad de un cuidadoso manejo del riego, debido a que el cultivo de la papa es sensible a deficiencias y exceso de agua durante el ciclo, afectando el rendimiento y calidad de los tubérculos.

4.4 GENERACIÓN AJUSTE Y CALIBRACIÓN DE LA EXPRESIÓN MATEMÁTICA

4.4.1 Ajustes y calibración índice de vegetación diferencial normalizado NDVI

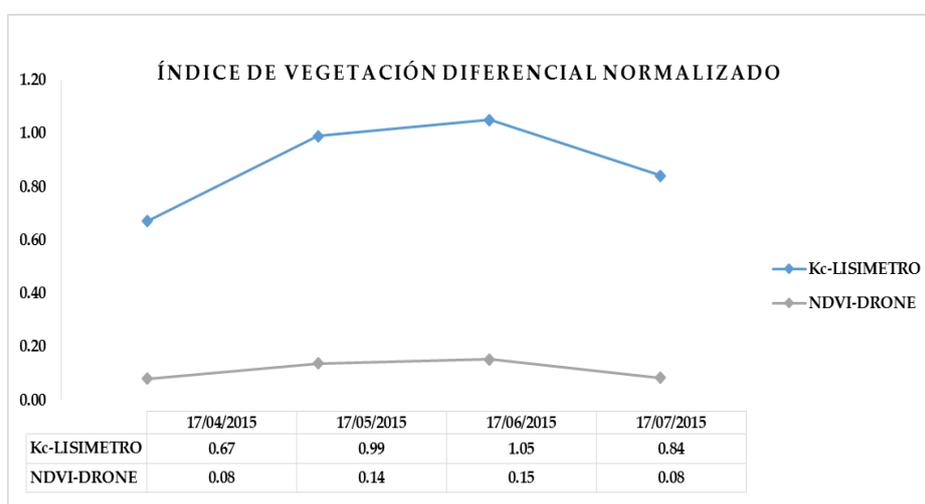


Figura N° 4.61: NDVI Normalizado ajustado con lisímetro.

Al realizar un análisis de NDVI comparado con el Kc del lisímetro (figura N° 4.61) podemos notar que las tendencias de las curvas son similares, en tal razón se logró definir un factor de ajuste para poder determinar el Kc con fotografías infrarrojas y térmicas del NDVI si se multiplican, el valor del NDVI arrojado por la fotografía por 8.38 para la etapa inicial, 7.20

para la etapa de desarrollo, 6.86 para la etapa intermedia y 10.12 para la etapa final o senescencia, con la multiplicación de este factor obtendremos como resultado el Kc del cultivo en cada etapa medido con lisímetros.

4.4.2 Ajustes y calibración índice de área foliar IAF

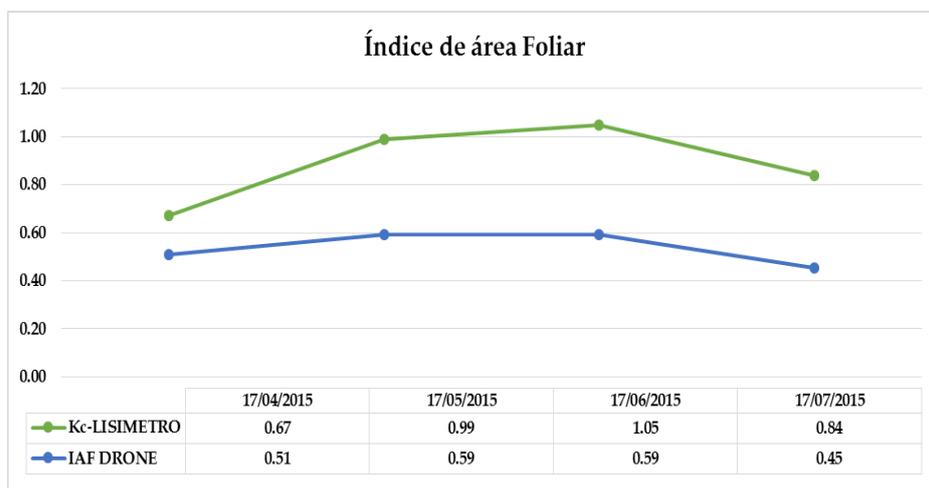


Figura N° 4.62: IAF ajustado con lisímetro

De acuerdo a los valores obtenidos en el cálculo de IAF, se observa que de acuerdo al promedio calculado de las parcelas en el vuelo inicial alcanza una media de 0.51, que significa que la planta está en etapa inicial después de la germinación al tener las primeras hojas verdaderas, en este periodo la planta solo desarrolla hojas y tallos acumulando la energía suficiente para la floración. En el vuelo dos y tres alcanzan una media hasta de 0.59, lo que significa que se encuentra en floración para la producción de tubérculos en excelentes condiciones. En el cuarto vuelo una media de 0.45 esto quiere decir que las hojas y tallos están en estado de madurez y se tornan de color amarillento y finalizando por secarse esta en la etapa final o senescencia.

Al realizar un análisis de IAF comparado con el Kc del lisímetro (figura N°4.62) podemos notar que las tendencias de las curvas son similares, en tal razón se logró definir un factor de ajuste para poder determinar el Kc con fotografías infrarrojas y térmicas del IAF si se multiplican, el valor del IAF arrojado por la fotografía por 1.32 para la etapa inicial, 1.67 para la etapa de desarrollo, 1.77 para la etapa intermedia y 1.86 para la etapa final o senescencia, con la multiplicación de este factor obtendremos como resultado el Kc del cultivo en cada etapa medido con lisímetros.

El IAF corresponde al cociente entre el área total de las hojas verdes (cara superior) y el área donde crecen; es de una medida aproximada de la superficie foliar verde por unidad de radiación disponible. El comportamiento del cultivo en sus cuatro etapas de acuerdo al IAF, ratifica que en el vuelo dos y tres alcanza los mejores valores de área foliar que corresponde a la etapa de floración y tuberización.

4.4.3 Ajustes y calibración Fracción de radiación Fotosintéticamente Activa fPAR.

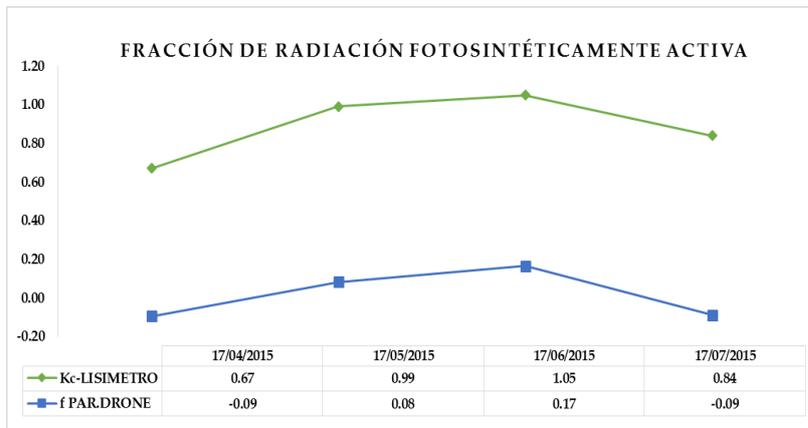


Figura N° 4.63: fPAR ajustada con lisímetro

De acuerdo a los valores obtenidos en el cálculo de fPAR, se observa que de acuerdo al promedio calculado de las parcelas en el vuelo inicial alcanza una media de -0.09, que significa que la planta está en etapa inicial después de la germinación al tener las primeras hojas verdaderas, en este periodo la planta solo desarrolla hojas y tallos acumulando la energía suficiente para la floración. En el vuelo dos alcanzan una media hasta de 0.08, lo que significa que se encuentra en floración para la producción de tubérculos en excelentes condiciones. En el vuelo tres alcanza su máxima expresión con una media de 0.17 y en el cuarto vuelo una media es idéntica la media inicial de -0.09 esto quiere decir que las hojas y tallos están en estado de madurez y se tornan de color amarillento y finalizando por secarse esta en la etapa final o senescencia.

Al realizar un análisis de fPAR comparado con el Kc del lisímetro (figura N°4.63) podemos notar que las tendencias de las curvas son similares, en tal razón se logró definir un factor de ajuste para poder determinar el Kc con fotografías infrarrojas y térmicas del fPAR si se multiplican, el valor del fPAR arrojado por la fotografía por -7.12 para la etapa inicial, 11.98

para la etapa de desarrollo, 6.36 para la etapa intermedia y -9.42 para la etapa final o senescencia, con la multiplicación de este factor obtendremos como resultado el Kc del cultivo en cada etapa medido con lisímetros.

4.4.4 Ajustes y calibración coeficiente del cultivo Kc

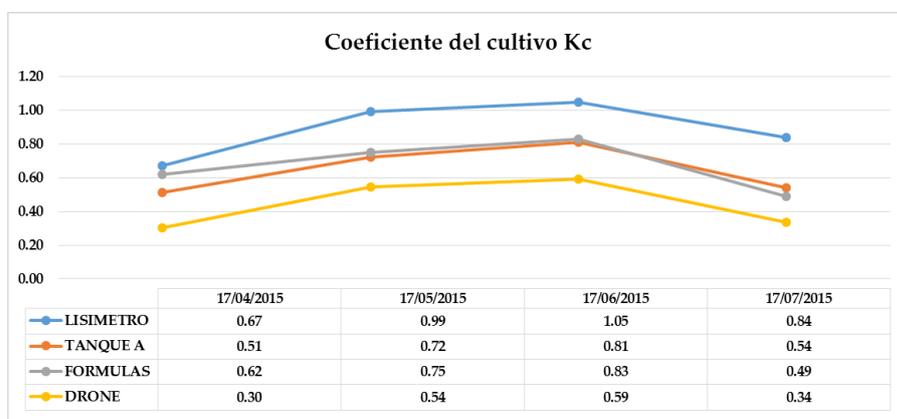


Figura N° 4.64: Kc promedio tratamientos ajustado con lisímetro.

