

**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE AGRONOMÍA
CARRERA INGENIERÍA AGRONÓMICA**



TESIS DE GRADO

**RIEGO DEFICITARIO CONTROLADO EN DIFERENTES FASES
FENOLÓGICAS DEL CULTIVO DE PAPA (*Solanum tuberosum* L.) EN LA
ESTACIÓN EXPERIMENTAL DE CHOQUENAIRA**

RUFINO QUISPE CALLE

LA PAZ – BOLIVIA

2019

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS

FACULTAD DE AGRONOMÍA

CARRERA INGENIERÍA AGRÓNOMICA

**RIEGO DEFICITARIO CONTROLADO EN DIFERENTES FASES
FENOLÓGICAS DEL CULTIVO DE PAPA (*Solanum tuberosum* L.) EN LA
ESTACIÓN EXPERIMENTAL DE CHOQUENAIRA**

Tesis de Grado presentado como requisito parcial para optar
el Título de Ingeniero Agrónomo

RUFINO QUISPE CALLE

ASESORES:

Ph. D. René Chipana Rivera _____

M. Sc. Fanny Arragan Tancara _____

Ing. Agr. Ebed Quispe Calle _____

REVISORES

Ph. D. Félix Mamani Reynoso _____

M. Sc. Paulino Ruíz Huanca _____

M. Sc. Juan José Vicente Rojas _____

APROBADO

Presidente Tribunal Examinador _____

DEDICATORIA

A Dios

A mi papá

A mi mamá

A mis hermanos (as)

AGRADECIMIENTO

A DIOS por guiarme por el buen camino y darme la sabiduría, fortaleza, inteligencia y voluntad necesaria para culminación del presente trabajo.

A mis queridos padres Manuel Quispe Patty, Zenobia Calle de Quispe y hermanos (as) que me dieron su amor, apoyo, comprensión y confianza brindada en toda mi etapa universitaria y en el desarrollo de la investigación.

Al proyecto “Programación del riego deficitario controlado en cultivos andinos de papa (*Solanum tuberosum*), papalisa (*Ullucus tuberosus*) y tarwi (*Lupinus mutabilis*) mediante sensores, para un uso racional del agua como medida frente al cambio climático, en el municipio de Viacha” de la Facultad de Agronomía-UMSA, por concederme la oportunidad y brindarme la beca tesis para la realización del presente trabajo de investigación.

A mis asesores: Ph. D. René Chipana Rivera, M. Sc. Fanny B. Arragan Tancara e Ing. Ebed Quispe Calle, por haberme dado las sugerencias, y el tiempo dedicado para llevar adelante y mejorar el presente trabajo de investigación.

A mis revisores: Ph. D. Félix Mamani Reynoso, M. Sc. Paulino Ruíz Huanca y M. Sc. Juan José Vicente Rojas, por las correcciones y por sus valiosos aportes que contribuyeron para la presentación final del documento del presente trabajo de investigación.

A la Estación Experimental de Choquenaira de la Facultad de Agronomía por la confianza y paciencia prestada, durante el desarrollo del trabajo de investigación.

A la Facultad de Agronomía - UMSA, por permitir enriquecer mis conocimientos en esta institución.

A mis amigos (as) quienes de alguna manera aportaron en mi formación profesional a las que agradezco por su amistad, consejo y apoyo.

Muchas gracias...

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE CUADROS	v
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
ANEXOS	viii
RESUMEN	ix
I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVOS.....	3
2.1 Objetivo General	3
2.2 Objetivos Específicos.....	3
III. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1 Cultivo de papa	4
3.1.1 Origen.....	4
3.1.2 Importancia del cultivo de papa	4
3.1.3 Descripción del cultivo de papa	6
3.1.3.1 Descripción taxonómica.....	6
3.1.3.2 Descripción morfológica	7
3.1.3.3 Fases fenológicas de la papa	7
3.1.3.4 Ciclo vegetativo del cultivo de papa	8
3.1.3.5 Requerimiento edafoclimático del cultivo de la papa.....	9
3.1.4 Riego en cultivo de papa	11
3.1.5 Déficit hídrico	11
3.1.6 Estrés hídrico	12
3.1.7 Descripción de la variedad de interés	12
3.1.7.1 Huaycha (<i>Solanum tuberosum</i> ssp. <i>andigena</i>).....	12
3.2 Riego.....	13
3.2.1 Riego deficitario	13
3.2.2 Estrategias de riego deficitario.....	14
3.2.2.1 Riego deficitario controlado (RDC)	14

3.2.2.2 Fundamentos del riego deficitario controlado	15
3.2.3 Eficiencia de Uso del Agua (EUA)	16
3.2.4 Productividad del agua	17
3.3 Programación de riego	18
3.3.1 Métodos para programación de riegos	18
3.3.1.1 Programación de riego en base de parámetros climáticos	18
3.3.1.2 Programación de riego en base a estado hídrico del suelo	19
3.3.1.3 Programación de riego en base a estado hídrico del cultivo	21
3.4 Procesos de la evapotranspiración	24
3.4.1 Evaporación	24
3.4.2 Transpiración	24
3.4.3 Evapotranspiración (ET)	25
3.4.3.1 Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET _o)	25
3.4.3.2 Evapotranspiración del cultivo (ET _c)	26
3.4.3.3 Coeficiente del cultivo (K _c)	26
3.4.4 Precipitación	27
3.4.4.1 Precipitación efectiva (P _e)	27
3.5 Contenido de agua en el suelo	28
3.5.1 Capacidad de Campo (CC).....	28
3.5.2 Punto de Marchitez Permanente (PMP)	28
3.5.3 Humedad aprovechable o disponible.....	28
IV. LOCALIZACIÓN	29
4.1 Ubicación	29
4.2 Características climáticas de la zona	30
4.3 Condiciones climáticas durante la investigación	30
4.3.1 Precipitación (PP) y evapotranspiración de referencia (ET _o)	30
4.3.2 Temperatura ambiente durante el periodo de cultivo	31
4.4 Características del agua y suelo utilizado en la investigación.....	33
4.4.1 Características del agua	33

4.4.2 Características del suelo.....	34
4.4.2.1 Características físicas del suelo	34
4.4.2.2 Características químicas del suelo	36
4.5 Descripción física del perfil del suelo	37
4.6 Aspecto fisiográfico	38
V. MATERIALES Y MÉTODOS	39
5.1 Materiales	39
5.1.1 Material vegetal.....	39
5.1.2 Material de campo	39
5.1.3 Materiales orgánicos e inorgánicos.....	40
5.1.4 Equipos y maquinaria agrícola.....	40
5.1.5 Material de gabinete	40
5.2 Métodos	41
5.2.1 Fase de trabajo en campo	41
5.2.1.1 Preparación del terreno	41
5.2.1.2 Delimitación del terreno	42
5.2.1.3 Desinfección de la semilla	42
5.2.1.4 Siembra del cultivo de papa	42
5.2.1.5 Marbeteado de plantas	43
5.2.1.6 Desarrollo de labores culturales	43
5.2.1.7 Riego del cultivo	45
5.2.1.8 Cosecha del cultivo de papa.....	45
5.2.1.9 Post cosecha	46
5.2.2 Fase de trabajo en gabinete	46
5.2.2.1 Programación de riego	46
5.2.3 Diseño Experimental.....	50
5.2.3.1 Modelo Aditivo Lineal.....	50
5.2.3.2 Factores de Estudio.....	51
5.2.3.3 Tratamientos.....	51
5.2.3.4 Características del área experimental	52

5.2.3.5 Croquis del experimento.....	53
5.2.3.6 Análisis Estadístico.....	53
5.2.4 Variables de evaluación.....	54
5.2.4.1 Agua aplicada al cultivo de papa	54
5.2.4.2 Contenido de humedad en el suelo	54
5.2.4.3 Potencial hídrico xilemático	56
5.2.4.4 Temperatura de la hoja.....	57
5.2.4.5 Altura de planta	58
5.2.4.6 Número de tubérculos por planta	58
5.2.4.7 Peso de tubérculos por planta	58
5.2.4.8 Rendimiento total.....	58
5.2.4.9 Eficiencia de uso del agua (EUA)	58
5.2.4.10 Análisis de costos parciales.....	59
VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	61
6.1 Agua aplicada al cultivo de papa.....	61
6.2 Contenido de humedad en el suelo.....	64
6.3 Potencial hídrico xilemático.....	67
6.4 Temperatura de la hoja	69
6.5 Altura de planta	71
6.6 Número de tubérculos por planta	73
6.7 Peso de los tubérculos por planta	75
6.8 Rendimiento total	80
6.9 Eficiencia de uso del agua (EUA).....	86
6.10 Análisis de costos parciales	88
VII. CONCLUSIONES	90
VIII RECOMENDACIONES.....	92
IX. BIBLIOGRAFÍA	93

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Principales países productores de papas	5
Cuadro 2. Análisis químico del agua	33
Cuadro 3. Clase textural de suelo del área experimental	35
Cuadro 4. Características físicas del suelo del área experimental	35
Cuadro 5. Características químicas del suelo del área experimental	36
Cuadro 6. Descripción física del perfil del suelo	37
Cuadro 7. Duración de fases de crecimiento	47
Cuadro 8. Valores del coeficiente del cultivo de papa (Kc)	48
Cuadro 9. Factores y niveles de estudio	51
Cuadro 10. Descripción de los tratamientos combinados	51
Cuadro 11. Tratamientos de Riego Deficitario Controlado en cultivo de papa	52
Cuadro 12. Características y dimensiones del área experimental	52
Cuadro 13. Volumen total de agua aplicada	61
Cuadro 14. Análisis de varianza para altura de planta (cm)	71
Cuadro 15. Análisis de varianza para número de tubérculo por planta	73
Cuadro 16. Comparación de medias, número de tubérculos por planta	73
Cuadro 17. Análisis de varianza para peso de los tubérculos por planta	76
Cuadro 18. Comparación de medias, peso de tubérculos por planta	76
Cuadro 19. Comparación de medias, peso de tubérculos por planta	78
Cuadro 20. Análisis de varianza para el rendimiento total (kg/m ²)	81
Cuadro 21. Comparación de medias, rendimiento total	81
Cuadro 22. Comparación de medias, rendimiento total	83
Cuadro 23. Eficiencia de uso del agua para el cultivo de papa	86
Cuadro 24. Análisis de costos de producción	88

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Fenología del cultivo de papa	8
Figura 2. Ubicación del área de estudio, en Estación Experimental de Choquenaira	29
Figura 3. Precipitación (PP) y evapotranspiración de referencia (ET _o).....	31
Figura 4. Temperatura ambiente durante el periodo de cultivo de papa	32
Figura 5. Parámetros del suelo de la parcela experimental	35
Figura 6. Calicata del suelo experimental	38
Figura 7. Curva del coeficiente del cultivo de papa	48
Figura 8. Croquis experimental	53
Figura 9. Monitoreo de humedad de suelo con sonda FDR Diviner 2000	54
Figura 10. Instalación de tubo de acceso de PVC en el suelo	55
Figura 11. Medición del potencial hídrico xilemático con cámara de presión.....	56
Figura 12. Medición de Temperatura foliar (°C) a través de termómetro infrarrojo	57
Figura 13. Volumen total de agua aplicada (Riego + Pe).....	63
Figura 14. Variación de humedad volumétrica del suelo al 100% ET _c	65
Figura 15. Variación de humedad volumétrica del suelo al 75% ET _c	65
Figura 16. Variación de humedad volumétrica del suelo al 50% ET _c	66
Figura 17. Potencial hídrico xilemático en los diferentes tratamientos	68
Figura 18. Variación de temperatura del aire vs temperatura del cultivo al 100% ET _c ..	69
Figura 19. Variación de temperatura del aire vs temperatura del cultivo al 75% ET _c	69
Figura 20. Variación de temperatura del aire vs temperatura del cultivo al 50% ET _c	70
Figura 21. Altura de planta de los tratamientos	72
Figura 22. Promedio de número de tubérculos por planta de las fases fenológicas	74
Figura 23. Promedio de número de tubérculos por planta en tratamientos.....	75
Figura 24. Promedio de peso de tubérculos por planta, láminas de riego.....	77
Figura 25. Promedio de peso de tubérculos por planta, fases fenológicas	78