Como podemos observar en la figura 4.65. 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, formulas 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 cociente que relacione directamente el lisímetro con las fotografías del drone. El factor de ajuste hallado es para a fase inicial se debe multiplicar por 2.22, para la fase de desarrollo por el factor 1.82, para la fase intermedia 1.78 y para la fase final o de senescencia 2.49

4.4.5 Ecuaciones obtenidas del modelo.

Como sabemos que la medición de la ETc del lisímetro es exacta, tomamos como referencia los NDVI del lisímetro para ser llevados los valores de los otros dos métodos estudiados a valores del Kc del lisímetro, los valores reales del lisímetro son 0.67 para la fase inicial, 0.99 para la fase de desarrollo, 1.05 para la fase intermedia y 0.84 para la fase final o senescencia

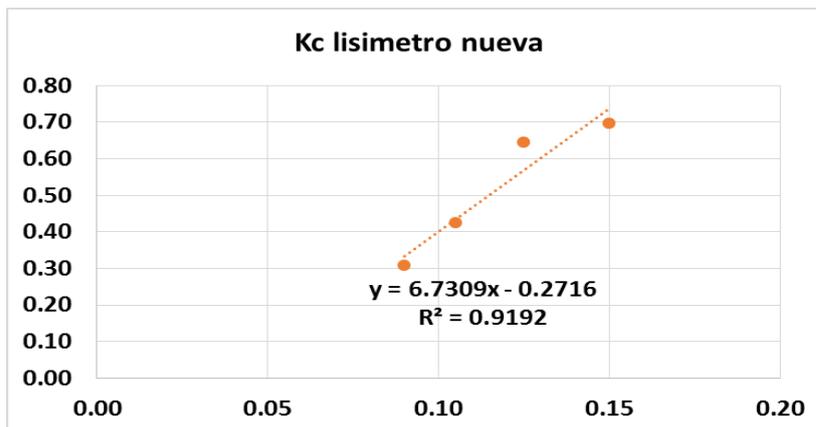
El modelo para determinar el Kc calculado con agua repuesta con medida con el lisímetro de drenaje, del tanque de evaporación tipo A y formula empirica se resume en:

Kc Lisímetro = f(NDVI lisímetro)

Kc Tanque = f(NDVI tanque)

Kc formula = f(NDVI formula)

Para la generación de la ecuación 1 se correlaciono en una regresión simple a los valores promedio del Kc de lisímetro (variable dependiente) y los valores del NDVI del Tanque tipo A, se obtuvo como coeficiente 6.2346 de NDVI (variable independiente) y un intercepto de 0.1549 un coeficiente de correlación de Karl Pearson de $r=0.96$ que es una correlación positiva alta así como un coeficiente de determinación $r^2=0.91$ lo cual es aceptable para el presente estudio.



Para la generación de la ecuación 2 se correlaciono en una regresión simple a los valores promedio del Kc de lisímetro (variable dependiente) y los valores del NDVI del Tanque tipo A, se obtuvo como coeficiente 2.5062 de NDVI (variable independiente) y un intercepto de 0.5554 un coeficiente de correlación de Karl Pearson de $r=0.86$ que es una correlación positiva alta así como un coeficiente de determinación $r^2=0.74$ lo cual es aceptable para el presente estudio.

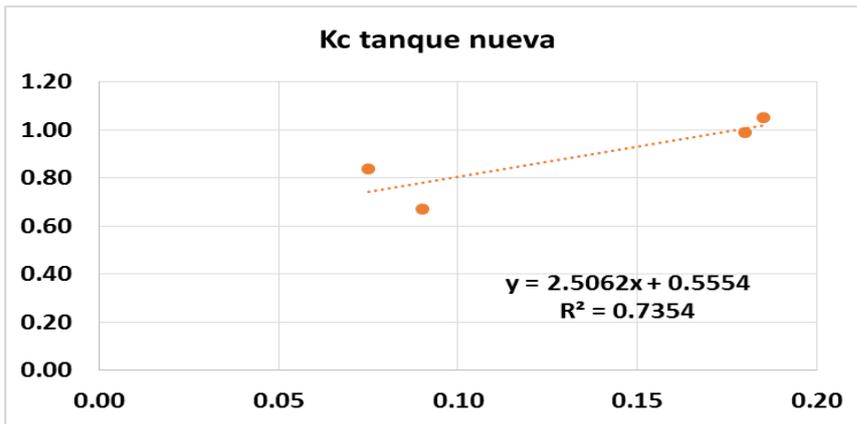


Figura N° 4.65: Correlación Kc lisímetro y NDVI Tanque

Para la generación de la ecuación 3 se correlaciono en una regresión simple a los valores promedio del Kc de lisímetro (variable dependiente) y los valores del NDVI de la formula Penman Monteith, se obtuvo como coeficiente 5.2595 de NDVI (variable independiente) y un intercepto de 0.4128 un coeficiente de correlación de Karl Pearson de $r=0.95$ que es una correlación positiva muy alta así como un coeficiente de determinación $r^2=0.90$ cual es aceptable para el presente estudio.

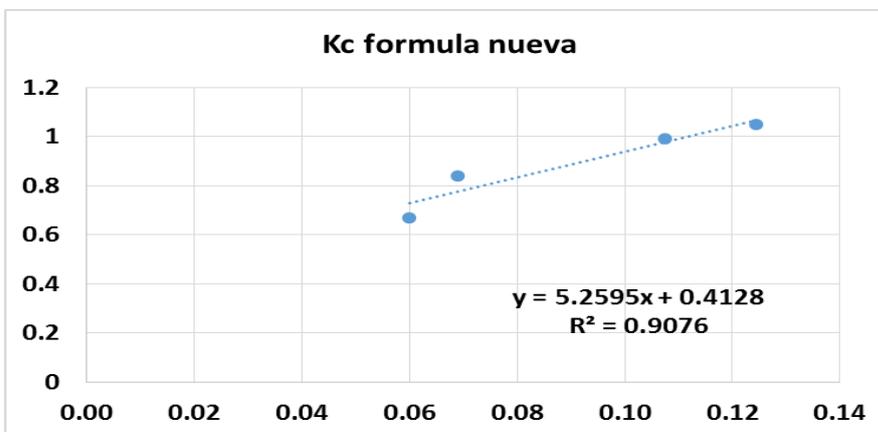


Figura N° 4.66: Correlación Kc lisímetro y NDVI Formula

Cuadro N° 4.12: formulas determinadas por el modelo

N. de ecuación	Formula base	Ecuación	R	R2
1	Lisímetro	Kc= 6.2346*NDVI + 0.1549	0.96	0.91
2	Tanque tipo A	Kc= 2.5062*NDVI+0,5554	0.86	0.74
3	Penman Monteith	Kc= 5.2595*NDVI+0,4128	0.95	0.91

Fuente: Juan León Ruiz

Cuadro N° 4.13: Modelos encontrados en la literatura comparados con las propuestas en el estudio.

EQUACIONES	Coeficiente	Intersepto	NVDI(vuelo)			Kc de las formulas		
			Lis	Tan	Form	Lis	Tan	For
1 $Kc=1.08*NDVI+0.22$ Jochum 2002	1.08	0.22	0.09	0.09	0.06	0.32	0.32	0.28
			0.13	0.18	0.11	0.36	0.41	0.34
			0.15	0.19	0.12	0.38	0.42	0.35
			0.11	0.08	0.07	0.33	0.30	0.29
2 $Kcb=1.36*NDVI-0.06$ Bauch and Neale. 1987	1.36	-0.06	0.09	0.09	0.06	0.06	0.06	0.02
			0.13	0.18	0.11	0.11	0.18	0.09
			0.15	0.19	0.12	0.14	0.19	0.11
			0.11	0.08	0.07	0.08	0.04	0.03
3 $Kcb=1.44*NDVI-0.10$ $r^2=0.96$ (Campos et al)	1.44	-0.1	0.09	0.09	0.06	0.03	0.03	-0.01
			0.13	0.18	0.11	0.08	0.16	0.05
			0.15	0.19	0.12	0.12	0.17	0.08
			0.11	0.08	0.07	0.05	0.01	0.00
4 Kcb NDVI, alfalfa= $1.181*NDVI-0.026$ Neale 1987	1.181	-0.026	0.09	0.09	0.06	0.08	0.08	0.04
			0.13	0.18	0.11	0.12	0.19	0.10
			0.15	0.19	0.12	0.15	0.19	0.12
			0.11	0.08	0.07	0.10	0.06	0.06
5 Kcb NDVI, FAO= $1.37*NDVI-0.017$ Gonzales-Piqueras 2003	1.37	-0.017	0.09	0.09	0.06	0.11	0.11	0.07
			0.13	0.18	0.11	0.15	0.23	0.13
			0.15	0.19	0.12	0.19	0.24	0.15
			0.11	0.08	0.07	0.13	0.09	0.08
6 Kcb NDVI, FAO= $1.36*NDVI-0.031$ ASCE 1987	1.36	-0.031	0.09	0.09	0.06	0.09	0.09	0.05
			0.13	0.18	0.11	0.14	0.21	0.12
			0.15	0.19	0.12	0.17	0.22	0.14
			0.11	0.08	0.07	0.11	0.07	0.06
7 $Kc= 6.2346*NDVI + 0.1549$ Ecuacion para Lisimetro	6.7309	0.2716	0.09	0.09	0.06	0.88	0.78	0.73
$Kc= 2,5062xNDVI + 0,5554$ Ecuacion para Tanque	2.5062	0.5554	0.13	0.18	0.11	1.11	1.01	0.98
$Kc= 5,2595xNDVI + 0,4128$ Ecuacion para Formula	5.2595	0.4128	0.15	0.19	0.12	1.28	1.02	1.07
			0.11	0.08	0.07	0.98	0.74	0.78

Fuente: Juan León Ruiz

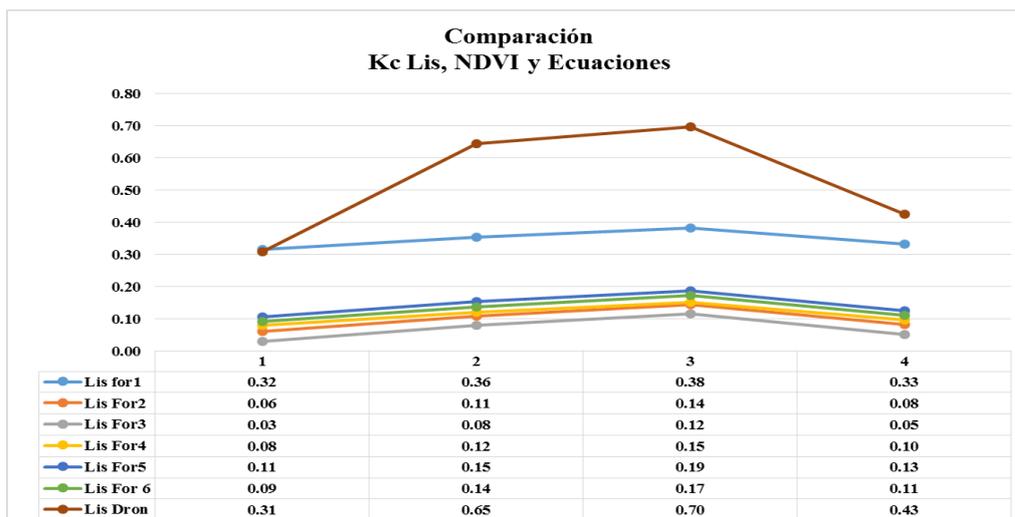


Figura N° 4.67: Curvas características de modelos encontrados en literatura comparadas con el modelo allado

Como podemos observar en la figura N° 4.67 y al hacer un análisis de los modelos presentados por otros autores en bibliografía consultada podemos indicar que el modelo propuesto en esta investigación esta con valores ligeramente más altos en las cuatro fases pero se debe identificar que la tendencia de las curvas son similares entre todas las curvas incluida la del modelo propuesto, esto se debe quizá a dos factores, el uno a que los modelos propuestos por otros autores está realizado para cultivos como maíz, trigo, cebada entre otros y no se tiene un estudio para un cultivo de tubérculos como es la papa, la segunda posibilidad se puede deber a que los valores de NDVI utilizados para el modelos propuesto fueron tomados el promedio haciendo una relación de las lecturas máximas y mínimas.

V. CONCLUSIONES.

Con la utilización de los drones y lisímetros de drenaje, se han generado expresiones matemáticas: que se utilizará cuando las láminas de riego son aplicadas teniendo como base, la data del lisímetro de drenaje, $K_c = 6.2346 * NDVI + 0.1549$ con un coeficiente de relación de 0.96; cuando las láminas de riego son aplicadas como base, la data del tanque de evaporación clase "A", $K_c = 2.5062 * NDVI + 0,5554$, con un coeficiente de relacion 0.86 y cuando las láminas de riego son aplicadas como base, la data de la formula empírica, $K_c = 5.2595 * NDVI + 0,4128$, con un coeficiente de relación de 0.95, estas ecuaciones permiten estimar los requerimientos hídricos del cultivo de la papa en la Sierra Central Ecuatoriana.

Para la zona central del Ecuador, el resultado de la relación del coeficiente del cultivo para la papa, en comparación con los métodos del lisímetro de drenaje, tanque de evaporación, clase A, formulas empíricas e imágenes obtenidas con el drone, podemos observar que se nota claramente la distribución de los K_c en las etapas, de cada uno de los tratamientos y tienen tendencias similares, por lo cual se requiere hacer ajuste con un cociente que relacione la información del lisímetro con lo obtenido del drone. El factor de ajuste hallado para la fase inicial se debe multiplicar por 2.22, para la fase de desarrollo por el factor 1.82, para la fase intermedia por 1.78 y para la fase final o de senescencia por 2.49.

De acuerdo al suministro hídrico al cultivo de papa mediante la aplicación de la lámina de riego, según la información del lisímetro de drenaje, tanque de evaporación clase A y formula empírica, se concluye, que para la producción de un kilogramo de tubérculo de papa en el caso de la aplicación de agua con lisímetro se utilizó 173,1 litros, con la aplicación de referencia al tanque de evaporación, se utilizó 235,3 litros y para la fórmula de Penman 219,3 litros. Se ha demostrado que existe una correlación alta entre los tratamientos, y se demuestra el hecho, que el aplicar más agua de riego no aumenta los rendimientos

De los resultados de la investigación y los ajustes realizados referentes a los coeficientes del cultivo de la papa, se ha llegado a comprobar, que la utilización de los drones es una tecnología de gran importancia, para estimar el K_c y Etc, en función a las características del IAF, NDVI que son captados por las imágenes a través del Drone, que permite determinar los requerimientos hídricos del cultivo, hacer los calendarios de riego, eficiencia en el uso y manejo del agua de riego.

La mayor altura de planta, 105.85 cm, diámetro del tallo con 21,09 mm, número de tallos 7, se ha obtenido con el riego en referencia a los lisímetros. La máxima profundidad radicular se ha obtenido con el riego en referencia al tanque clase A con 46,21 cm.

El mayor rendimiento, 31.36 ton /ha se ha obtenido con el riego en referencia a los lisímetros, respecto a los otros tratamientos tanque clase A y formula empírica.

Los valores del coeficiente de cultivo representados en el mapa, son aquellos que corresponden a condiciones adecuadas de crecimiento de la cubierta vegetal, circunstancia que asumimos que 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.

Con el uso de esta técnica de modelación propuesta, podemos optimizar el uso de agua de riego para el cultivo de papa, este nos permite estimar de manera muy precisa los requerimientos hídricos del cultivo en cada una de sus fases de desarrollo, y por ende nos genera una disminución en los costos de producción además de reducir el impacto ambiental negativo por la aplicación excesiva del agua de riego.

VI. RECOMENDACIONES

En base a los resultados de la presente investigación, se recomienda la utilización del dron para determinar los requerimientos hídricos del cultivo de papa, con una calibración a través del lisímetro de drenaje, por tener una buena aproximación de los requerimientos hídricos.

Las ecuaciones obtenidas en el estudio pueden ser utilizadas en condiciones similares a donde se realizó el experimento, si se requiere utilizar en otras zonas es necesario realizar la calibración respectiva.

La utilización de los drones es importante para determinar los requerimientos hídricos del cultivo, por lo que se recomienda utilizar con fines de los calendarios de riego, definir la eficiencia en el uso y manejo del agua de riego, asegurando la producción en cantidad y calidad.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABOUKHALED, A. 1986. Los lisímetros. Estudio FAO de riego y drenaje. Roma, Italia
- ADEKALU, K; FAPOHUNDA, H. 2006. A Numerical Model to predict Crop Yield from Soil Water Deficit. *Biosystems Engineering* 94(3): 359–372.
- AGUILAR, MA. G. /et al./. 2006. Análisis de crecimiento y de relaciones fuente-demanda en dos variedades de papa (*Solanum tuberosum* L.). *Rev. Fitotec. Mex*, vol. 29, no. 2, p. 145-156.
- ALEXANDRIS, S; KERKIDES, P; LIAKATAS, A. 2006. Daily reference evapotranspiration estimates by the Copais"" approach. *Agricultural Water Management* 82: 371–386.
- ALLEN, E.J., AND R.K. SCOTT. 1980. An analysis of growth of the potato crop. *J. Agri. Sci. (Cambridge)* 94:583-606.
- ALLEN, R; PEREIRA, L; RAES, D; SMITH, M. 2006. Evapotranspiración del cultivo. Estudio Riego y Drenaje, FAO-56. Organización de las Naciones Unidas Para la Agricultura y Alimentación. Roma.
- ALONSO, J. L. /et al./. 2002. Ecofisiología del rendimiento de la planta de papa. *Boletín de la Papa*, vol. 4, no. 11.
- ANTON, A; MONTERO, J; MUÑOZ, P, 1995 Necesidades de agua del cultivo de tomate en invernadero-comparación con el cultivo al aire libre. Institut de Recerca i Tecnologia Agroalimentaria – IRTA, Centre de Cabrils. Barcelona.
- ASRAR, G., MYNENI, R.B. AND CHOUDHURY, B.J., 1992. Spatial heterogeneity in vegetation canopies and remote sensing of absorbed photosynthetically active radiation: A modeling study. *Remote Sensing of Environment*, 41(2-3): 85-103.
- BAILLE, 1996. Principle and methods for predicting crop water requirement in greenhouse environments. *Cahiers options méditerranéennes*, vol 3.
- BANDI, M. 2003. Instrumentos para el monitoreo del impacto ambiental sobre la producción agrícola. Modelos para cultivos. Disponible en: <<http://www.ciomta.com.ar/downloads/modelocultivo.pdf>>.

- BASTIAANSEN, W. G. M., MOLDEN, D. J., & MAKIN, I. W. 2000. Remote sensing for irrigated agriculture: examples from research and possible applications. *Agricultural Water Management*. 46:137-155.
- BASTIAANSEN, W.G. M. 1995. Regionalization of Surface flux densities and moisture indicators in composite terrain. Doctoral thesis, Wageningen Agricultural University, Wageningen, Países Bajos, 771 pp.
- BEDWELL, R. 1990. *Fisiología Vegetal*. Editorial Calipso, México D.F. 784 p.
- BELTRI, E. 2008. Medida del balance hídrico y estimación del coeficiente Kc en fincas de la Vega Baja de Segura para la mejora de la programación de riegos utilizando. pp 78 – 84.
- BEN-DOR, E. 2010. Characterization of soil properties using reflectance spectroscopy. Ch. 22. In P. S. Thenkabail, J. G. Lyon, & A. Huete (Eds.), *Hyperspectral remote sensing of vegetation* (pp. 705).
- BENLI, B; KODAL, S; ILBEYI, A; USTUN, H. 2005. Determination of evapotranspiration and basal crop coefficient of alfalfa with a weighing lysimeter. *Agricultural Water Management* 81: 358–370.
- BONACHELA, S; ORGAZ, F; VILLALOBOS, F; FERERES, E. 1999. Measurement and simulation of evaporation from soil in olive orchards. *Irrig Sci* 18: 205–211.
- BONHOMME, R. Y RUGET, F.1991. Modélisation du fonctionnement d'une culture de maïs: CAS de CORNGRO et CERES-Maize. En: D. Picard (ed) *Physiologie et production du maïs*. Paris: INRA, p. 385-392.
- BOULARD, T; WANG, S. 2000. Greenhouse crop transpiration simulation from external climate conditions. *Agricultural and Forest Meteorology* 100: 25–34.
- BOWEN, W. Y JARAMILLO, R. 2001. Modelos de dinámica de nutrientes en el suelo y en la planta. En: Congreso Sociedad Ecuatoriana de la Ciencia del Suelo [CD-ROM archivo]. Sociedad Ecuatoriana de la ciencia del Suelo (7:2000 oct. 19-20 octubre: Quito),.
- BROWN, P. 2000. Basics of evaporation and evapotranspiration. Turf irrigation management series: I. The University of Arizona – College of Agriculture. Arizona.
- BURSTALL, L., AND P.M. HARRIS. 1983. The estimation of percentage light interception from leaf area index and percentage ground cover in potatoes. *J. Agri. Sci. (Cambridge)* 100:241-244.
- 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.