Figura 26. Peso de tubérculos por planta en los tratamientos	79
Figura 27. Promedio de rendimiento, láminas de riego	82
Figura 28. Promedio de rendimiento total de las fases fenológicas	83
Figura 29. Rendimiento de tubérculos en los tratamientos	84
Figura 30. Eficiencia de uso del agua en la producción	87

ANEXOS

Anexo 1. Análisis de suelo (IBTEN)	104
Anexo 2. Análisis de agua (IBTEN)	105
Anexo 3. Promedio de altura de planta de papa (cm).	106
Anexo 4. Promedio de número de tubérculos por planta (N° tubérculos/planta).	106
Anexo 5. Promedio de peso de tubérculos por planta (g/planta).	107
Anexo 6. Promedio de rendimiento total (kg/m ²).	107
Anexo 7. Costos de producción.....	108

RESUMEN

El cultivo de papa (*Solanum tuberosum* L.) en Bolivia es muy importante y es el principal ingreso económico para las familias. La mayor parte de las superficies cultivadas se encuentran en regiones semiáridas y áridas de Bolivia, en estas zonas se presenta muchos inconvenientes como: sequías, heladas, precipitaciones escasas, evapotranspiración relativamente altas, baja fertilidad de suelos y existen pocas fuentes de agua, que son aprovechadas a través de sistemas de riego por superficie, inundación, que son poco eficientes, porque más del 50% del agua se pierde desde las fuentes hasta las parcelas de cultivo, generando mayores pérdidas de agua, teniéndose como consecuencia la escasez del agua. Además, sumado a esto la incidencia del cambio climático que indica una reducción de la disponibilidad de agua en el suelo que es evidente. En ese sentido los agricultores de estas zonas, al no contar con la suficiente cantidad de agua para el riego, realizan una producción anual a secano, la cual depende de la cantidad de precipitación que cae, misma que oscila entre los 200 a 550 mm, no satisfaciendo los requerimientos netos de agua al cultivo, estos factores son desfavorables para una producción adecuada del cultivo de papa, por el hecho de que el rendimiento promedio en Bolivia es muy bajo 5,87 t/ha.

Sin embargo, ante la menor disponibilidad de agua para riego y mayor demanda de producción, ponen a la agricultura bajo riego ante el desafío de producir más con menos agua, es por esto, una de las opciones para emplear más eficientemente el agua de riego e incrementar la productividad es la implementación de estrategias de riegos deficitarios y tecnologías de riego más eficientes, que contribuyan a obtener rendimientos aceptables del cultivo.

Con la finalidad de contribuir el desarrollo de estrategias de riego deficitario que utilicen menores cantidades de agua e incrementar la productividad. El objetivo del trabajo de investigación fue evaluar la programación del riego deficitario controlado en diferentes fases fenológicas del cultivo de papa mediante la utilización de sensores (sonda de capacitancia FDR, cámara de presión y termómetro infrarrojo) en la Estación Experimental de Choquenaira dependiente de la Facultad de Agronomía de la Universidad Mayor de San Andrés, durante la campaña agrícola 2017 – 2018.

La investigación se realizó en campo abierto estableciendo un diseño experimental bloques completamente al azar con arreglo de parcelas divididas, con tres bloques, evaluándose dos factores de estudio: Láminas de riego y Fases fenológicas, constituido el primer factor A por tres niveles y el segundo factor B por cuatro niveles, cuya combinación genera doce tratamientos.

Para la programación de riego se usó la estación automática DAVIS para obtener la evapotranspiración de referencia (ET_o) y en base al coeficiente de cultivo (K_c) se determinó la evapotranspiración del cultivo (ET_c), y entre las variables se evaluó los parámetros agronómicos, eficiencia de uso del agua y análisis de costos parciales en condiciones de riego deficitario controlado.

Los resultados señalan de los 12 tratamientos en estudio al cultivo de papa, el tratamiento T6 obtuvo mayor rendimiento 5,60 kg/m² (56,00 t/ha), número de tubérculos 24 unidades/planta, peso de tubérculos 1.344,91 g/planta y con una eficiencia de uso del agua 13,53 kg/m³ a comparación de otros tratamientos. Además, el tratamiento T6 cumple la estrategia de riego deficitario controlado (RDC), de minimizar los aportes de agua de riego al cultivo sin que influya significativamente en la producción y en la calidad del producto a cosechar, dando a concluir con un estrés hídrico moderado en fase de desarrollo y crecimiento vegetativo, permite obtener un rendimiento aceptable en cultivo de papa.

En cuanto al contenido de la humedad del suelo de los tratamientos se mantuvieron en la zona de agua fácilmente aprovechable (AFA) y determinando el potencial hídrico xilemático en las plantas de hoja durante el periodo del cultivo se observó que no hay diferencias significativas los valores estuvieron en el rango de -0,4 a -0,7 MPa para todos los tratamientos y en cuanto la evaluación de la temperatura de la hoja con respecto a temperatura ambiente no se presentó estrés hídrico, la temperatura de la hoja oscilo de 2,6 a 3,6 °C menos que la temperatura ambiental.

En el análisis de costos parciales, resultaron que todos los tratamientos son rentables económicamente, sin embargo el tratamiento T6 resulto ser más rentable con Bs 2,7.

Palabras claves: Riego deficitario controlado, eficiencia de uso del agua, *S. tuberosum*.

SUMMARY

Potato cultivation (*Solanum tuberosum* L.) in Bolivia is very important and is the main economic income for families. Most of the cultivated areas are found in semi-arid and arid regions of Bolivia, in these areas there are many disadvantages such as: droughts, frosts, scarce rainfall, relatively high evapotranspiration, low soil fertility and there are few sources of water, which are used through surface irrigation systems, flooding, which are not very efficient, because more than 50% of the water is lost from the sources to the cultivation plots, generating greater water losses, resulting in water scarcity. In addition, added to this the incidence of climate change that indicates a reduction in the availability of water in the soil that is evident. In that sense, farmers in these areas, not having enough water for irrigation, make an annual dry land production, which depends on the amount of precipitation that falls, which ranges from 200 to 550 mm, not satisfying the net water requirements of the crop, due to the fact that the average yield in Bolivia is very low 5.87 t/ha.

However, given the lower availability of water for irrigation and increased demand for production, they put agriculture under irrigation in the face of the challenge of producing more with less water, which is why one of the options to use irrigation water more efficiently and increasing productivity is the implementation of more efficient irrigation strategies and irrigation technologies, which contribute to obtaining acceptable crop yields.

In order to contribute to the development of deficit irrigation strategies that use lower amounts of water and increase productivity. The objective of the research work was to evaluate the programming of controlled deficit irrigation in different phenological phases of potato cultivation through the use of sensors (FDR capacitance probe, pressure chamber and infrared thermometer) at the Choquenaira Experimental Station depending on the Faculty of agronomy of the Universidad Mayor de San Andrés, during the agricultural campaign 2017 – 2018.

The investigation was carried out in the open field establishing an experimental design completely randomized blocks arrangement with divided plots, with three blocks, evaluating two study factors: Irrigation sheets and Phenological phases, constituted the first factor A by three levels and the second factor B by four levels, whose combination generates twelve treatments.

For the irrigation programming, the DAVIS automatic station was used to obtain the reference evapotranspiration (ET_o) and based on the crop coefficient (K_c) the crop evapotranspiration (ET_c) was determined, and among the variables the agronomic parameters were evaluated, water use efficiency and partial cost analysis under controlled deficit irrigation conditions.

The results indicate of the 12 treatments under study for potato cultivation, the T6 treatment obtained a higher yield 5.60 kg/m² (56.00 t/ha), number of tubers 24 units/plant, weight of tubers 1,344.91 g/plant and with an efficiency of water use 13.53 kg/m³ compared to other treatments. In addition, the T6 treatment complies with the strategy of controlled deficit irrigation (DRC), of minimizing the contributions of irrigation water to the crop without significantly influencing the production and quality of the product to be harvested, ending with moderate water stress in the development phase and vegetative growth, it allows to obtain an acceptable yield in potato cultivation.

Regarding the soil moisture content of the treatments, they were maintained in the easily usable water zone (AFA) and determining the xylem water potential in the leafy plants during the crop period it was observed that there are no significant differences the values were in the range of -0.4 to -0.7 MPa for all treatments and as soon as the evaluation of the leaf temperature with respect to room temperature no water stress, the leaf temperature oscillated 2.6 at 3.6 °C less than the ambient temperature.

In the partial cost analysis, it turned out that all treatments are economically profitable, however the T6 treatment proved to be more profitable with Bs 2.7.

Keywords: Controlled deficit irrigation, water use efficiency, *S. tuberosum*.

I. INTRODUCCIÓN

La papa (*Solanum tuberosum* L.), es el cultivo de mayor importancia en Bolivia, ya que es un alimento básico en la alimentación humana y es una fuente de ingresos económicos para las familias que se dedican a la producción de este tubérculo. El rendimiento promedio nacional de papa es de 5,87 t/ha (INE- MDRyT, 2017), el cual es relativamente bajo comparado con el rendimiento de otros países.

La mayor parte de las superficies cultivadas de papa se encuentran en regiones semiáridas y áridas de Bolivia, donde se puede apreciar en estas zonas periodos de déficit hídrico, en que la precipitación es menor a la evaporación potencial, con periodos secos que van desde 7 a 10 meses, teniéndose como consecuencia la escasez de agua para riego.

Además, sumado a esto la fuerte incidencia del cambio climático que está afectando la distribución y cantidad de precipitación pluvial, debido a ello la disponibilidad de agua es cada vez más escasa para la agricultura, además el incremento de la temperatura y con ello el incremento de la evapotranspiración que es evidente, por lo que aumentan los riesgos de perder cosechas, y también podrían afectar el rendimiento de los cultivos.

En ese sentido los agricultores de estas zonas, al no contar con la suficiente cantidad de agua para el riego, realizan una producción a secano, la cual depende de la cantidad de precipitación que cae en los meses de noviembre a marzo, misma que oscila entre los 200 a 550 mm, no satisfaciendo los requerimientos netos de agua al cultivo.

Aunque en otras zonas, los agricultores realizan riego para este cultivo por superficie o inundación, estos sistemas de riego son poco eficientes, porque más del 50% del agua se pierde desde las fuentes hasta las parcelas de cultivo y este sistema de riego es el más aplicado en el país.

En los últimos años se viene implementando métodos de riego tecnificado como aspersión y goteo que son las mejores opciones para lograr un uso eficiente del agua, aunque en Bolivia, estas formas de riego son poco utilizadas.

Pese a la implementación de métodos de riego tecnificado, los volúmenes anuales de agua requeridos para un cultivo siguen siendo altos, y puede resultar insuficiente el caudal disponible incluso con eficiencias de aplicación cercanas al 100%, siendo necesario encontrar nuevas estrategias de ahorro de agua.

Sin embargo, ante la menor disponibilidad de agua para riego y mayor demanda de producción, ponen a la agricultura bajo riego ante el desafío de producir más con menos agua, bajo esta realidad una de las opciones para emplear más eficientemente el agua de riego e incrementar la productividad del agua o eficiencia de uso de agua, es la aplicación del Riego Deficitario Controlado (RDC)

El Riego Deficitario Controlado (RDC) es una estrategia de manejo del riego que permite aumentar la eficiencia en el uso de agua del riego. Se basa en la reducción de los aportes hídricos en determinados momentos del ciclo de cultivo, en los que una disminución del agua aportada no afecte a la producción ni a la calidad de la cosecha, cubriendo plenamente la demanda durante el resto del ciclo de cultivo.

Para poder ajustar esta estrategia de riego es interesante disponer de indicadores del estado hídrico del suelo y de la planta durante su aplicación, tales como el contenido de humedad del suelo, potencial hídrico xilemático o temperatura de la hoja, que se han considerado como una nueva herramienta para desarrollar nuevos métodos de programación de riegos que puedan minimizar las incertidumbres en cuanto a la determinación exacta de las exigencias hídricas en cada periodo del cultivo.

Por ello, el presente trabajo de investigación está orientado a obtener producciones aceptables de cultivo de papa para condiciones de altiplano boliviano, mediante la aplicación de programación de Riego Deficitario Controlado en cultivo de papa, basados en la utilización de estación agroclimática automática y sensores (FDR, Termómetro infrarrojo y Cámara de presión) en suelo y planta, que permitirán en la que los aportes hídricos se ajusten a los requerimientos del cultivo, aumentando así la productividad y eficiencia en el uso de agua y como medida resiliente del cambio climático.