- CASANOVA, M; MESSING, I; JOEL, A; CAÑETE, A. 2009. Métodos de estimación de la evapotranspiración de un cultivo de lechuga en condiciones de invernadero, zona central de Chile. *Chilean J. Agric. Res.* [on line]. 2009, vol.69, n.1, pp. 60-70.
- CHANG, M; NURUDDIN, A; CROWLEY, C. 1997. Evapotranspiration of herbaceous mimosa (*Mimosa strigillosa*), a new drought-resistant species in the southeastern United States. *Resources, Conservation and Recycling* 21: 175–184.
- CHAO, H., Y. CHEN. 2012. Remote sensing and actuation using unmanned vehicles.
- COLMAN, E.A. 1946. A laboratory study of lysimeter drainage under controlled soil moisture tension. *Soil Sci.* 62:365-382.
- CORPORACIÓN COLOMBIANA DE INVESTIGACIÓN AGROPECUARIA. SUBDIRECCIÓN DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN. 2003. Oficina asesora de educación y extensión programa nacional de biometría. En: Taller de Aplicación de modelos de simulación para la evaluación de la producción y las prácticas de manejo en sistemas agrícolas bajo DSSAT versión 4, julio 7-julio 11. Disponible en: <http://www.fedepalma.org/documento/taller_dssat.doc>. 2003.
- CORWIN, D. L., & LESCH, S. M. 2003. Application of soil electrical conductivity to precision agriculture: theory, principles, and guidelines. *Agronomy Journal*, 95, 455-471.
- DELMHORST, J. 1999. Manual de funcionamiento de los bloques de modelo KS-D1. www.delmhorst.com
- DOORENBOS, J.; PRUIT, W. 1975. Crop Water Requirements Rome, Food and Agriculture Organization of the United Nations. Irrigation and Drainage Paper. N° 24, 179 p
- DROOGERS, P. 2000. Estimating actual evapotranspiration using a detailed agro-hydrological model. *Journal of Hydrology* 229: 50–58.
- EKANAYAKE, I. 1994. CIP Research 30, studying drought stress and irrigation requirements of potatoes. Lima - Perú.
- ENCISO, E. 2005. Sensores de Humedad del Riego para eficientizar el riego. Cooperativa de Texas. pp 2 – 6.
- ESTACIÓN EXPERIMENTAL DE AALSMEER - TRADUCCION HORTITECNIA LTDA. 2003. Cultivo moderno de la rosa bajo invernadero. Ediciones Hortitecnia Ltda. Bogotá - Colombia, pp. 103- 140.
- FAO. 2008. El cambio climático y la producción de alimentos.
- FERNÁNDEZ, M; BONACHELA, S; ORGAZ, F; THOMPSON, R; LÓPEZ, J; GRANADOS M; GALLARDO, M. FERERES, E. 2010. Measurement and estimation of plastic

greenhouse reference evapotranspiration in a Mediterranean climate. *Irrig Sci.* DOI 10.1007/s00271-010-0210-z.

FERNÁNDEZ-PACHECO, D. G., D. ESCARABAJAL-HENAREJOS, A. RUIZ-CANALES, J. CONESA, J. M. MOLINA-MARTÍNEZ. 2014. A digital image-processing-based method for determining the crop coefficient of lettuce crops in the southeast of Spain. *Biosystems engineering.* 117:23-34.

FUCHS, M; DAYAN, D; PRESNOV, E. 2006. Evaporative cooling of a ventilated greenhouse rose crop. *Agricultural and Forest Meteorology* 138: 203–215.

FUENTE, A. 2006. Programación de riego con tensiómetros. Disponible en:

GÁLVEZ, G. 2008. Modelación del crecimiento de las plantas. Modelación de cultivos agrícolas. En: Seminario de modelación de cultivos.

GARCÍA, M. PUPPO, L. HAYASHI, R. & MORALES, P. (2015). Metodología para determinar los parámetros hídricos de un suelo a campo. Recuperado de <http://www.fagro.edu.uy/campo.pdf>.

GARCÍA, M; RAES, D; JACOBSEN, S. 2003. Evapotranspiration analysis and irrigation requirements of quinoa (*Chenopodium quinoa*) in the Bolivian highlands. *Agricultural Water Management* 60: 119–134.

GARCIA-HUIDOBRO, J. 1980. El riego en el cultivo de la papa. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Estación Experimental Carillanca. Boletín Técnico N° 32. 24 p

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.

GONZÁLEZ-PIQUERAS, J., 2006. Evapotranspiración de la cubierta vegetal mediante la determinación del coeficiente de cultivo por teledetección, Universitat de Valencia, Valencia, España, 337 pp.

GORDON, R., D.M. BROWN, AND M.A. DIXON. 1997. Estimating potato leaf area index for specific cultivars. *Potato Res.* 40:251-266.

GOUDRIAAN, J.; VAN LAAR, H. 1994. Modelling potential growth processes, Textbook with exercises. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, Holanda 238 p

GUEVARA, E. 2007. La simulación del desarrollo, crecimiento y rendimiento en maíz. Disponible en: <[http://www.fertilizando.com / articulos / simulacion desarrollo crecimiento y rendimiento en maiz.asp](http://www.fertilizando.com/articulos/simulacion_desarrollo_crecimiento_y_rendimiento_en_maiz.asp)>.

GUGLIEMETTI, H. 1989. Técnicas en cultivo de la papa. *Chile Agrícola.* Agosto p. 299-302)

- HAINES, B.L., WAIDE, J.B. AND TODD, FR.L. 1982. Soil solution nutrient concentrations sampled with tension and non-tension lysimeters: report of discrepancies. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46:658-661.
- HANNA, A.Y., P.W. HARLAN, AND D.T. LEWIS, 1983. Effect of slope on wáter balance under central-pivot irrigation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 47:760-764.
- HANSON, A. y HITZE, W. 1982. Metabolic responses of mesophytes to plant water deficits. *Annual Review of Plant Physiology* 10 – 22 pp.
- HARGREAVES, G. y MERKLEY, G. 2000. Fundamentos del riego. Water resources publications, Centro internacional de riego. Utha EUA.
- HAVERKORT, A. 1986. Manejo de agua en la producción de papa. Centro Internacional de la Papa. CIP. Editorial Agropecuaria Hemisferio Sur. S.R.L. Boletín de Información Técnica. N° 15. 24 p.
- HIDALGO, D. 2008. Diseño, evaluación e instalación de un sistema de riego. Lima – Perú. pp 15 – 21.
- HOLBEN, B. N. 1986. Characteristics of maximum-value composite images of temporal AVHRR data. *Int. J. Remote Sens.* 7: 1417-1434.
- HOLDRIDGE, L. R. 1967. «Life Zone Ecology». Tropical Science Center. San José, Costa Rica. (Traducción del inglés por Humberto Jiménez Saa: «Ecología Basada en Zonas de Vida», 1a. ed. San José, Costa Rica: IICA, 1982).
- HOLMANN, F. 2002. El uso de modelos de simulación como herramienta para la toma de decisiones en la promoción de nuevas alternativas forrajeras: El caso de Costa Rica y Perú. En: Reunión Latinoamericana de Producción Animal (ALPA), (16:2002 mar. 28-31:Montevideo).
- HOWELL, T.A., R.L. McCormick and C.J. Phene. 1985. Design and installation of large weighing lysimeters. *Trans ASAE* 28:106-112.
- HUETE, A. (1988) "A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI)." *Remote Sensing of Environment* 25: 295-309
- HUETE, A., et al. (2002):"Overview of the Radiometric and Biophysical Performance of the MODIS Vegetation Indices." *Remote Sensing of Environment* 83 195–213.
- HURTADO, L. 2002. Fundamentos del riego: documento electrónico. Disponible en: http://agricola-unl.com/pdf/Fundamentos_Riego.pdf 58.
- INIA. 2013. La importancia del agua en el cultivo de papa.
- IRMAK, S; HAMAN, D. 2003. Evapotranspiration: Potential or Reference. University of Florida. <http://edis.ifas.ufl.edu/pdffiles/AE/AE25600.pdf>.

- JEFFERIES, R.A., AND T.D. HEILBRONN. 1991. Water stress as a constraint on growth in the potato crop. 1 Model development. *Agric. For. Meteorol.* 53:185-196
- JEMISON, J.-M., and R.H. FOX. 1994. Nitrate leaching from nitrogen fertilizer and manured corn with zero-tension pan lysimeters. *J. Environ. Qual.* 23:337-343.
- JENSEN, M; BURMAN, R; ALLEN, R. 1990. Evapotranspiration and irrigation water requirements. *Manuals and reports on engineering practice No. 70.* American Society of Civil Engineers – ASCE. New York.
- JOCHUM AM, CALERA A, CUESTA A, 2003. Space-assisted irrigation management: towards user-friendly products. *Proceedings of ICIDCIID International Workshop: Use of remote sensing of crop evapotranspiration for large regions: September 17, Montpellier, FRANCE.*
- JOHNSON. L.F., S. HERWITZ, S E. DUNAGANA, B. LOBITZA, B. D. SULLIVANA, R. SLYEA. 2003. Collection of Ultra High Spatial and Spectral Resolution Image Data over California Vineyards with a Small UAV. *Proceedings of the International Symposium on Remote Sensing of Environment.* November 2003.
- JONES, J. W. /et al./. 2003. Modelling cropping systems: science, software and applications. *European Journal of Agronomy*, V. 18, N°. 3-4, p. 235-265.
- JONES, M.B., J.E. Street and W.A. Williams. 1974. Leaching and uptake of nitrogen applied to annual grass and clover-grass mixtures in lysimeters. *Agron. J.* 66:256-258.
- KARAM, F; LAHOUD, R; MASAAD, R; KABALAN, R; CHALITA, C; ROUPHAEL, Y. 2007. Evapotranspiration, seed yield and water use efficiency of drip irrigated sunflower under full and deficit irrigation conditions. *Agricultural water management* 90: 213- 223.
- KARAM, F; BREIDY, J; STEPHAN, C; ROUPHAEL, J. 2003. Evapotranspiration, yield and water use efficiency of drip irrigated corn in the Bekaa Valley of Lebanon. *Agricultural Water Management* 63: 125–137.
- KASHYAP, P; PANDA, R. 2001. Evaluation of evapotranspiration estimation methods and development of crop-coefficients for potato crop in a sub-humid region. *Agricultural Water Management* 50: 9-25.
- KEULEN, H.; VAN WOLF, J. 1986. *Modelling of agricultural production: weather, soil and crops*, PUDOC. Wageningen, Holanda. 479 p,
- KRAMER, P. 1983. *Water stress and plant growth.* New York 55p.
- KRANZ, W.L., R.S. Kanwar and C.E. Pederson. 1998. Collection and Monitoring of One-Meter Cubic Soli Monoliths for Leaching Studies. *Trans. ASAE.* 41:333-334.