Para tal efecto, la presente investigación se planteó los siguientes objetivos:

II. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Evaluar el Riego Deficitario Controlado en diferentes fases fenológicas del cultivo de papa, para un uso racional del agua como estrategia frente al cambio climático.

2.2 Objetivos Específicos

- Evaluar los parámetros agronómicos del cultivo de papa en condiciones de Riego Deficitario Controlado.
- Evaluar la dinámica del agua en el suelo bajo los diferentes tratamientos.
- Evaluar el potencial hídrico xilemático y temperatura de la hoja de la planta en condiciones de Riego Deficitario Controlado.
- Determinar la eficiencia de uso del agua en el cultivo de papa.
- Determinar los costos de producción de los rendimientos obtenidos de los tratamientos.

III. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

3.1 Cultivo de papa

3.1.1 Origen

La papa (*Solanum tuberosum* L.), es originaria de la región andina ubicada entre Bolivia y Perú, donde existe una amplia diversidad de especies silvestres y cultivadas, lo que constituye una fuente genética para futuras generaciones (Canqui y Morales, 2009). Desde este lugar, la papa ha sido llevada a casi todos los países del mundo.

3.1.2 Importancia del cultivo de papa

Es uno de los cultivos de mayor importancia en Bolivia y en el mundo y es consumida a mayor escala y es la principal fuente de ingresos económicos en las zonas andinas del altiplano y valles, donde forma parte central de una gran riqueza culinaria, ya sea en estado fresco o procesado (Canqui y Morales, 2009). Además MDRyT (2008) menciona que es un alimento estratégico para la soberanía alimentaria del país, ya que constituye la base de alimentación de un 80% de la población.

Villafuerte (2008), indica también el follaje de la planta de papa se constituye como una planta forrajera e industrial suministradora de alimento para el ganado y de materia prima para la industria del almidón y del alcohol.

En la actualidad, la papa es el cultivo de raíces y tubérculos más importante del mundo; que se siembra en más de 125 países y más de un billón de personas alrededor del mundo la consumen. Se ha convertido en la mejor fuente de carbohidratos de la dieta de los pobladores de muchos países en desarrollo.

a) Producción de papa en el mundo

La papa es cultivada en 149 países, siendo China, India y Rusia los mayores productores a nivel mundial; en Latinoamérica, Perú es el principal productor, con 4.704.266 t (FAOSTAT, 2017).

Holanda, también es uno de los países que más aprecia la papa y es uno de los productores más eficientes del mundo, llegando a producir en algunos lugares hasta 100 t/ha. Así mismo país Argentina, tiene un buen rendimiento en la producción de papa, alcanzando hasta 70 t/ha.

Hecho que contrasta con el nivel de producción de los países andinos, que en conjunto, no superan los 10 millones de t, siendo la zona de origen de este importante tubérculo y donde para una gran parte de pequeños agricultores sigue siendo un cultivo tradicional.

A pesar de su distribución en muy diferentes condiciones climáticas, extendiéndose desde los 65° Latitud Norte a los 54° Latitud Sur, la mayoría de los cultivares comerciales de papa de alto rendimiento requieren de climas más bien moderadas y alta disponibilidad de agua (Hijmans, 2003).

En Chile, la superficie cultivada de papa durante la temporada 2014/2015, alcanzo las 50.526 ha, mostrando una variación positiva de 3,2% respecto a la temporada anterior (ODEPA, 2015). Algunos datos estadísticos se presentan en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Principales países productores de papas (FAOSTAT, 2017)

Ranking	País	Producción (t)	Rdto. (t/ha)
1	China	95.515.000	16,92
2	India	46.395.000	22,92
3	Federación Rusa	31.501.354	14,99
4	Ucrania	23.693.350	17,65
5	EE. UU.	20.056.500	47,15
6	Alemania	11.607.300	47,42
7	Bangladesh	8.950.000	19,38
8	Francia	8.085.184	47,98
9	Polonia	7.689.180	27,76
10	Países bajos	7.100.258	45,66
11	Belarús	6.279.715	20,39
12	Reino Unido	5.911.000	41,92
13	Irán	4.717.266	29,67
14	Perú	4.704.266	14,77
15	Argelia	4.673.516	29,92
16	Egipto	4.611.065	26,80

b) Producción de papa en Bolivia

En Bolivia, existiendo cerca de 200 mil agricultores, casi todos pequeños productores, donde la superficie total cultivada a nivel Bolivia es de 190.828 ha con una producción 1.119.685,93 t con un rendimiento promedio de 5,87 t/ha (INE-MDRyT, 2017). En Bolivia se cultiva en siete departamentos del país menos en Beni y Pando (SEPA, 2007).

c) Producción de papa en departamento de La Paz

La producción de papa en el departamento de La Paz, la superficie cultivada es de 59.795 ha con una producción de 348.784,24 t llegándose a obtener un rendimiento promedio de 5,83 t/ha (INE-MDRyT, 2017).

3.1.3 Descripción del cultivo de papa

3.1.3.1 Descripción taxonómica

La patata o papa, pertenece a la familia de las solanáceas, del genero *Solanum*, formando por otras mil especies, y su nombre científico es *Solanum tuberosum* L. El *S. tuberosum* se divide en dos subespecies: la *andigena*, adaptada a condiciones de días cortos, cultivada principalmente en los Andes, y *tuberosum*, la variedad que hoy se cultiva en todo el mundo, adaptada a días más largos.

Villafuerte (2008), señala la siguiente descripción taxonómica de la papa

Reino:	<i>Plantae</i>
División:	<i>Magnoliophyta</i>
Clase:	<i>Magnoliopsida</i>
Sub clase:	<i>Asteridae</i>
Orden:	<i>Solanales</i>
Familia:	<i>Solanaceae</i>
Género:	<i>Solanum</i>
Especie:	<i>S. tuberosum</i>
Sub especies:	<i>S. tuberosum</i> ssp. <i>Andigena</i> <i>S. tuberosum</i> ssp. <i>Andigena tuberosum</i>

3.1.3.2 Descripción morfológica

La papa es una planta suculenta, herbácea, dicotiledónea y anual conformada con dos sistemas de tallo: aéreo y subterráneo (Egusquiza, 2000). En la parte aérea presenta varios tallos aéreos, gruesos, carnosos que crecen de 0,5 a 1 m de altura, hojas anchas dispuestas en forma alterna y con folíolos pequeños. Pueden presentar flores terminales que dan como resultado frutos en bayas de 1 a 3 cm, de diámetro con gran cantidad de semilla botánica (Canqui y Morales, 2009).

En la parte subterránea presenta estolones que posteriormente se convierten en tubérculos de diferentes formas, con ojos profundos o superficiales, piel y pulpa de diferentes colores o combinaciones. La raíz se desarrolla en verticilio, en los nudos del tallo principal, siendo su crecimiento inicial vertical dentro de la capa arable, luego horizontal de 15 a 39 cm (Canqui y Morales, 2009).

3.1.3.3 Fases fenológicas de la papa

Según Hanco (2014), distinguen cuatro grandes fases marcadas en el desarrollo fisiológico de la planta de papa.

- **Fase de emergencia:** Abarca el periodo que transcurre entre la siembra hasta que emergen del suelo. La emergencia de la papa inicia a los 30 a 35 días después de la siembra, alcanzando el 100% a los 40 a 45 días. En esta fase existe desarrollo radicular (raicillas), así como tallos cortos desde el tubérculo-semilla que salen a la superficie del suelo.
- **Fase de desarrollo y crecimiento vegetativo:** Periodo entre la emergencia y la iniciación de tuberización de los estolones. En esta etapa o fase hay crecimiento de tallos, desarrollo foliar y una total cobertura al suelo. Esta etapa ocurre a los 20 a 50 días.
- **Fase de tuberización y floración:** Inicia a los 70 a 75 días después de la siembra. La floración es señal de que la planta de papa inicia la tuberización hasta el final de floración o hasta el máximo desarrollo del follaje. En esta etapa hay aumento en el tamaño y peso de los tubérculos, debido a la alta acumulación de los carbohidratos. Esta fase es crítica, es importante garantizar una buena

luminosidad, humedad y disponibilidad de nutrientes en el suelo, ya que determina el rendimiento y calidad del producto.

La floración ocurre normalmente a los 50 a 60 días después de la siembra. El final de floración se presenta a los 90 a 100 días de la siembra.

- **Fase de madurez fisiológica:** Periodo entre el máximo desarrollo del follaje y la senescencia total. Se observa a los 140 a 145 días después de la siembra. En esta fase sigue existiendo el desarrollo de los tubérculos aun después que el follaje comienza a amarillear, alcanzándose el máximo rendimiento en cada planta cuando aproximadamente un 50% de su follaje se encuentra seco.

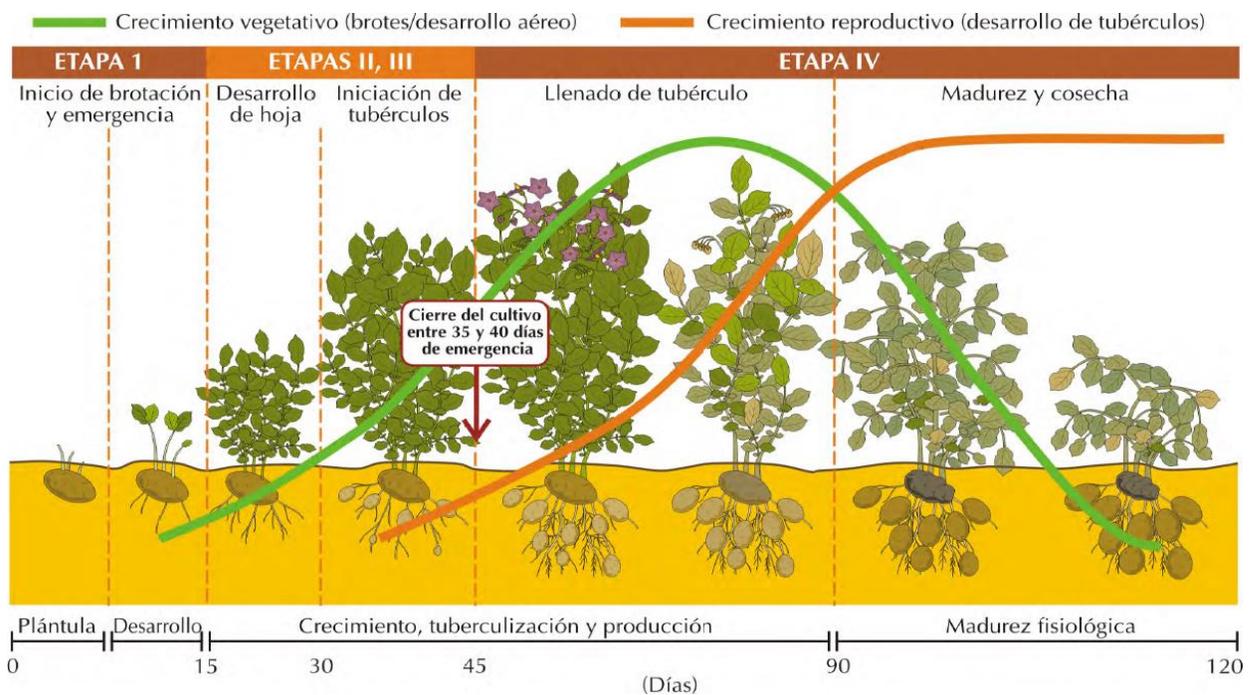


Figura 1. Fenología del cultivo de papa (Pino, 2016)

3.1.3.4 Ciclo vegetativo del cultivo de papa

El ciclo vegetativo del cultivo de la papa puede tener una duración de 3 a 7 meses dependiendo de la variedad, de condiciones climáticas y manejo agronómico (Martínez, 2009).

Según Canqui y Morales (2009), indican que el periodo vegetativo de la papa puede variar según las variedades, 90 días en variedades precoces y 180 días para variedades tardías.

3.1.3.5 Requerimiento edafoclimático del cultivo de la papa

a) Altitud

El cultivo de papa tiene un amplio rango de desarrollo que va desde los 400 hasta los 4500 m.s.n.m.; pero la altitud ideal para un buen desarrollo se encuentra desde los 1500 a 2500 m.s.n.m, claro bajo estas condiciones se da la mejor producción de la papa (Blanco y Leiva, 2010).

b) Temperatura

Según Canqui y Morales (2009), señalan que las temperaturas más favorables para el desarrollo de la planta y producción; están de 15 a 20 °C para el crecimiento de las plantas y de 14 a 18°C para la tuberización, mientras que la temperatura óptima para un mejor producción deben de estar entre 15 – 18°C (Egusquiza, 2000).

La papa es considera una planta termoperiódica, lo que significa que es necesario una variación, entre la temperatura máxima y mínima, de por lo menos 10°C. Si la diferencia es menor, el crecimiento y tuberización se ven afectados. Cuando esta situación se presenta con frecuencia, a lo largo del ciclo vegetativo, el rendimiento y la calidad son afectados, pues las temperaturas máximas son ideales para el crecimiento de tallos y hojas, pero no para la tuberización de los tubérculos (CENTA, 2002).

c) Fotoperiodo

Según Sierra (2005) y MINAGRI (2013), con respecto a la respuesta de la longitud del día o fotoperiodo, indican que para desarrollar su área foliar (follaje) requiere de fotoperiodo largo (más de 14 horas luz) y en su proceso de tuberización (formación y engrosamiento de los tubérculos), de fotoperiodo corto (menor de 14 horas luz). CENTA (2002), menciona que el cultivo de papa se comporta mejor con fotoperiodos entre 8 a 12 horas luz por día.

d) Precipitación

Haverkort (1986), señala que un cultivo de papa requiere en promedio de 600 a 800 milímetros de agua dependiendo de las condiciones climáticas y de la duración del periodo vegetativo, en tanto Jerez *et al.* (2000), manifiesta que las necesidades de agua

de la papa varían de 600 a 700 milímetros; además, menciona que precipitaciones de 40 mm cada 15 días será de gran beneficio al cultivo e inferiores a 10 milímetros no son efectivas para cultivos, ya que estas quedan retenidas en las hojas del cultivo y se evaporan.

Doorembos *et al.* (1986), señala que para lograr rendimientos en variedades de papa cuyo ciclo sea entre 120 y 150 días, los requerimientos hídricos se encuentran entre 500 y 700 mm por ciclo dependiendo de las condiciones climáticas.

Se ha comprobado que el desarrollo de este cultivo es apropiado cuando la precipitación pluvial fluctúa alrededor de 700 mm (Tapia, 1990).

La producción se reduce, si se agota más del 50% del total del agua disponible en el suelo durante el periodo de crecimiento, la etapa más crítica que perjudica al cultivo es durante la formación de tubérculos (FAO, 2008).

e) Suelos

La papa puede crecer y desarrollarse en la mayoría de los suelos, aunque son recomendables suelos con poca resistencia al crecimiento de los tubérculos. Los mejores suelos que prefiere el cultivo son de textura franco, franco-arenoso, de estructura granular, bien drenados, profundos, fértiles, con buen contenido de materia orgánica y pH de ligeramente ácido a neutro entre 5,5 a 7 con un óptimo de 6,5 (Canqui y Morales, 2009).

También CENTA (2002), señala que el cultivo de papa debe contar con un suelo de textura liviana (franco arenoso) con una profundidad efectiva mayor de los 50 cm, que permitan el libre crecimiento de los estolones y tubérculos de la planta.

Los suelos salinos, alcalinos o compactados provocan trastornos en el desarrollo y producción de la papa. Es recomendable tener suelos con una densidad aparente (Dap) de $1,2 \text{ g/cm}^3$, contenido de materia orgánica mayor a 3,5% y una conductividad eléctrica menor a 4 dS/m (CENTA, 2002).

f) Humedad

El cultivo de papa crece mejor cuando la humedad del suelo se mantiene cerca a la capacidad de campo (CC); para obtener altos rendimientos (Montalvo, 1984). Se ha observado que la escasez de agua disminuye el rendimiento, afectando la calidad, debido a la malformación de los tubérculos y al menor crecimiento de las plantas (Cullen y Wilson, 1971).

En cuanto a la humedad excesiva en el momento de la germinación del tubérculo y en el periodo desde la aparición de las flores hasta la maduración del tubérculo resulta perjudicial.

3.1.4 Riego en cultivo de papa

Durante el ciclo de cultivo de papa exige abundante agua, especialmente durante la floración (inicio de tuberización) y la formación de los tubérculos (periodo final de llenado de los tubérculos) que se reconocen dos momentos críticos la falta de agua (Quispe, 2000).

Es necesario facilitar riego al cultivo, proveyendo el agua a la planta en forma racional y no regar ni en forma excesiva o insuficiente. Los riegos siguientes se hacen cada 12 a 15 días hasta floración, luego de la floración, los riegos deben aplicarse cada 8 a 10 días por requerir el cultivo más agua para producir una cosecha, ya que el agua es destinada por la planta en su mayor parte a los tubérculos (Quispe, 2000).

3.1.5 Déficit hídrico

El déficit hídrico se presenta cuando las raíces son incapaces de absorber nutrientes del suelo, por lo que no existe agua disponible para ser transportada hacia el dosel de la planta y luego a la atmosfera, por lo tanto ocurre un desbalance en la planta. Este déficit puede ser ocasionado por diferentes razones según Nilsen y Orcutt (1996), puede ser el resultado de bajas precipitaciones, baja capacidad de retención de agua del suelo, excesiva salinidad, temperaturas extremas, baja presión de vapor atmosférica o una combinación de estos factores.

Según Grosso (2000), el periodo del cultivo de papa más sensible al déficit hídrico se presenta entre el inicio de la estolonización y formación de tubérculos, hasta el desarrollo de la cosecha, los periodos menos sensibles a su vez, corresponden a aquellos de maduración y a su fase inicial.

3.1.6 Estrés hídrico

El estrés hídrico que experimentan las plantas se presenta cuando existe una insuficiencia de agua, se produce debido a las condiciones ambientales ya que estas pueden ocasionar que la captación y el transporte de agua en la planta, sean insuficientes para equilibrarse con las pérdidas por transpiración, cuando este desbalance es severo la planta detiene su crecimiento vegetativo y reproductivo, y ocasiona el engrosamiento y la abscisión de las hojas (Lisar *et al.*, 2012).

Las plantas experimentan estrés hídrico ya sea cuando el suministro de agua a sus raíces es limitado o cuando la tasa de transpiración es intensa. El estrés hídrico es causado principalmente por el déficit de agua, es decir, sequía o alta salinidad del suelo. La sequía no solo afecta a las relaciones hídricas de las plantas a través de la reducción del contenido de agua, la turgencia y total de agua, sino que también afecta el cierre de estomas, limita el intercambio gaseoso, disminuye la transpiración y detiene la tasa de asimilación de carbono (fotosíntesis). Los efectos negativos sobre la nutrición mineral (absorción y el transporte de nutrientes) y el metabolismo conduce a una disminución en el área foliar y la alteración en el reparto de nutrientes entre los órganos (Lisar *et al.*, 2012).

3.1.7 Descripción de la variedad de interés

3.1.7.1 Huaycha (*Solanum tuberosum* ssp. *andigena*)

PROINPA (2009), destaca la variedad huaycha al grupo (*Solanum tuberosum* ssp. *andigenum*), pertenece a las variedades denominadas como “nativas comerciales”, las especies de este grupo son tetraploides ($2n = 4X = 48$), que posee un gran número de variedades, con un amplio rango de variación adaptativa desde los valles mesotermicos 1.800 m.s.n.m. hasta los altiplanos y la puna 3.400 m.s.n.m.

Su periodo vegetativo varia de 5 a 7 meses, puede presentar tubérculos con formas y tamaños muy variados, con ojos ligeramente profundos y con alto contenido de almidón. Es muy productivo, con una rusticidad moderada y es una variedad muy aceptada en el mercado local (Quispe, 2002).

Esta variedad se caracteriza porque tiene un hábito de crecimiento semi-erecto, tallo de color verde con poca pigmentación, color de flor lila con rojo morado, fruto baya globosa de color verde, tubérculo redondo con ojos profundos, la piel es roja con áreas amarillas alrededor de los ojos, madurez tardía de 110 – 170 días (INIAF-MDRyT, 2016).

Así mismo, la variedad huaycha presenta con un peso específico de 1,101 g con materia seca total de 24,3%, almidón de 17,71%, bajo en contenido de glicoalcaloides y excelente para ser consumida como papa hervida y en puré.

Además, la variedad es tolerante al nematodo rosario (*Nacobbus aberrans*) y ligera tolerancia a tizón tardío (*Phytophthora infestans*) (Quispe, 2002).

3.2 Riego

Chipana (2003), indica que el riego es el suministro oportuno de la cantidad de agua a los cultivos de tal manera que estos no sufran disminución en sus rendimientos y sin causar daño al medio ambiente.

Cisneros (2003), indica que consiste en la aplicación artificial del agua al suelo para las plantas puedan satisfacer la demanda de humedad necesaria para su desarrollo.

3.2.1 Riego deficitario

Según Rodríguez *et al.* (2014), mencionan que el riego deficitario es una herramienta alternativa que permite el uso racional del agua aplicada, con el mínimo impacto en la producción.

Según Razuri *et al.* (2008), menciona que el riego deficitario tiene como meta principal maximizar la eficiencia del uso del agua y estabilizar la producción, lo cual es fundamental en lugares con recursos limitados de agua.

El objetivo principal del riego deficitario es aumentar el Uso Eficiente de Agua (UEA) de un cultivo mediante la eliminación de aplicaciones de riego que presentan poco impacto en el rendimiento. La reducción del rendimiento resultante puede ser pequeña en comparación con los beneficios obtenidos con el agua no aplicada (Krida, 2002).

Es una estrategia de optimización de agua en la cual el riego es aplicado durante las etapas de desarrollo de la planta sensibles al estrés hídrico (Zhang y Oweis, 1999), fuera de estos periodos el riego es limitado o puede ser inclusive suspendido si la lluvia garantiza un mínimo suministro de agua al cultivo.

3.2.2 Estrategias de riego deficitario

Se han diseñado varias estrategias de riego deficitario, la elección de una u otra dependerá de varios factores, como el tipo de cultivo, disponibilidad de agua y sistema de riego del que se disponga. A continuación se mencionan la más utilizadas:

- Riego suplementario o complementario
- Riego deficitario de baja frecuencia
- Riego parcial o alternante
- Riego deficitario sostenido (RDS)
- Riego deficitario controlado (RDC)

3.2.2.1 Riego deficitario controlado (RDC)

El riego deficitario controlado, consiste en reducir la cantidad de agua aplicada por debajo del máximo utilizado por el cultivo, permitiendo un estrés moderado con mínimo impacto en los rendimientos (FAO, 2002).

El concepto de riego deficitario controlado RDC (en inglés RDI, controlled deficit irrigation) fue propuesto en un principio por Chalmery y Mitchel en 1942 (Fererres y Soriano 2007), con el fin de mejorar el control del vigor vegetativo en los cultivos con alta densidad de siembra para optimizar el tamaño y calidad del producto como un método económico que no afecte la producción (Goodwind y Boland, 2002).

En la actualidad, el RDC es una estrategia que permite mantener un grado de déficit de agua en los cultivos que reduzca los costos de irrigación y potencialmente incremente el retorno económico. Además de controlar el vigor de las plantas mejora la eficiencia del uso del agua en el cultivo eliminando irrigaciones que tienen poco impacto en la producción y minimiza el consumo de agua y la pérdida de nutrientes por lixiviación (Kirda, 2002).

La estrategia de RDC está basada en el concepto de que el crecimiento vegetativo puede ser limitado por bajos potenciales hídricos de la planta durante periodos particulares, mientras el producto no se vea afectado (Girona *et al.*, 1993).

Entonces podemos decir que el RDC es una estrategia de aplicación de agua que se basa en la idea de reducir los aportes hídricos en aquellos periodos fenológicos en los que un déficit hídrico controlado no afecte sensiblemente a la producción y calidad de la cosecha y de cubrir plenamente la demanda de la planta durante el resto del ciclo de cultivo.