- KUNG, K.J.S. 1993. Laboratory observation of funnel flow mechanism and its influence on solute transport. *J. Environ. Qual.* 22:91-102.
- LALIBERTE, A. S., WINTERS, C., & RANGO, A. (2008, April). A procedure for orthorectification of sub-decimeter resolution imagery obtained with an unmanned aerial vehicle (UAV). In *Proc. ASPRS Annual Conf* (pp. 08-047).
- LAMB, D. W., BROWN, R. B. 2001. Remote-sensing and mapping of weeds in crops. *Journal of Agricultural Engineering Research.* 78:117-125.
- LOOS, C; GAYLER, S; PRIESACK, E. 2007. Assessment of water balance simulations for large- scale weighing lysimeters. *Journal of Hydrology* 335: 259– 270.
- LOPEZ- URREA, R; MARTÍN, F; FABEIRO, C; MORATALLA, A. 2006. Testing evapotranspiration equations using lysimeter observations in a semiarid climate. *Agricultural water management* 85: 15-26.
- MACKERRON, D. K. L. 2008. Advances in modelling the potato crop: sufficiency and accuracy considering uses and users, data, and errors. *Potato Research*, no. 51, p. 411-427
- MAREK, T.H., A.D. SCHNEIDER, T.A. HOWELL, L.L. EBELING. 1988. Design and construction of Large Weighing Monolithics Lysimeters. 1988. *Trans. ASAE* 31:477-484.
- MARTIN, E.C., T.L. LOUDON, J.T. RITCHIE, AND A. WERNER. 1994. Use of drainage lysimeter to evaluate nitrogen and irrigation management strategies to minimize nitrate leaching in maize production. *Trans. ASAE* 37:79-83.
- MARTÍNEZ, C. Y U. MORENO. 1992. “Expresiones fisiológicas de resistencia a la sequía en dos variedades de papa sometidas a estrés hídrico en condiciones de campo”, Brasil, *Revista Brasileira de Fisiología Vegetal*, (4): 41-52.).
- MASCHHAUPT, J.G. 1949. Lysimeter investigation at Groningen. III. Rainfall, drainage and evaporation. *Varssl. Landbouwk. Onderz.* Mata, M., J. Girona, D. Goldhamer, E. Fereres, M. Cohen and S.
- MATHER, P.M., 1999: *Computer processing of remotely-sensed images. An Introduction.* Chichester: Wiley, xiv + 292pp. £29.95 paper. ISBN 0 471 98550 3.
- MEIRA, S. Y GUEVARA, E. 2003. Uso de modelos de simulación como herramienta para la toma de decisiones en el cultivo de soja Disponible en: <www.elsitioagricola.com>.
- MIILLER, D. E.; MAERTIN, M. W. 1985. Effect of water stress during tuber formation on subsequent growth and internal defects in “Ruset burbank” potatoes. *American Potato Journal* 62: 83-89.

- MILLARD, P., G.G. WRIGHT, M.J. ADAMS, R.V. BIRNIE, AND P. WITHWORTH. 1990. Estimation of light interception and biomass of the potato (*Solanum tuberosum* L.) from reflection in the red and near-infrared spectral bands. *Agric. For. Meteorol.* 53:19-31.
- MORAN, M. S., INOUE, Y., & BARNES, E. M. 1997. Opportunities and limitations for imagebased remote sensing in precision crop management. *Remote Sensing of Environment.* 61:319-346.
- MOYER, J.W., L.S. SAPORITO, AND R.R. JANKE. 1996. Design, construction, and installation of an intact soil core lysimeter. *Agron. J.* 88:253-256.
- MULLA, D. J. 2013. Twenty five years of remote sensing in precision agriculture:
- NISSEN, J.; ACUÑA, J.; DAROCH, R. 1985. Evapotranspiración y producción de papas (*Solanum tuberosum* L.) bajo condiciones de riego para la zona de Valdivia. *Agro Sur* 13: 8-12.
- NISSEN, J.; ECHEVERRIA, O; DAROCH, R; BANSE, J. 1986. Efecto del riego sobre algunos parámetros de desarrollo físicos y químicos de la papa (*Solanum tuberosum* L.) en la zona de Valdivia. *Agro Sur* 14: 1-6
- ÑÚSTEZ, C. E.; SANTOS, M. Y SEGURA, M. 2009. Acumulación y distribución de materia seca de cuatro variedades de papa (*Solanum tuberosum* L.) en Zipaquirá, Cundinamarca (Colombia). *Rev. Fac. Nal. Agr. Medellín*, vol. 62, no. 1, p. 4823-4834.
- OPENA, G.; PORTER, G. 1999. Soil management and supplemental irrigation effects on potato: II. Root growth. *Agronomy Journal.* 91: 426-431
- OWENS, L.B. 1987. Nitrate leaching losses from monolith lysimeters as influenced by nitrapyrin. *J. Environ. Qual.* 16:34-38.
- PENNING DE VRIES, F.W.T.; JANSEN, D.M.; TEN BERGE, H.F.; BAKEMA, A. 1989. Simulation of ecophysiological processes of growth in several annual crops PUDOC. Wageningen, Holanda. 271 p.
- PEREIRA, A. B. /et. al./. 2008. Potato potential yield based on climatic elements and cultivar characteristics. *Bragantia*, Campinas, , vol. 67, no. 2, p. 327-334
- PUMISACHO, M. y SHERWOOD, S. 2002. Cultivo de la papa en Ecuador. Quito – Ecuador. Centro Internacional de la papa.
- QUINTERO, I. /et al./. 2009. Evaluación de once clones promisorios de papa (*Solanum tuberosum* L.) en el Estado Trujillo. I. Crecimiento, desarrollo y rendimiento. *Rev. Fac. Agron. (LUZ)*, , no. 26, p. 362-381.
- REEDER, J.D. 1986. A non-weighing lysimeters design for field studies using nitrogen-15. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50:1224-1227.

- RICHARDS, L.A., NEAL, O.R. and Russell, M.B. (1939). Observations on moisture conditions in lysimeters. II. Soil Sci. Soc. Am. Peoc. 4:55-59.
- RITCHIE, J.T. and E. BURNETT. 1968. A precision weighing lysimeter for row crop water use studies. Agron. J. 60:545-549.
- RITCHIE, J.T.; NESMITH, D.S. 1991. Temperature and crop development. En: Modelling plant an soil Systems - Agronomy monograph N° 31. ASA - CSSA- SSSA, Madison, EE.UU. 5-29.
- ROSENTHAL, W.D., T.J. GERIK, AND L.J. WADE. 1993. Radiation-use efficiency among grain sorghum cultivars and plant densities. Agron. J. 85:703-705.
- RUIZ, M. E. 2005. Aliados de la agricultura. Periódico Granma Internacional. Año 11, no. 279, 14 de abril de.
- SALISBURY & ROSS. 1992. Fisiología de las plantas 1. Células: agua, soluciones y superficies. Paraninfo & Thomson-Learning. España.
- SANDERS, P. 1997. Vegetable crop irrigation. North Caroline Cooperative Extension Service. <http://www.Ceb.ncsu.colu./depts/hort/hil/hil-33-e.html>.
- SANDOVAL, J. 1993. Planificación y manejo de riego en el cultivo de papa. In: V Jornadas de Extensión Agrícola. Manejo Agronómico del cultivo de Papa y las Perspectivas del Mercado. Universidad Católica de Temuco. Agosto de 1993.
- SANTOS, M.; SEGURA, M. Y ÑÚSTEZ, C. E. 2010. Análisis de crecimiento y relación fuente-demanda de cuatro variedades de papa (*Solanum tuberosum* L.) en el municipio de Zipaquirá (Cundinamarca, Colombia). Rev. Fac. Nal. Agr. Medellín, , vol. 63, no. 1, p. 5253-5266..
- SCHILLING, K; KINIRY, J. 2007. Estimation of evapotranspiration by reed canarygrass using field observations and model simulations. Journal of Hydrology 337: 356– 363.
- SEPASKHAH, A; ILAMPOUR, S. 1995. Effects of soil moisture stress on evapotranspiration partitioning. Agricultural Water Management 28: 31 1-323.
- SHANAHAN, J. F., SCHEPERS, J. S., FRANCIS, D. D., VARVEL, G. E., WILHELM, W. W., TRINGE, J. M. 2001. Use of remote sensing imagery to estimate corn grain yield. Agronomy Journal. 93:583-589.
- SHIPITALO, M.J., and W.M. Edwards. 1993. Seasonal patterns of water and chemical movement in tilled and no-till column lysimeters. Soil Sci. Soc. Am. J. 57:218-223.
- SIMPFENDOFR, E. 2000. Efecto del Riego en el cultivo de papa. Especial del riego y drenaje. INIA (34). pp 35 – 38.