Es muy importante considerar el momento y el nivel de restricción hídrica en relación al objetivo, crecimiento y desarrollo de la planta (Goodwind y Boland, 2002).

El RDC es utilizado en varias partes del mundo en cultivos que pueden resistir el estrés por medio de la profundización de las raíces, permitiendo el acceso al agua del suelo en perfiles más profundos (Kirda, 2002). En algunos casos la aplicación de RDC puede causar una reducción en la producción, sin embargo, resulta beneficioso el ahorro de agua que puede ser destinada a otros cultivos para los cuales es normalmente insuficiente bajo prácticas tradicionales de irrigación (Caspari *et al.*, 1994).

3.2.2.2 Fundamentos del riego deficitario controlado

Según Sánchez y Torrecillas (1995), indican que para la elaboración de estrategias de RDC, deben considerarse aquellos factores como conocimiento de los periodos críticos del cultivo, nivel de coincidencia entre el crecimiento vegetativo y el del fruto, las características del cultivo, el sistema de riego, el clima, el material vegetal y la resistencia a la sequía.

3.2.3 Eficiencia de Uso del Agua (EUA)

Pino (2016), menciona que la eficiencia del uso del agua EUA o WUE (por su sigla en inglés, Water Use Efficiency) se refiere a la cantidad de agua requerida para producir 1 kilogramo de materia seca de producto (rendimiento). Sin embargo, EUA no siempre está bien correlacionado con rendimiento (Tuberosa, 2012).

En papa, la EUA se ha reportado frecuentemente como el rendimiento de tubérculos obtenido por unidad de agua consumida; ya sea, como agua aplicada en m³, o como unidad de agua transpirada (Camargo *et al.*, 2015).

EUA también puede ser referida como rendimiento en base a transpiración (Transpiración/Eficiencia de Transpiración) o a evapotranspiración (ET), a nivel de hoja o de cultivo y en base a intercambio gaseoso (Camargo *et al.*, 2015).

Medrano *et al.* (2007), indican que la eficiencia en el uso del agua de la plantas dependerá de dos tipos de factores: en primer lugar, de aquellas características propias de la especie y variedad que tenga relación con la optimización de los procesos de asimilación de carbono y la evapotranspiración de agua; y en segundo lugar, de las características del ambiente en el que crece y se desarrolla la planta.

Estudios realizados por Camacho (2004), reporta que la eficiencia en el uso, es la cantidad en volumen de agua o consumida para sintetizar un kilogramo de materia seca, esta relación expresa las pérdidas que ocurren desde la fuente de agua hasta las plantas, generalmente se expresa en porcentajes. Este concepto incluye cualquier medida que reduzca la cantidad de agua que se utiliza por unidad de cualquier actividad, y que favorezca el mantenimiento o mejoramiento de la calidad de agua. Así mismo está relacionado con otros conceptos básicos del manejo actual de recursos ambientales y en muchos casos, forma parte integral de ellos. De los cuales el más arraigado es el de la conservación del agua.

El uso eficiente del agua es cualquier reducción o prevención de pérdida del agua que sea de beneficio para la sociedad. La definición de conservación sugiere que las medidas de eficiencia deben tener sentido social y económico, además de reducir el

uso del vital líquido por unidad de actividad. Por último, el uso eficiente del agua es básico para el desarrollo sostenible y para asegurar que haya suficiente recursos para generaciones futuras.

La comprensión de los procesos fisiológicos que determinan los flujos de agua en las plantas permite plantear la cuestión de la eficiencia en el uso del agua como un problema de control de gastos (agua), respecto de los ingresos en que, en primer lugar hay que tener en cuenta las variaciones de la disponibilidad y de la necesidad de agua.

La disponibilidad de agua en el suelo depende de los ingresos (lluvia, nieve, corrientes subterráneas, riego), de la capacidad de almacenamiento del suelo (proporción de elementos grueso, potencia y porosidad del suelo) y de la densidad y profundidad del sistema radicular de la planta, que determina el volumen de suelo utilizado respecto del total. Así, la extensión del sistema radicular es un factor determinante de la disponibilidad real de agua, es decir el depósito de reserva (Medrano, 2007).

La importancia del uso eficiente del agua (UEA) obviamente varía de región en región, y de época en época, geográficamente, por ejemplo, la disponibilidad del agua condiciona la manera en que evolucionan los patrones de uso. En igualdad de condiciones, las regiones áridas y semiáridas requieren una mayor cantidad de agua que las regiones húmedas. Las condiciones económicas muchas veces aumentan o reducen la eficiencia en el uso del recurso (Aranda, 2000).

3.2.4 Productividad del agua

La productividad del agua se define como un índice de evaluación de la productividad en relación con el agua aplicada por medio de aguas subterráneas, precipitación o riego, que es otra cosa más que, la relación entre el volumen de alimentos producidos con respecto al agua utilizada. Para conocer la función de productividad del agua, se deben tener en cuenta diversos parámetros que influyen directamente en el cultivo, como variedad, tipo de suelo a manejar, condiciones climáticas y la disponibilidad del agua (Kijne *et al.*, 2003; mencionado por Guzmán, 2010).

González *et al.* (2010), indican que la productividad del agua en los cultivos definen como la cosecha producida por unidad de agua consumida en la producción (t/m³ o

kg/m³). El numerador puede ser expresado en términos de rendimiento del cultivo, mientras que en el denominador puede usarse la transpiración, la evapotranspiración, el agua aplicada o agua total entre otros. La mitigación de los impactos de la sequía y el incremento de la productividad del agua puede jugar un rol sustancial en regiones semiáridas.

3.3 Programación de riego

Fernández *et al.* (2012), indican que la programación de riego es un conjunto de procedimientos técnicos desarrollados para predecir cuándo y cuánto riego aplicar para cubrir las necesidades del cultivos, sin afectar los rendimientos.

También los mismos autores indican que la programación del riego se puede realizar a partir de medidas del contenido de agua en el suelo, medidas del estado hídrico de la planta o partir de datos climáticos. En este sentido García (2008), indica que las medidas mencionadas pueden ser combinatorias (suelo-planta-atmosfera), para una correcta programación de riego.

3.3.1 Métodos para programación de riegos

Siguiendo esta tendencia se han desarrollado distintos métodos para programar los riegos, los cuales pueden agruparse en tres categorías: parámetros climáticos, medidas de humedad del suelo y medidas de estrés hídrico de las plantas (FAO, 1989).

3.3.1.1 Programación de riego en base de parámetros climáticos

En la actualidad el método más utilizado para la programación del riego de los cultivos se lleva a cabo siguiendo las recomendaciones de la FAO (Allen *et al.*, 1998), estimando las necesidades hídricas mediante un procedimiento que tiene en cuenta: variables climáticas que influyen en la demanda evaporativa o evapotranspiración de referencia (ET_o) y un factor ligado al cultivo, denominado coeficiente del cultivo (K_c). Las necesidades hídricas o evapotranspiración del cultivo (ET_c) se calculan como:

$$ET_c = ET_o * K_c \quad (01)$$

Dónde:

ET_c: Evapotranspiración del cultivo

ET_o: Evapotranspiración de referencia del cultivo

K_c: Coeficiente del cultivo

Los datos climáticos deben proceder de estaciones agrometeorológica localizadas en área cultivada donde los instrumentos se exponen a condiciones atmosféricas similares a las de los cultivos circundantes. Además, el método de FAO Penman – Monteith se recomienda como el único método estándar para la definición y el cálculo de la evapotranspiración de referencia, dicho método requiere de datos de radiación, temperatura del aire, humedad atmosférica y velocidad del viento (Allen *et al.*, 2006).

3.3.1.2 Programación de riego en base a estado hídrico del suelo

La medida del contenido de humedad en el suelo, se puede emplearse en la programación de riego utilizando distintos métodos directos e indirectos (Cadahia, 2005).

El método directo por excelencia es el método gravimétrico, que en general es el más usado, por ser uno de los más exactos (Gardner, 2006); sin embargo, es destructivo, laborioso y no permite registrar datos en tiempo real. Este método consiste en sacar muestras de suelo para luego pesarlas y secarlas en una mufla a 105 a 110 °C por 48 horas y posteriormente volverlas a pesar (Valverde, 1998 y Tarjuelo, 1999), para calibrar los métodos indirectos Villalobos (2009), manifiesta que se utiliza el método gravimétrico para cotejar y luego calibrar.

En los últimos años y en la actualidad se está dando el uso de sensores electromagnéticos (TDR, FDR y sondas-C), resistencia eléctrica (Watermark R), sondas de neutrones, tensiómetros (Choi *et al.*, 2015), han aumentado considerablemente el uso de estos métodos indirectos en la comunidad científica como en el sector agrícola.

Estos sensores presentan enormes ventajas con respecto al método gravimétrico tradicional, que por ejemplo que muchos de ellos permiten manejar el riego de manera automática, ya que se pueden conectar a un PC, desde el cual, con el software correspondiente, se visualiza y analiza fácilmente la tendencia del contenido de agua del suelo y se registran datos en tiempo real que ayudan a decidir cuándo y cuánto regar (Bonet *et al.*, 2010). A la hora de elegir cualquiera de estos métodos se debe tener en cuenta la textura, estructura y contenido de materia orgánica del suelo, distribución y densidad relativa de las raíces en el perfil del suelo, tipo de cultivo y método de riego, entre otros factores (Ortuño *et al.*, 2010).

- **Sensores que miden el contenido volumétrico del agua en suelo**

Del grupo que miden la humedad volumétrica del suelo (θ_v) los más adecuados para sistemas de cultivo son los sensores dieléctricos (Thompson y Gallardo, 2003). Hay dos tipos: TDR (Time Domain Refractometry) y FDR (Frequency Domain Refractometry). Los sensores TDR, compuestos por barras de acero inoxidable de > 10 cm, se usan bastante en investigación. Los sensores de capacitancia o FDR, además de investigación se usan para el manejo de riego en aplicaciones comerciales. Los sensores de capacitancia o FDR se comercializan en varias configuraciones, por ejemplo barras o anillos en varias profundidades (Thompson y Gallardo, 2003).

El sensor de capacitancia más usado para el manejo del riego es el EviroSCAN (Sentek Technologies, Australia) que consiste en varios sensores tipo anillo montado verticalmente en una sonda a varias profundidades. Este equipo registra continuos de humedad dando información detallada sobre la dinámica del agua en el suelo tanto en la zona radicular como por debajo. El EviroSCAN es relativamente caro y sensible donde se maneja en la salinidad para aumentar la calidad del fruto.

- **Sonda FDR (Reflectometría en el dominio de frecuencias)**

Se conoce como técnica de capacitancia, se basa en la medición de la constante dieléctrica, midiendo el tiempo de carga de un condensador que utiliza el suelo como medio dieléctrico (Wacker, 2002). La constante dieléctrica se determina a partir del tiempo de tránsito de una señal electromagnética a lo largo de una sonda metálica

introducida en el suelo. Este tipo de sondas permiten la obtención de un registro de datos continuos a lo largo de todo el perfil del suelo, ofreciendo medidas que pueden ser precisas si se ha realizado una previa y correcta calibración, para el suelo en estudio (Cuevas y Osorio, 2004).

La diferencia de la sonda FDR con la TDR consiste en que la técnica FDR mide el tiempo de carga de un condensador en función de la constante dieléctrica del suelo que rodea el condensador, y la técnica TDR determina la constante dieléctrica de un medio, midiendo el tiempo que demora una onda electromagnética en propagarse por una línea de transmisión, y este tiempo es función de la constante dieléctrica del medio que rodea la línea de transmisión (Zúñiga, 2004).

Este sensor o sonda de capacitancia de humedad en el suelo mide: la humedad volumétrica del suelo (θ_v) o el potencial matricial del suelo (Ψ_m). La humedad volumétrica es la proporción del volumen de suelo ocupado por agua. El potencial matricial del suelo indica la disponibilidad de agua para los cultivos (Gallardo y Thompson, 2003). La humedad volumétrica es una medida que necesita interpretación (Gallardo y Thompson, 2003).

Los sensores de suelo pueden ser de lectura manual o automática, lo cual permite obtener información más detallada de la dinámica de uso del agua por el cultivo y su movimiento en el suelo. Los sensores de suelo se pueden usar con distintas configuraciones (Gallardo y Thompson, 2003); un sensor debe estar siempre en la zona de máxima concentración de raíces. Se pueden colocar más sensores en profundidades diferentes por ejemplo debajo de las raíces para controlar drenaje.

El manejo del riego con sensores se basa en mantener la humedad del suelo entre dos límites, uno inferior que indica los valores más secos del suelo cuando se debe iniciar el riego y un límite superior que indica los valores más húmedos que se permiten. La diferencia entre los dos límites es una indicación del volumen de riego requerido.

3.3.1.3 Programación de riego en base a estado hídrico del cultivo

Al respecto Martínez (2010), indica que son muy útiles al momento de realizar la programación de los riegos sin embargo no son adecuados para determinar la cantidad

de agua que hay que aportar al cultivo, es por ello que se han propuesto distintos tipos de medidas; como menciona Villalobos (2009), con el fin de caracterizar el estado hídrico de la planta con el fin de tomar decisiones relativas para el manejo del riego.

Para determinar el estado hídrico del cultivo Fernández *et al.* (2001), describen que los métodos utilizados miden directamente las pérdidas de agua de un fragmento o de la planta entera o de un grupo de plantas, como también miden características relevantes del cultivo que facilitan la estimación de la transpiración.

García (2008), menciona los métodos para la determinación del estado hídrico del cultivo son estipulados mediante la temperatura de la cubierta vegetal, mediante la conductancia estomática, flujo de savia, cavitación y dendrometría.

Para medir el potencial hídrico de la planta existen diferentes métodos que son directos e indirectos, entre los directos están, psicrometría de termopar, el potencial hídrico xilemático y entre los métodos indirectos están el método de la temperatura cubierta, la conductancia estomática y el flujo de savia

- **Metodologías para evaluar el estado hídrico de una planta**

Una de las metodologías más usadas para evaluar el estado hídrico de una planta, es el potencial hídrico xilemático (PHx), que puede ser determinado al alba y al medio día (Acevedo-Opazo *et al.*, 2010). Este parámetro biofísico es adecuado para establecer niveles de estrés hídrico y determinar necesidades de riego en cultivos (Naor, 2001).

El potencial hídrico xilemático (PHx) medido al medio día ha sido propuesto como un indicador estándar para determinar el estado hídrico de la planta, dado que en este momento del día presenta un estrés severo, representativo del estado crítico del continuo suelo-planta-atmósfera (Shackel *et al.*, 1997; Naor, 2001; Ferreyra *et al.*, 2003; Best *et al.*, 2009; Acevedo-Opazo *et al.*, 2010). Así, se han empleado los potenciales de hoja y xilemático, los cuales han sido los parámetros de planta más extensamente utilizados para la programación del riego en cultivos y existen variados estándares relacionado a esta variable fisiológica.

Esta medición es posible de realizar a través del uso de una cámara de presión o bomba de presión (Scholander, 1964). Particularmente en el caso de la medición del

potencial hídrico xilemático (PHx), se presenta como un excelente indicador del status hídrico.

- **Cámara de presión o Scholander**

La Cámara de presión tipo Scholander, es una herramienta más usada para medir potencial hídrico en la hoja o xilemático e indirectamente determina el estado hídrico de la planta. Consta de una cámara de presión, un manómetro, una válvula reguladora de presión y un estanque que almacena nitrógeno gaseoso (Sepor, 2009). Recientes avances científicos han permitido su incorporación a la programación del riego en cultivos como frutales.

La información obtenida de la bomba tipo Scholander puede ser utilizada para corregir programas de riego, aumentando o disminuyendo los tiempos y las frecuencias de riego y para definir los niveles máximos de estrés a lo cual se pueden llevar las plantas para algún manejo específico (Selles *et al.*, 2002).

- **Termómetro infrarrojo**

La termometría infrarroja es una herramienta técnica para detectar el estrés hídrico a partir de las mediciones de la temperatura superficial de la parte aérea del cultivo (Idso y Clawson, 1986). Con la finalidad de conocer la relación de la diferencia entre la temperatura foliar y la temperatura del aire.

El uso de la diferencia entre temperatura foliar y el aire para detectar estrés hídrico en las plantas está basada en dos asunciones, primero, un cultivo bien irrigado transpira a su potencial máximo, resultando que la temperatura de la hoja sea más baja que la temperatura del aire, segundo, a medida que el déficit aumenta, la transpiración declina y la temperatura de la hoja aumenta relativamente a la temperatura del aire (Preston *et al.*, 1992).

Sin embargo, para obtener mediciones confiables de la termometría infrarroja del dosel, las mediciones se deben practicar sobre cultivos con cobertura completa, en condición de cielo despejado y relativamente sin viento (Turner, 1997). En virtud de estas dificultades y para obtener datos confiables de la condición de humedad, es habitual

confirmarlos con información complementaria como el contenido de agua del suelo (De la Casa *et al.*, 2003) o el potencial agua de la planta (Stark y Wright, 1985).

Su empleo ha sido estudiado por mucho a los efectos de programar la reposición oportuna del agua de riego o estimar la pérdida de productividad de un cultivo (Idso y Clawson, 1986; da Silva *et al.*, 1995).

Ya que mediante la transpiración se produce un descenso de la temperatura foliar con respecto a la del aire; por el contrario bajo un déficit hídrico los estomas se cierran produciéndose un aumento de la temperatura foliar que puede ser detectado con la termometría infrarroja (Gates, 1968).

3.4 Procesos de la evapotranspiración

3.4.1 Evaporación

La evaporación es el proceso por el cual el agua líquida se convierte en vapor de agua (vaporización) y se retira de la superficie evaporante (remoción de vapor). El agua se evapora de una variedad de superficies, tales como lagos, ríos, caminos, suelos y la vegetación mojada (Allen *et al.* 2006), para Garay (2009), la evaporación también se le conoce como el agua evaporada por la superficie de las hojas de las plantas.

Según Bidegain (2017), indica que la evaporación es un proceso físico en el cual el agua en estado líquido o sólido pasa a vapor, se produce desde superficie del suelo, vegetación, superficie de agua (ríos, lagos, etc).

3.4.2 Transpiración

La transpiración consiste en la vaporización del agua líquida contenida en los tejidos de la planta y su posterior remoción hacia la atmósfera. Los cultivos pierden agua predominantemente a través de las estomas. Estos son pequeñas aberturas en la hoja de la planta a través de las cuales atraviesan los gases y el vapor de agua de la planta hacia la atmósfera (Allen *et al.* 2006).

Según Bidegain (2017), la transpiración es un proceso biológico por el cual las plantas pierden agua a la atmósfera

3.4.3 Evapotranspiración (ET)

La evapotranspiración se expresa normalmente en milímetros (mm) por unidad de tiempo. Se conoce como evapotranspiración (ET) la combinación de dos procesos separados por los que el agua se pierde a través de la superficie del suelo por evaporación y por otra parte mediante transpiración del cultivo. En el momento de la siembra, casi el 100% de la ET ocurre en forma de evaporación, mientras que cuando la cobertura vegetal es completa, más del 90% de la ET ocurre como transpiración (Allen *et al.*, 2006).

3.4.3.1 Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o)

Es la tasa de evapotranspiración de una superficie de referencia, que ocurre sin restricciones de agua, se conoce como evapotranspiración del cultivo de referencia y se denomina (ET_o). El concepto de evapotranspiración de referencia se introdujo para estudiar la demanda de evapotranspiración de la atmósfera, independientemente del tipo y desarrollo del cultivo y de las prácticas de manejo. Los únicos factores que afectan a ET_o son los parámetros climáticos. Por lo tanto, ET_o es también un parámetro climático que puede ser calculado a partir de datos meteorológicos, sin considerar las características del cultivo, ni los factores del suelo (Allen *et al.*, 2006).

La ET_o se define como la tasa de evapotranspiración de una cubierta vegetal de referencia en óptimas condiciones de crecimiento y bajo suministro adecuado de agua; para lo cual se asume, una altura de 0,12 m, una resistencia de superficie constante de 70 ms^{-1} y un albedo de 0,23 (FAO, 2006).

Su determinación se realiza a partir de datos climáticos, empleando diferentes fórmulas empíricas, cuya elección para el cálculo depende básicamente del tipo de datos climáticos disponibles en la zona. Las fórmulas más utilizadas en diferentes regiones son las de Penman- Montheith, Hargraves, Blaney-Cridde, entre otras, las cuales han sido calibradas localmente en algunos sitios (SNET, 2005).

3.4.3.2 Evapotranspiración del cultivo (ETc)

Según Allen *et al.* (2006), la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ETc), se refiere a la evapotranspiración de cualquier cultivo cuando se encuentra libre de enfermedades, con buena fertilización y que se desarrolla en parcelas amplias, bajo óptimas condiciones de suelo y agua, y que alcanza la máxima producción de acuerdo a las condiciones climáticas reinantes. Entonces indica que la evapotranspiración del cultivo se refiere a la cantidad de agua perdida a través de la evapotranspiración.

La determinación de la evapotranspiración del cultivo (ETc) puede ser calculado a partir de los valores de ETo, que multiplicados por el Kc de cultivo se determina la evapotranspiración del cultivo (ETc).

3.4.3.3 Coeficiente del cultivo (Kc)

El valor del coeficiente del cultivo depende de las características de la planta y su fase de desarrollo, y expresa la variación de su capacidad para extraer agua del suelo durante su periodo vegetativo. Esta variación es más evidente en cultivos anuales, que cubren todo su ciclo en un periodo reducido de tiempo.

Según Fuentes (2003) y FAO (2006), en los cultivos anuales hay que distinguir cuatro etapas en su periodo vegetativo:

- **Primera etapa: etapa inicial o de establecimiento del cultivo**, abarca desde la fecha de siembra o plantación hasta que el cultivo alcanza aproximadamente el 10% de cobertura del suelo, durante este periodo inicial el área foliar es pequeña y la evapotranspiración ocurre principalmente como evaporación del suelo.
- **Segunda etapa: etapa de desarrollo del cultivo o de rápido desarrollo del cultivo**, abarca desde el momento en que la cobertura del suelo es de un 10% hasta el momento de alcanzar la cobertura efectiva completa (inicio de floración).
- **Tercera etapa: etapa de mediados del periodo o de máxima evapotranspiración**, abarca desde la cobertura completa hasta el comienzo de la madurez fisiológica del cultivo, que se manifiesta por el envejecimiento,

amarillamiento o senescencia de las hojas. Esta etapa representa la etapa más larga para cultivos anuales.

- **Cuarta etapa: etapa final o de maduración y cosecha**, abarca desde el comienzo de la madurez fisiológica (que se manifiesta por una marcada disminución en el consumo de agua) hasta el momento de la cosecha o la completa senescencia (caída de las hojas).

Durante el periodo de crecimiento del cultivo, la variación del coeficiente del cultivo K_c expresa los cambios en la vegetación y en el grado de cobertura del suelo. Esta variación del coeficiente K_c a lo largo del crecimiento del cultivo está representada por la curva del coeficiente del cultivo. Para describir y construir la curva del coeficiente del cultivo se necesitan solamente tres valores de K_c : los correspondientes a la etapa inicial (K_c ini), la etapa de mediados de temporada (K_c med) y la etapa final (K_c fin) (FAO, 2006).

3.4.4 Precipitación

La precipitación es la fuente primaria de agua en la producción agrícola y la cantidad y frecuencia de esta es determinante para programar la aplicación del riego, sin embargo, no toda el agua de lluvia que cae sobre la superficie del suelo puede ser aprovechada por las plantas ya que parte de ella fluye como escorrentía superficial o se percola a mayor profundidad que la zona de raíces. El agua que puede ser almacenada en el suelo y es aprovechada por las plantas se llama precipitación efectiva (P_e) y es determinada por la textura y estructura del suelo, el clima y la profundidad de la zona de raíces (Brouwer *et al.*, 1986).

3.4.4.1 Precipitación efectiva (P_e)

Según Chipana (2003), del total de precipitación pluvial que ocurre en un determinado periodo de tiempo, solo una parte es aprovechada por la planta, mientras que el restante se pierde por escorrentía superficial, percolación profunda y por evaporación desde el suelo o follaje de las plantas; por tanto, la precipitación efectiva es aquella parte de la lluvia que tras llegar al suelo se almacena en la capa radicular.