- SOLANO S, JAIME, MEDINA M, LEOVIGILDO Y NISSEN M, JUAN. 2003. Efecto de niveles y frecuencias de riego por aspersión en papa (*Solanum tuberosum* L.). *Agro sur*, dic. vol.31, no.2, p.47-59. ISSN 0304-8802.
- STANGHELLINI, C. 1993. Evapotranspiration in greenhouses with special reference to mediterranean conditions. *Acta Hort. (ISHS)* 335:295-304.
- STEFANO, C; FERRO, V. 1997. Estimation of evapotranspiration by Hargreaves formula and remotely sensed data in semi-arid mediterranean areas. *J. Agric. Engng Res* 68: 189- 199.
- STOTT, P. STONE, D. y ALLEN, M. 2004. Human contribution to the European heatwave of 2004, *Nature* 432, 610-614.
- SUBEDI, P. P. Y WALSH, K. B. 2009. Assessment of Potato Dry Matter Concentration Using Short-Wave Near-Infrared Spectroscopy. *Potato Research*, no. 52, p. 67-77.
- THOMPSON, M.L., and R.L. SCHARF. 1994. An improved zero-tension lysimeter to monitor colloid transport in soils. *J. Environ. Qual.* 23:378- 383.
- TORRES-SÁNCHEZ, J., PEÑA, J.M., DE CASTRO-MEGÍAS, A.I. AND LÓPEZ-GRANADOS, F. 2013. Configuration and Specifications of an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) for Early Site Specific Weed Management. *PLoS ONE* 8, e58210.
- TOSSO, T. J. 1976. Determinaciones de evapotranspiración y coeficientes Kc para varios cultivos. *Agricultura Técnica.* 36: 151-155.
- TRAMBOUZE, W; BERTUZZI, P; VOLTZ, M. 1998. Comparison of methods for estimating actual evapotranspiration in a row-cropped vineyard. *Agricultural and Forest Meteorology* 91: 193-208.
- UNIVERSIDAD DE GEORGIA. 2008. Assessing crop production, nutrient management, climatic risk and environment sustainability. Training program on DSSAT version 4
- VARAS, E.; PARKER, J.; CLARET, M.; MARDONES, R. 1995. Frecuencia de riego en papa. *Tierra Adentro.* N° 4: 34-36
- VÁSQUEZ, V. e IGLESIAS L. 2000. Pautas para una programación del riego. *Boletín técnico ICIA* 7 pp 69-77.
- VÁZQUEZ, 1996 VÁZQUEZ, I. r.: 1997. Comportamiento del cultivo de la papa en la UBPC N° 3 de la E.C.V. “Valle del Yabú”, 57pp., Trabajo de Estancia, Universidad Central de Las Villas, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Villa Clara, Cuba,.)
- VERGER A., N. VIGNEAU, C. CHÉRON, J. GILLIOT, A. COMAR, F. BARET. 2014. Green area index from an unmanned aerial system over wheat and rapeseed crops. *Remote Sensing of Environment.* 152:654–664.

- VILLALOBOS, F; TESTI, L; RIZZALLI, R; ORGAZ, F. 2003. Evapotranspiration and crop coefficients of irrigated garlic (*Allium sativum* L.) in a semi-arid climate. *Agricultural Water Management* 64: 233–249.
- VILLA-NOVA, N; PEREIRA, A; SHOCK, C. 2007. Estimation of Reference Evapotranspiration by an Energy Balance Approach. *Biosystems Engineering* 96: 605–615.
- WATSON, R., ZINYOWERA, M. y MOSS, R. 1997. The regional impacts of climate change: an assessment of vulnerability. Summary for policymakers. Report of IPCC Working group II. Cambridge 16pp.
- WEN-JIN, Y; RYO, K; LIAN-HUA, L; HIROKAZU, F.2010. A computer program for automatic watering based on potential evapotranspiration by penman method and predicted leaf area in miniature pot rose production. *Agricultural Sciences in China*. 9(3): 370-377.
- WILL, L. 2012. Sistemas de riego. Disponible en: <http://agropecuarios.net/sistemas-de-riego-por-aspersion-surcos-y-goteo.html>
- WINNIK, M. 1935. Ten years of lysimeters studies on some soils of Palestine. *Trans. Int. Cong. Soli Sci. Oxford* I:212-214.
- WU, L., J.M. Baker, and R.R. Allmaras. 1995. Numerical and Field Evaluation of Soil Water Samples by Suction Lysimeters. *J. Environ. Qual.* 24:147-152.
- YUNUSA, I; WALKER, R; LU, R. 2004. Evapotranspiration components from energy balance, sapflow and microlysimetry techniques for an irrigated vineyard in inland Australia.
- ZAMORA, F. R.; SÁNCHEZ, A. Y TUA, D. 2008. Evaluación biométrica de dos variedades de papa, en la zona alta del estado falcón, Venezuela. *Agronomía Tropical*, no. 58, no. 1, p. 41-43.

VIII. ANEXOS

Cuadro N° 9.1 ANOVA Altura de la planta en cm a los 30 días después de siembra.

F de V	g.l.	S.C.	C.M.	F.C.	F. Tab.		Significancia
					0,05	0,01	
Total	8	130,40	16,30				
Repeticiones	2	6,81	3,40	0,59	6,94	18,00	ns
Tratamientos	2	100,53	50,26	8,72	6,94	18,00	*
T1 vs T2,T3	1	84,85	84,85	14,71	7,71	21,20	*
T2 vs T3	1	15,68	15,68	2,72	7,71	21,20	ns
Error	4	23,07	5,77				
C de V	15,53						

REP Medias Rango

R3 16,14 A

R2 16,02 A

R1 14,24 A

TRAT Medias Rango

T1 Lisímetros 19,81 A

T3 Formulas 14,91 A B

T2 Tanque A 11,68 B

Cuadro N° 9.2 ANOVA Altura de la planta en cm a los 60 días después de la siembra

F de V	g.l.	S.C.	C.M.	F.C.	F. Tab.		Significancia
					0,05	0,01	
Total	8	216,18	27,02				
Repeticiones	2	12,00	6,00	0,74	6,94	18,00	ns
Tratamientos	2	171,93	85,97	10,66	6,94	18,00	*
T1 vs T2,T3	1	171,43	171,43	21,27	7,71	21,20	**
T2 vs T3	1	0,50	0,50	0,06	7,71	21,20	ns
Error	4	32,25	8,06				
C de V	7,22						

REP Medias Rangos

R2 40,90 A

R1 38,88 A

R3 38,18 A

TRAT Medias Rangos

T1 45,49 A

T2 36,52 B

T3 35,94 B

Cuadro N° 9.3 ANOVA Altura de la planta en cm a los 90 días después de la siembra

F de V	g.l.	S.C.	C.M.	F.C.	F. Tab.		Significancia
					0,05	0,01	
Total	8	636,66	79,58				
Repeticiones	2	5,67	2,83	0,22	6,94	18,00	ns
Tratamientos	2	579,19	289,60	22,36	6,94	18,00	**
T1 vs T2,T3	1	578,79	578,79	44,70	7,71	21,20	**
T2 vs T3	1	0,40	0,40	0,03	7,71	21,20	ns
Error	4	51,80	12,95				
C de V	5,03						

REP Medias Rango

R2 72,59 A

R1 71,19 A

R3 70,72 A

TRAT Medias Rango

T1 82,84 A

T2 66,09 B

T3 65,57 B

Cuadro N° 9.4 ANOVA Altura de la planta en cm a los 120 días después de la siembra

F de V	g.l.	S.C.	C.M.	F.C.	F. Tab.		Significancia
					0,05	0,01	
Total	8	628,60	78,58				
Repeticiones	2	25,69	12,84	0,99	6,94	18,00	ns
Tratamientos	2	551,04	275,52	21,25	6,94	18,00	**
T1 vs T2,T3	1	414,14	414,14	31,94	7,71	21,20	**
T2 vs T3	1	136,90	136,90	10,56	7,71	21,20	*
Error	4	51,87	12,97				
C de V	3,74						

REP Medias Rango

R1 97,86 A

R2 96,99 A

R3 93,92 A

TRAT Medias Rango

T1 105,85 A

T3 96,24 A B

T2 86,68 B

Cuadro N° 9.5 ANOVA Diámetro del tallo en mm a los 30 días después de la siembra.

F de V	g.l.	S.C.	C.M.	F.C.	F. Tab.		Significancia
					0,05	0,01	
Total	8	4,65	0,58				
Repeticiones	2	0,05	0,02	0,18	6,94	18,00	ns
Tratamientos	2	4,05	2,03	14,76	6,94	18,00	*
T1 vs T2,T3	1	3,15	3,15	22,93	7,71	21,20	**
T2 vs T3	1	0,90	0,90	6,59	7,71	21,20	ns
Error	4	0,55	0,14				
C de V	3,90						

REP Medias Rango

R2 9,58 A

R3 9,53 A

R1 9,40 A

TRAT Medias Rango

T1 10,34 A

T3 9,47 A B

T2 8,70 B

Cuadro N° 9.6 ANOVA Diámetro del tallo en mm a los 60 días después de la siembra

F de V	g.l.	S.C.	C.M.	F.C.	F. Tab.		Significancia
					0,05	0,01	
Total	8	30,04	3,76				
Repeticiones	2	0,04	0,02	0,09	6,94	18,00	ns
Tratamientos	2	29,15	14,58	68,00	6,94	18,00	**
T1 vs T2,T3	1	23,03	23,03	107,44	7,71	21,20	**
T2 vs T3	1	6,12	6,12	28,55	7,71	21,20	**
Error	4	0,86	0,21				
C de V	3,09						

REP Medias Rango

R2 15,09 A

R3 14,98 A

R1 14,93 A

TRAT Medias Rango

T1 17,26 A

T3 14,88 B

T2 12,86 C

Cuadro N° 9.7 ANOVA Diámetro del tallo en mm a los 90 días después de la siembra

F de V	g.l.	S.C.	C.M.	F.C.	F. Tab.	Significancia
--------	------	------	------	------	---------	---------------

					0,05	0,01	
Total	8	27,35	3,42				
Repeticiones	2	0,96	0,48	1,15	6,94	18,00	ns
Tratamientos	2	24,72	12,36	29,64	6,94	18,00	**
T1 vs T2,T3	1	14,69	14,69	35,22	7,71	21,20	**
T2 vs T3	1	10,04	10,04	24,07	7,71	21,20	**
Error	4	1,67	0,42				
C de V	3,36						

REP Medias Rango

R2 19,60 A

R3 19,29 A

R1 18,81 A

TRAT Medias Rango

T1 21,04 A

T3 19,62 A

T2 17,04 B

Cuadro N° 9.8 ANOVA Diámetro del tallo en mm a los 120 días después de la siembra

F de V	g.l.	S.C.	C.M.	F.C.	F. Tab.		Significancia
					0,05	0,01	
Total	8	27,35	3,42				
Repeticiones	2	0,96	0,48	1,15	6,94	18,00	ns
Tratamientos	2	24,72	12,36	29,64	6,94	18,00	**
T1 vs T2,T3	1	14,69	14,69	35,22	7,71	21,20	**
T2 vs T3	1	10,04	10,04	24,07	7,71	21,20	**
Error	4	1,67	0,42				
C de V	3,35						

REP Medias Rango

R2 19,65 A

R3 19,34 A

R1 18,86 A

TRAT Medias Rango

T1 21,09 A

T3 19,67 A

T2 17,09 B

Cuadro N° 9.9 ANOVA Número de tallos 30 días después de la siembra

F de V	g.l.	S.C.	C.M.	F.C.	F. Tab.		Significancia
					0,05	0,01	
Total	8	6,72	0,84				
Repeticiones	2	0,30	0,15	0,86	6,94	18,00	ns
Tratamientos	2	5,72	2,86	16,32	6,94	18,00	*
T1 vs T2,T3	1	2,49	2,49	14,23	7,71	21,20	*