3.5 Contenido de agua en el suelo

3.5.1 Capacidad de Campo (CC)

De acuerdo con Tarjuelo (1999), Fuentes (1999) y Cadahia (2005), el concepto de capacidad de campo, es cuando el suelo está completamente humedecido o saturado, al cual, se deja drenar libremente durante dos o tres días, con la finalidad de eliminar por acción de la gravedad, el sobrante de agua, se dice entonces que el suelo se encuentra a la capacidad de campo.

3.5.2 Punto de Marchitez Permanente (PMP)

Según Pizarro (1987), el punto de marchitez permanente se caracteriza, cuando el contenido de humedad del suelo no está disponible para las plantas; a medida que va quedando menos agua, esta es retenida por el suelo con más fuerza, hasta que llega un momento en que la succión de las plantas no pueden vencer la fuerza de retención del agua, y las plantas se marchitan irreversiblemente, ahí es cuando se dice que ha alcanzado el punto de marchitez permanente (Fuentes, 1999).

3.5.3 Humedad aprovechable o disponible

De acuerdo a Fuentes (1999), el agua disponible es el agua que puede ser absorbida por las plantas.

Y según Olarte (2003), el agua disponible para las plantas es el agua comprendida entre la capacidad de campo (CC) y el punto de marchitamiento (PMP).

IV. LOCALIZACIÓN

4.1 Ubicación

El presente trabajo de investigación se realizó en los terrenos de la Estación Experimental de Choquenaira, dependiente de la Facultad de Agronomía-Universidad Mayor de San Andrés, durante la campaña agrícola 2017 a 2018.

La Estación Experimental de Choquenaira, se encuentra ubicado en la Comunidad Choquenaira, a 5 km de la ciudad de Viacha, Provincia Ingavi del Departamento de La Paz, a una altitud de 3.870 m.s.n.m. Geográficamente se ubica entre los paralelos 16°41'39" Latitud Sur y 68°17'14" Longitud Oeste.

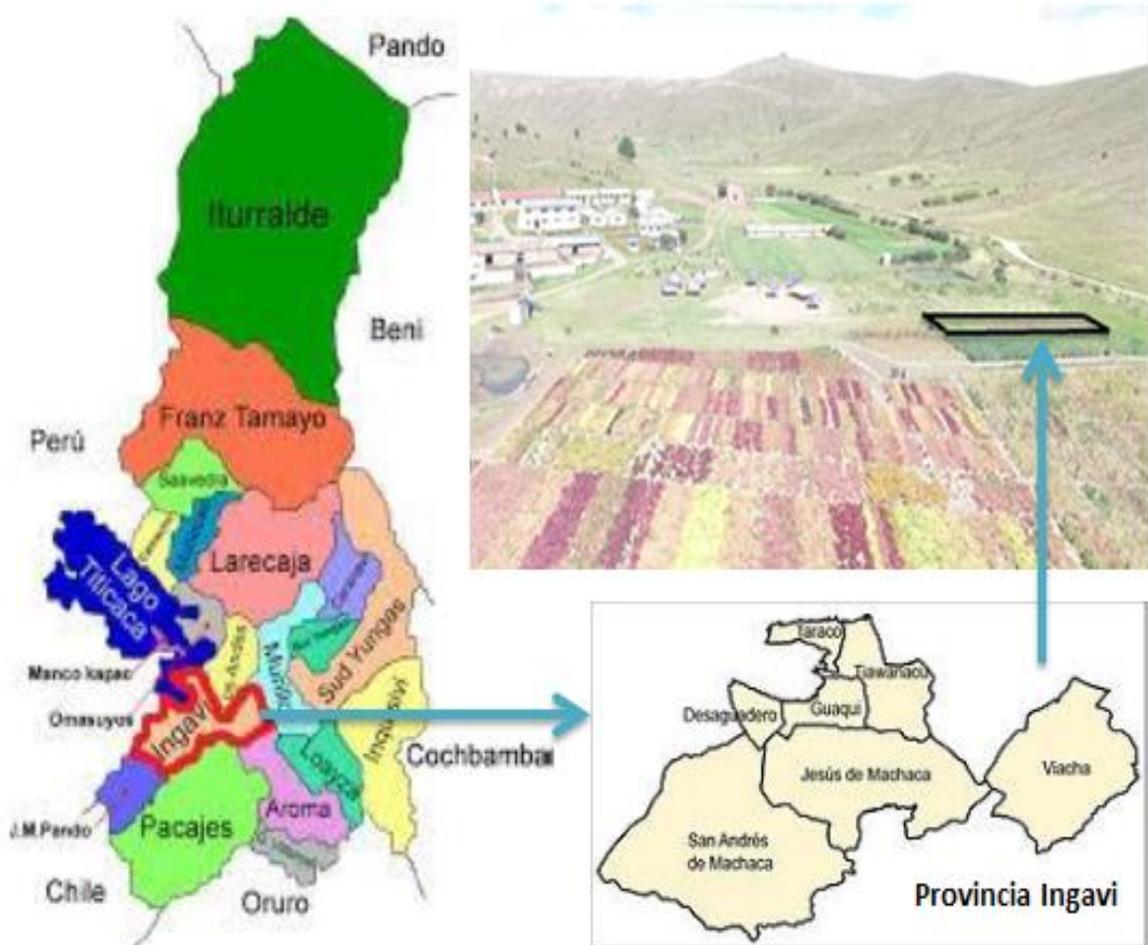


Figura 2. Ubicación del área de estudio, en Estación Experimental de Choquenaira

4.2 Características climáticas de la zona

La Estación Experimental de Choquenaira, se encuentra en el altiplano boliviano y posee un clima frío y seco la mayor parte del año con una estación lluviosa entre diciembre a febrero. Según Mamani y Céspedes (2012), la estación presenta las siguientes características climáticas:

- Precipitación pluvial media anual 485 mm
- Temperatura media anual 7,79 °C
- Temperatura mínima absoluta 1,95 °C
- Temperatura máxima absoluta 13,63 °C
- Humedad relativa media anual 65,19 %
- Velocidad de viento 6,89 km/h

4.3 Condiciones climáticas durante la investigación

Las condiciones climáticas que se produjeron durante el periodo octubre/2017 a marzo/2018 en el que se desarrolló la investigación. Con base a la información obtenida de la estación climático DAVIS se presenta los siguientes parámetros climáticos:

4.3.1 Precipitación (PP) y evapotranspiración de referencia (ET_o)

En la Figura 3, se muestra el análisis de la precipitación pluvial (PP) mensual, ocurrida durante el ciclo vegetativo del cultivo de papa de mes octubre de 2017 a marzo de 2018, donde alcanzo un total precipitación acumulada de 436,00 mm.

Además se observa en la figura la menor precipitación se registró en el mes de noviembre con 24,9 mm y la máxima precipitación en el mes de febrero 120,2 mm. Siendo los meses más lluviosos enero y febrero respectivamente, no fue favorable por que se llegaron a saturar el suelo dando lugar al escurrimiento superficial, para ello se realizó el drenaje en la parcela.

Al respecto, según FAO (2008), señala que la cantidad ideal para una producción adecuada del cultivo de papa está entre los 500 a 700 mm de precipitación distribuidas

durante su periodo vegetativo, de acuerdo a las condiciones climáticas y de la duración del cultivo.

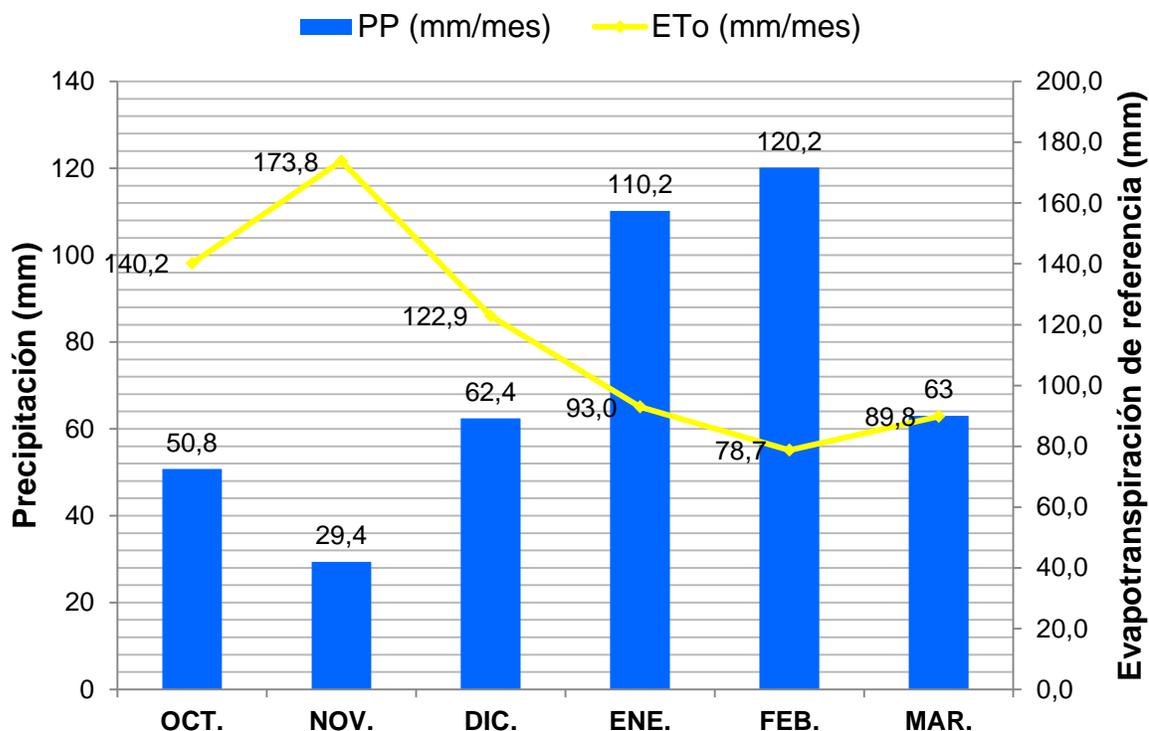


Figura 3. Precipitación (PP) y evapotranspiración de referencia (ETo)

Del mismo modo se observa en la Figura 3, la evapotranspiración de referencia, donde la máxima evapotranspiración se presentó en mes noviembre 173,8 mm y la mínima en mes de febrero 78,7 mm. Los meses octubre, noviembre, diciembre y marzo la evapotranspiración de referencia es superior a la precipitación, esto indica que existe un déficit hídrico, mientras los meses enero y febrero es menor la evapotranspiración y con mayor precipitación.

4.3.2 Temperatura ambiente durante el periodo de cultivo

En la Figura 4, la temperatura ambiente durante el periodo de cultivo de papa, como temperatura promedio se tuvo 10,1 °C, con una temperatura mínima de 3,6 °C y temperatura máxima 16,6 °C. Al respecto Alvarado (1986), menciona que la

temperatura media óptima para el desarrollo y fotosíntesis del cultivo esta entre 10 a 20 °C, la cual es relativamente aceptable para el desarrollo del cultivo de papa.