T2 vs T3	1	3,23	3,23	18,41	7,71	21,20	*
Error	4	0,70	0,18				
C de V	15,47						

REP Medias Rango

R1 2,87 A

R3 2,80 A

R2 2,45 A

TRAT Medias Rango

T1 3,45 A

T3 3,07 A

T2 1,60 B

Cuadro N° 9.10 ANOVA Número de tallos 60 días después de la siembra

F de V	g.l.	S.C.	C.M.	F.C.	F. Tab.		Significancia
					0,05	0,01	
Total	8	6,77	0,85				
Repeticiones	2	0,28	0,14	0,87	6,94	18,00	ns
Tratamientos	2	5,83	2,92	17,89	6,94	18,00	*
T1 vs T2,T3	1	2,53	2,53	15,53	7,71	21,20	*
T2 vs T3	1	3,30	3,30	20,25	7,71	21,20	*
Error	4	0,65	0,16				
C de V	8,50						

REP Medias Rango

R1 4,90 A

R3 4,85 A

R2 4,50 A

TRAT Medias Rango

T1 5,50 A

T3 5,12 A

T2 3,63 B

Cuadro N° 9.11 ANOVA Número de tallos 90 días después de la siembra

F de V	g.l.	S.C.	C.M.	F.C.	F. Tab.		Significancia
					0,05	0,01	
Total	8	6,85	0,86				
Repeticiones	2	0,26	0,13	0,75	6,94	18,00	ns
Tratamientos	2	5,90	2,95	17,15	6,94	18,00	*
T1 vs T2,T3	1	2,68	2,68	15,55	7,71	21,20	*
T2 vs T3	1	3,23	3,23	18,75	7,71	21,20	*
Error	4	0,69	0,17				

C de V	7,13
--------	-------------

REP Medias Rango

R1 5,94 A
R3 5,93 A
R2 5,58 A

TRAT Medias Rango

T1 6,59 A
T3 6,17 A
T2 4,70 B

Cuadro N° 9.12 ANOVA Número de tallos 120 días después de la siembra

F de V	g.l.	S.C.	C.M.	F.C.	F. Tab.		Significancia
					0,05	0,01	
Total	8	7,75	0,97				
Repeticiones	2	0,09	0,05	0,18	6,94	18,00	ns
Tratamientos	2	6,63	3,32	12,95	6,94	18,00	*
T1 vs T2,T3	1	3,56	3,56	13,92	7,71	21,20	*
T2 vs T3	1	3,07	3,07	11,98	7,71	21,20	*
Error	4	1,02	0,26				
C de V	8,34						

REP Medias Rango

R3 6,19 A
R1 6,07 A
R2 5,95 A

TRAT Medias Rango

T1 6,96 A
T3 6,34 A B
T2 4,91 B

Cuadro N° 9.13 ANOVA Profundidad radicular 30 días después de la siembra

F de V	g.l.	S.C.	C.M.	F.C.	F. Tab.		Significancia
					0,05	0,01	
Total	8	72,71	9,09				
Repeticiones	2	1,93	0,97	0,54	6,94	18,00	ns
Tratamientos	2	63,56	31,78	17,61	6,94	18,00	*
T1 vs T2,T3	1	44,65	44,65	24,74	7,71	21,20	**
T2 vs T3	1	18,90	18,90	10,48	7,71	21,20	*
Error	4	7,22	1,80				
C de V	8,22						

REP Medias Rango

R2 16,97 A

R1 16,23 A

R3 15,85 A

TRAT Medias Rango

T2 19,70 A

T3 16,15 A B

T1 13,20 B

Cuadro N° 9.14 ANOVA Profundidad radicular 60 días después de la siembra

F de V	g.l.	S.C.	C.M.	F.C.	F. Tab.		Significancia
					0,05	0,01	
Total	8	95,73	11,97				
Repeticiones	2	2,78	1,39	0,38	6,94	18,00	ns
Tratamientos	2	78,21	39,10	10,61	6,94	18,00	*
T1 vs T2,T3	1	47,11	47,11	12,78	7,71	21,20	*
T2 vs T3	1	31,10	31,10	8,44	7,71	21,20	*
Error	4	14,74	3,69				
C de V	9,41						

REP Medias Rango

R1 20,85 A

R2 20,72 A

R3 19,61 A

TRAT Medias Rango

T2 24,29 A

T3 19,73 A B

T1 17,16 B

Cuadro N° 9.15 ANOVA Profundidad radicular 90 días después de la siembra

F de V	g.l.	S.C.	C.M.	F.C.	F. Tab.		Significancia
					0,05	0,01	
Total	8	174,88	21,86				
Repeticiones	2	9,83	4,92	2,84	6,94	18,00	ns
Tratamientos	2	158,11	79,06	45,61	6,94	18,00	**
T1 vs T2,T3	1	76,34	76,34	44,04	7,71	21,20	**
T2 vs T3	1	81,77	81,77	47,17	7,71	21,20	**
Error	4	6,93	1,73				
C de V	4,16						

REP Medias Rango

R2 33,15 A

R3 31,12 A

R1 30,78 A

TRAT Medias Rango

T2 37,43 A

T3 30,05 B

T1 27,56 B

Cuadro N° 9.16 ANOVA Profundidad radicular 120 días después de la siembra

F de V	g.l.	S.C.	C.M.	F.C.	F. Tab.		Significancia
					0,05	0,01	
Total	8	214,09	26,76				
Repeticiones	2	17,21	8,61	3,16	6,94	18,00	ns
Tratamientos	2	186,00	93,00	34,19	6,94	18,00	**
T1 vs T2,T3	1	47,76	47,76	17,56	7,71	21,20	*
T2 vs T3	1	138,24	138,24	50,83	7,71	21,20	**
Error	4	10,88	2,72				
C de V	4,15						

REP Medias Rango

R2 41,40 A

R3 39,91 A

R1 38,02 A

TRAT Medias n E.E.

T2 46,21 3 0,95 A

T3 36,61 3 0,95 B

T1 36,52 3 0,95 B

Cuadro N° 9.17 ANOVA Contenido de clorofila 30 días después de la siembra

F de V	g.l.	S.C.	C.M.	F.C.	F. Tab.		Significancia
					0,05	0,01	
Total	8	127,72	15,96				
Repeticiones	2	2,92	1,46	2,90	6,94	18,00	ns
Tratamientos	2	122,78	61,39	122,08	6,94	18,00	**
T1 vs T2,T3	1	73,65	73,65	146,46	7,71	21,20	**
T2 vs T3	1	49,13	49,13	97,71	7,71	21,20	**
Error	4	2,01	0,50				
C de V	1,48						

REP Medias Rango

R3 48,53 A
 R2 47,60 A
 R1 47,16 A

TRAT Medias Rango

T2 52,65 A
 T3 46,92 B
 T1 43,72 C

Cuadro N° 9.18 ANOVA Contenido de clorofila 60 días después de la siembra

F de V	g.l.	S.C.	C.M.	F.C.	F. Tab.		Significancia
					0,05	0,01	
Total	8	197,53	24,69				
Repeticiones	2	22,96	11,48	1,19	6,94	18,00	ns
Tratamientos	2	135,89	67,94	7,03	6,94	18,00	*
T1 vs T2,T3	1	89,96	89,96	9,30	7,71	21,20	*
T2 vs T3	1	45,93	45,93	4,75	7,71	21,20	ns
Error	4	38,68	9,67				
C de V	6,43						

REP Medias Rango

R3 50,56 A
 R2 47,64 A
 R1 46,85 A

TRAT Medias Rango

T2 53,35 A
 T3 47,82 A B
 T1 43,88 B

Cuadro N° 9.19 ANOVA Contenido de clorofila 90 días después de la siembra

F de V	g.l.	S.C.	C.M.	F.C.	F. Tab.		Significancia
					0,05	0,01	
Total	8	28,34	3,54				
Repeticiones	2	0,34	0,17	0,17	6,94	18,00	ns
Tratamientos	2	23,94	11,97	11,77	6,94	18,00	*
T1 vs T2,T3	1	23,46	23,46	23,07	7,71	21,20	**
T2 vs T3	1	0,48	0,48	0,47	7,71	21,20	ns
Error	4	4,07	1,02				
C de V	2,27						

REP Medias Rango

R3 44,57 A

R1 44,32 A
 R2 44,10 A

TRAT Medias Rango

T2 45,75 A
 T3 45,19 A
 T1 42,05 B

Cuadro N° 9.20 ANOVA Contenido de clorofila 120 días después de la siembra

F de V	g.l.	S.C.	C.M.	F.C.	F. Tab.		Significancia
					0,05	0,01	
Total	8	24,28	3,04				
Repeticiones	2	0,47	0,24	0,24	6,94	18,00	ns
Tratamientos	2	19,89	9,94	10,15	6,94	18,00	*
T1 vs T2,T3	1	17,33	17,33	17,68	7,71	21,20	*
T2 vs T3	1	2,56	2,56	2,61	7,71	21,20	ns
Error	4	3,92	0,98				
C de V	2,41						

REP Medias Rango

R2 41,29 A
 R3 40,96 A
 R1 40,73 A

TRAT Medias Rango

T1 42,96 A
 T3 40,67 A B
 T2 39,36 B

Cuadro N° 9.21 ANOVA Contenido relativo de agua en planta

F de V	g.l.	S.C.	C.M.	F.C.	F. Tab.		Significancia
					0,05	0,01	
Total	8	162,10	20,26				
Repeticiones	2	29,27	14,63	2,43	6,94	18,00	ns
Tratamientos	2	108,74	54,37	9,03	6,94	18,00	*
T1 vs T2,T3	1	36,84	36,84	6,12	7,71	21,20	ns
T2 vs T3	1	71,90	71,90	11,94	7,71	21,20	*
Error	4	24,09	6,02				
C de V	4,21						

REP Medias Rango

R2 60,80 A
 R3 57,75 A
 R1 56,51 A

TRAT Medias Rango

T2 63,25 A
T3 56,32 A B
T1 55,49 B

Cuadro N° 9.22 ANOVA Número de tubérculos primera categoría

F de V	g.l.	S.C.	C.M.	F.C.	F. Tab.		Significan.
					0,05	0,01	
Total	8	0,37	0,05				
Repeticiones	2	0,02	0,01	0,54	6,94	18,00	Ns
Tratamientos	2	0,26	0,13	5,89	6,94	18,00	Ns
T1 vs T2,T3	1	0,24	0,24	10,99	7,71	21,20	*
T2 vs T3	1	0,02	0,02	0,79	7,71	21,20	Ns
Error	4	0,09	0,02				
C de V	6,70						

REP MEDIAS RANGO

1 2,26 A
3 2,26 A
2 2,15 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

TRAT MEDIAS RANGO

T2 2,39 A
T3 2,29 A
T1 1,99 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

Cuadro N° 9.23 ANOVA Número de tubérculos primera categoría

F de V	g.l.	S.C.	C.M.	F.C.	F. Tab.		Significan.
					0,05	0,01	
Total	8	22,52	2,81				
Repeticiones	2	0,21	0,11	0,43	6,94	18,00	ns
Tratamientos	2	21,31	10,66	43,05	6,94	18,00	**
T1 vs T2,T3	1	1,69	1,69	6,84	7,71	21,20	ns
T2 vs T3	1	19,62	19,62	79,25	7,71	21,20	**
Error	4	0,99	0,25				
C de V	10,26						

REP MEDIAS RANGO

2 5,05 A
3 4,82 A

1 4,68 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

TRAT MEDIAS RANGO

T3 6,35 A

T1 5,46 A

T2 2,73 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Cuadro N° 9.24 ANOVA Número de tubérculos primera categoría

F de V	g.l.	S.C.	C.M.	F.C.	F. Tab.		Significan.
					0,05	0,01	
Total	8	6,04	0,76				
Repeticiones	2	0,17	0,09	0,20	6,94	18,00	ns
Tratamientos	2	4,19	2,09	4,98	6,94	18,00	ns
T1 vs T2,T3	1	2,58	2,58	6,13	7,71	21,20	ns
T2 vs T3	1	1,61	1,61	3,84	7,71	21,20	ns
Error	4	1,68	0,42				
C de V	8,99						

REP MEDIAS RANGO

2 7,39 A

3 7,18 A

1 7,05 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

TRAT MEDIAS RANGO

T2 8,10 A

T3 7,07 A

T1 6,45 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Cuadro N° 9.25 ANOVA Número de tubérculos primera categoría

F de V	g.l.	S.C.	C.M.	F.C.	F. Tab.		Significan.
					0,05	0,01	
Total	8	30,00	3,75				
Repeticiones	2	1,85	0,92	1,39	6,94	18,00	Ns
Tratamientos	2	25,48	12,74	19,11	6,94	18,00	**
T1 vs T2,T3	1	15,62	15,62	23,44	7,71	21,20	**
T2 vs T3	1	9,86	9,86	14,78	7,71	21,20	*
Error	4	2,67	0,67				
C de V	6,94						

REP MEDIAS RANGO

1 12,39 A

2 11,57 A

3 11,34 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

TRAT MEDIAS RANGO

T1 13,63 A

T2 12,12 A

T3 9,55 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Cuadro N° 9.26 ANOVA Producción por categoría parcela Kg

F de V	g.l.	S.C.	C.M.	F.C.	F. Tab.		Significan.
					0,05	0,01	
Total	8	0,0100	0,00125				
Repeticiones	2	0,0008	0,00041	9,8000	6,94	18,00	*
Tratamientos	2	0,0090	0,00451	108,2000	6,94	18,00	**
T1 vs T2,T3	1	0,0078	0,00781	187,5000	7,71	21,20	**
T2 vs T3	1	0,0012	0,00120	28,9000	7,71	21,20	**
Error	4	0,0002	0,00004				
C de V	2,83						

REP MEDIAS RANGO

1 0,24 A

3 0,24 A B

2 0,22 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

TRAT MEDIAS RANGO

T1 0,27 A

T3 0,23 B

T2 0,19 C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Cuadro N° 9.27 ANOVA Producción por categoría parcela Kg

F de V	g.l.	S.C.	C.M.	F.C.	F. Tab.		Significan.
					0,05	0,01	
Total	8	0,060	0,007				
Repeticiones	2	0,015	0,008	7,91	6,94	18,00	*
Tratamientos	2	0,041	0,021	21,61	6,94	18,00	**
T1 vs T2,T3	1	0,033	0,033	34,72	7,71	21,20	**
T2 vs T3	1	0,008	0,008	8,50	7,71	21,20	*
Error	4	0,004	0,001				
C de V	12,43						

REP MEDIAS RANGO

3 0,30 A

2 0,25 A B

1 0,20 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

TRAT MEDIAS RANGO

T1 0,33 A
T3 0,24 B
T2 0,17 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Cuadro N° 9.28 ANOVA Producción por categoría parcela Kg

F de V	g.l.	S.C.	C.M.	F.C.	F. Tab.		Significan.
					0,05	0,01	
Total	8	0,0113	0,0014				
Repeticiones	2	0,0017	0,0009	0,3670	6,94	18,00	ns
Tratamientos	2	0,0003	0,0001	0,0622	6,94	18,00	ns
T1 vs T2,T3	1	0,0001	0,0001	0,0598	7,71	21,20	ns
T2 vs T3	1	0,0002	0,0002	0,0646	7,71	21,20	ns
Error	4	0,0093	0,0023				
C de V	28,17						

REP MEDIAS RANGO

3 0,18 A
2 0,18 A
1 0,15 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

TRAT MEDIAS RANGO

T2 0,18 A
T1 0,18 A
T3 0,17 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Cuadro N° 9.29 ANOVA Producción por categoría parcela Kg

F de V	g.l.	S.C.	C.M.	F.C.	F. Tab.		Significan.
					0,05	0,01	
Total	8	0,009	0,001				
Repeticiones	2	0,002	0,001	2,023	6,94	18,00	ns
Tratamientos	2	0,004	0,002	3,226	6,94	18,00	ns
T1 vs T2,T3	1	0,000	0,000	0,230	7,71	21,20	ns
T2 vs T3	1	0,004	0,004	6,221	7,71	21,20	ns
Error	4	0,002	0,001				
C de V	16,80						

REP MEDIAS RANGO

1 0,17 A
2 0,16 A
3 0,13 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

TRAT MEDIAS RANGO

T2 0,17 A

T1 0,15 A

T3 0,12 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Cuadro N° 9.30 ANOVA Rendimiento por categoría por kilos por hectárea

F de V	g.l.	S.C.	C.M.	F.C.	F. Tab.		Significan.
					0,05	0,01	
Total	8	11268960,27	1408620,03				
Repeticiones	2	751432,29	375716,14	8,65	6,94	18,00	*
Tratamientos	2	10343878,96	5171939,48	119,14	6,94	18,00	**
T1 vs T2,T3	1	8857517,81	8857517,81	204,03	7,71	21,20	**
T2 vs T3	1	1486361,14	1486361,14	34,24	7,71	21,20	**
Error	4	173649,03	43412,26				
C de V	2,71						

REP MEDIAS RANGO

1 7927,22 A

3 7837,08 A B

2 7274,18 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

TRAT MEDIAS RANGO

T1 9082,47 A

T3 7475,73 B

T2 6480,29 C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Cuadro N° 9.31 ANOVA Rendimiento por categoría por kilos por hectárea

F de V	g.l.	S.C.	C.M.	F.C.	F. Tab.		Significan.
					0,05	0,01	
Total	8	68356552,29	8544569,04				
Repeticiones	2	17428578,13	8714289,06	8,03	6,94	18,00	*
Tratamientos	2	46589559,74	23294779,87	21,48	6,94	18,00	**
T1 vs T2,T3	1	37399674,31	37399674,31	34,48	7,71	21,20	**
T2 vs T3	1	9189885,43	9189885,43	8,47	7,71	21,20	*
Error	4	4338414,41	1084603,60				
C de V	12,46						

REP MEDIAS RANGO

3 10050,50 A

2 8375,42 A B

1 6642,00 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

TRAT MEDIAS RANGO

T1 11238,86 A

T3 8152,13 B

T2 5676,93 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Cuadro N° 9.32 ANOVA Rendimiento por categoría por kilos por hectárea

F de V	g.l.	S.C.	C.M.	F.C.	F. Tab.		Significan.
					0,05	0,01	
Total	8	12486546,58	1560818,32				
Repeticiones	2	2003980,81	1001990,41	0,39	6,94	18,00	ns
Tratamientos	2	292613,79	146306,90	0,06	6,94	18,00	ns
T1 vs T2,T3	1	107053,36	107053,36	0,04	7,71	21,20	ns
T2 vs T3	1	185560,44	185560,44	0,07	7,71	21,20	ns
Error	4	10189951,97	2547487,99				
C de V	27,55						

REP MEDIAS RANGO

3 6133,46 A

2 6121,84 A

1 5126,70 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

TRAT MEDIAS RANGO

T1 5948,24 A

T2 5892,74 A

T3 5541,02 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Cuadro N° 9.33 ANOVA Rendimiento por categoría por kilos por hectárea

F de V	g.l.	S.C.	C.M.	F.C.	F. Tab.		Significan.
					0,05	0,01	
Total	8	9678138,98	1209767,37				
Repeticiones	2	2871067,90	1435533,95	2,21	6,94	18,00	ns
Tratamientos	2	4204953,74	2102476,87	3,23	6,94	18,00	ns
T1 vs T2,T3	1	152230,58	152230,58	0,23	7,71	21,20	ns
T2 vs T3	1	4052723,16	4052723,16	6,23	7,71	21,20	ns
Error	4	2602117,34	650529,34				
C de V	16,45						

REP MEDIAS RANGO

1 5442,28 A

2 5146,06 A

3 4123,82 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

TRAT MEDIAS RANGO

T2 5633,95 A

T1 5087,98 A

T3 3990,23 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Cuadro N° 9.34 ANOVA Rendimiento Total kilos por hectárea

F de V	g.l.	S.C.	C.M.	F.C.	F. Tab.		Significan.
					0,05	0,01	
Total	8	120240783,25	15030097,91				
repeticiones	2	13712362,84	6856181,42	3,89	6,94	18,00	ns
Tratamientos	2	99481670,56	49740835,28	28,23	6,94	18,00	**
T1 vs T2,T3	1	96217348,00	96217348,00	54,62	7,71	21,20	**
T2 vs T3	1	3264322,56	3264322,56	1,85	7,71	21,20	ns
Error	4	7046749,85	1761687,46				
C de V	4,96						

REP MEDIAS RANGO

3 28144,86 A

2 26917,51 A

1 25138,19 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

TRAT MEDIAS RANGO

T1 31357,55 A

T3 25159,11 B

T2 23683,91 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)