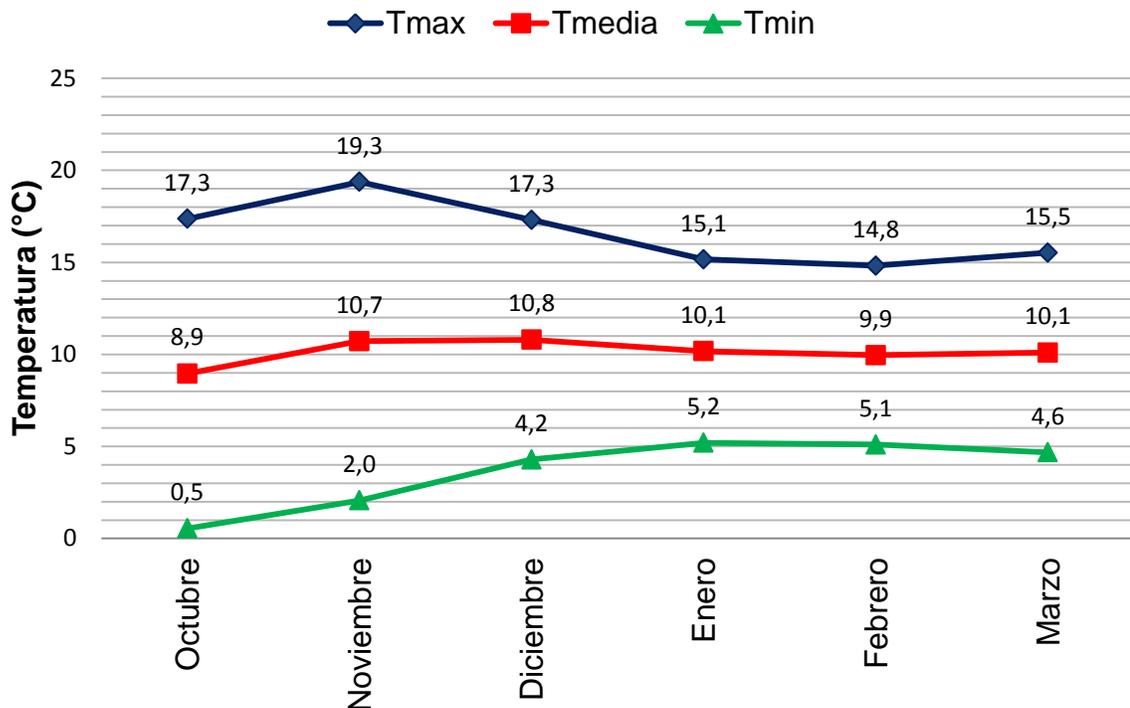


Figura 4. Temperatura ambiente durante el periodo de cultivo de papa

Según Canqui y Morales (2009), las temperaturas ideales se sitúan en el rango de 15 a 20°C para el crecimiento de las plantas y de 14 a 18 °C para la tuberización. La variedad huaycha presenta resistencia a temperaturas bajas de 5 a 6 °C bajo cero, cuando el descenso de la temperatura es lento; en cambio, si este descenso es rápido provoca la muerte de las plantas a los 2 °C bajo cero.

Por otro lado las temperaturas bajas en exceso afectan principalmente al cultivo de papa ya que los tubérculos quedan pequeños y sin desarrollar, por el contrario si la temperatura es elevada afecta a la formación de los tubérculos y favorece al desarrollo de plagas y enfermedades (INFOAGRO, 2008).

4.4 Características del agua y suelo utilizado en la investigación

4.4.1 Características del agua

La fuente principal del agua de la Estación Experimental de Choquenaira, es de origen subterránea y de pequeños manantiales, las precipitaciones pluviales son las encargadas de la recarga de los acuíferos (Mamani y Céspedes, 2012); cuyas aguas son bombeadas a través de una red de tubería al reservorio de agua para luego ser utilizadas en las parcelas. En el presente trabajo de investigación se utilizó agua del reservorio para el riego de papa y cuyo análisis físico químico fue realizado en el laboratorio del Instituto Boliviano de Ciencia y Tecnología Nuclear (IBTEN); los resultados del mismo se muestra en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Análisis químico del agua

pH	CE ds/m	Na mg/l	Ca mg/l	Mg mg/l	K mg/l	Cl mg/l	C mg/l	BC mg/l	S mg/l	SS mg/l	ST mg/l	SD mg/l	B mg/l
9,6	0,303	31,68	16,68	4,77	9,20	11,28	43,36	0,0	35,52	9,0	125,05	115,65	0,11

CE = Conductividad eléctrica, Cl = Cloruros, C = Carbonatos, CB = Bicarbonatos, S = Sulfatos, SS = Sólidos Suspendidos, ST = Sólidos Totales, SD = Sólidos Disueltos

Según el Cuadro 2, la Relación de absorción de sodio (RAS) es 1,76 de acuerdo a los cálculos de los siguientes elementos: Na con un valor de 31,68 mg/l, el Ca con un 16,68 mg/l y Mg de 4,77 mg/l de Mg. De acuerdo al FAO (1977), el RAS se clasifica en clase 1 (S1) agua con baja concentración de sodio, que puede ser usada para el riego de la mayoría de los cultivos y la mayoría de los suelos, con poca probabilidad de ocasionar salinidad y con pequeñas posibilidades de alcanzar niveles peligrosos de sodio, que se encuentra entre los parámetros considerados normales (0-15).

Además en el Cuadro 2, observamos que la Conductividad Eléctrica (C.E.) es 0,303 dS/m, de acuerdo a su clasificación corresponde a la clase 2 (C2), agua de salinidad media, que puede usarse para el riego de cultivos, se encuentra dentro de los valores normales óptimos de 0 a 3 dS/m, propuesto por la (FAO, 1977).

Finalmente, se puede concluir que el valor de CE (0,303 dS/m) y el valor del RAS 1,76 acudiendo al esquema de clasificación propuesto por FAO (1977), muestra que el agua para su aplicación en cultivos es clasificada como C2-S1, lo cual indica que el agua

presenta bajo en sodio y moderadamente salina, por lo que no presentan restricciones de uso en el riego.

4.4.2 Características del suelo

Los suelos de la Estación Experimental de Choquenaira son superficiales de formación aluvial sedimentaria, de clases texturales franco a franco arcillosos, y con buena permeabilidad a excepción de algunas áreas consideradas como áreas inundadas y buena retención de humedad. Las características químicas son de reacciones neutras con pH 6,9 en la capa arable (Mamani y Céspedes, 2012). En suelo del área de estudio de investigación los resultados de análisis de suelo antes del establecimiento del experimento se describe a continuación las características físicas y químicas del suelo, el mismo fue realizado en el laboratorio de IBTEN.

4.4.2.1 Características físicas del suelo

En el Cuadro 3, de acuerdo a la clasificación de suelos del departamento de agricultura de los Estados Unidos (1975) y el triángulo textural, nos indica que el suelo de la parcela experimental se caracteriza por tener una clase textural franco arcilloso (FY) que corresponde a 29% de arena, 36% de arcilla y 35% de limo y con 0% de grava, en la primera capa arable de 0-30 cm de profundidad.

De acuerdo al análisis textural este suelo es capaz de retener gran cantidad de agua en los poros, poca aireación y drenaje, son más difíciles de trabajar. Al respecto Villarroel (1998), indica que estos suelos franco arcillosos (FY), son altamente productivos si se da un manejo adecuado, en general son suelos agrícolas de muy buena calidad.

Al respecto IBTA-PROINPA (1998), indican que el cultivo de papa se desarrolla mejor en suelos franco arenosos y franco limoso. Pardave (2004), coincide en señalar que los mejores rendimientos de papa se logran en suelos franco arenosos ya que estos permiten a la parte radicular desarrollarse de mejor forma.

Cuadro 3. Clase textural de suelo del área experimental

M-1	Clase textural	Granulometría			Grava (%)
		Arena (%)	Arcilla (%)	Limo (%)	
0-30	FY	29	36	35	0,0

A partir de los resultados obtenidos del análisis físico químico del suelo en el laboratorio de IBTEN, con el programa Soil Water de USDA (2006), se obtuvo en complementación los siguientes parámetros: Capacidad de campo (CC), Punto de Marchitez Permanente (PMP), Densidad Aparente (Dap), Densidad real (Dr) e Infiltración Básica (Ib), detallándose en la Cuadro 4 y como se observa en la Figura 5.

Cuadro 4. Características físicas del suelo del área experimental

M-1	Clase textural	CC (%)	PMP (%)	Dap (g/cm ³)	Dr (g/cm ³)	Ib (mm/hr)
0-30	FY	36,3	22,3	1,38	2,65	4,02

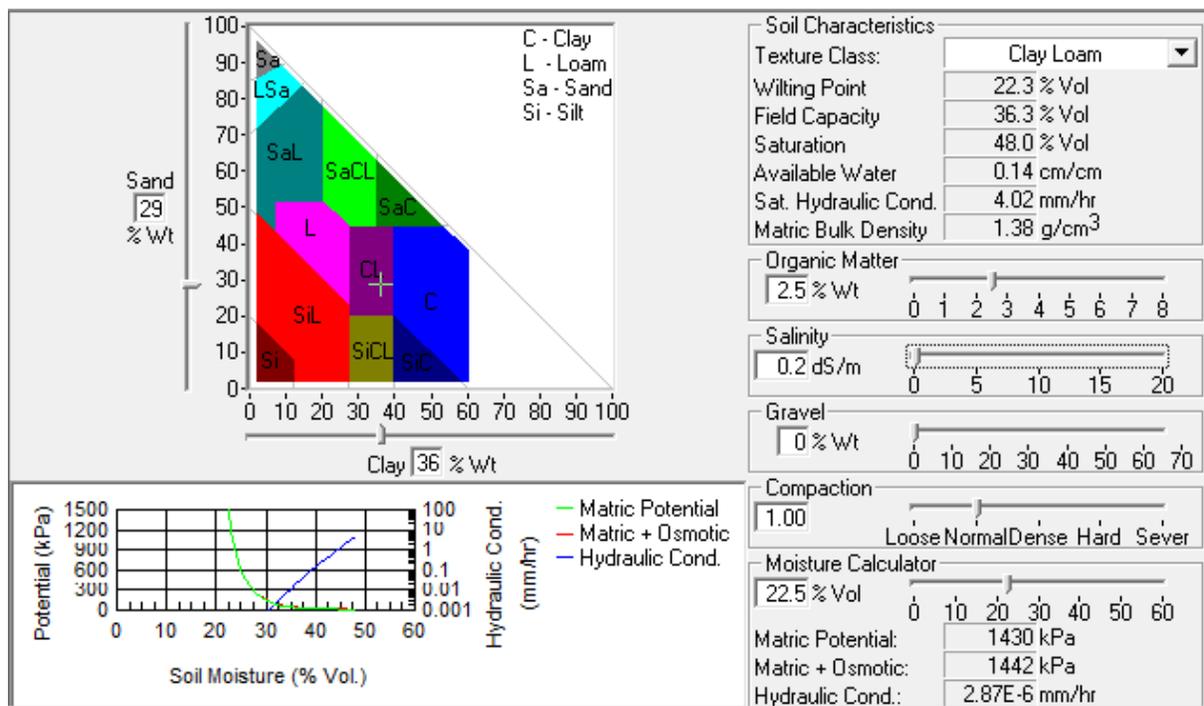


Figura 5. Parámetros del suelo de la parcela experimental según el programa Soil Water (USDA, 2006)

Según la Figura 5, el suelo de la parcela experimental presenta una capacidad de campo (CC) de 36,3 % y punto de marchitez permanente (PMP) de 22,3% ambos

expresados en términos volumétricos (cm^3/cm^3) es decir se encuentra 14 % de agua disponible en el suelo.

Además observamos en la misma Figura 5, la densidad aparente (D_{ap}) es $1,38 \text{ g/cm}^3$, al respecto CENTA (2002), menciona que el requerimiento del cultivo de papa es con D_{ap} de $1,20 \text{ g/cm}^3$ aproximadamente; eso significa que el cultivo de papa en investigación se desarrolló normalmente sin ningún efecto.

Según el programa Soil Water (2006), la velocidad de infiltración básica (I_b) para el área del experimento es de $0,4 \text{ cm/hr}$ o 4 mm/hr , al respecto Chilón (1997) menciona que está dentro del rango de una infiltración lenta, esto se debe principalmente a que el suelo posee una textura franco arcilloso (FY); se puede interpretar que la velocidad de infiltración es alta al iniciar el proceso de infiltración en el suelo y va disminuyendo a medida que el suelo se va mojando en el interior del suelo y así también se puede aseverar que la velocidad de infiltración si influye en el rendimiento y desarrollo de las plantas, ya que el alto porcentaje de humedad disponible para las plantas hace que estas lleguen a asimilar la humedad de mejor manera.

4.4.2.2 Características químicas del suelo

En Cuadro 5, se presenta el análisis químico del suelo para la capa arable de la parcela experimental, cuyos resultados se describen a continuación.

Cuadro 5. Características químicas del suelo del área experimental

M-1	Ph	C.E. (dS/m)	Cationes (meq/100 g)				C.I.C. (meq/100 g)	M.O. (%)	Nt (%)	Pasim. (ppm)
			Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺				
0-30	6,76	0,885	12,15	2,17	0,36	1,44	16,24	2,50	0,17	42,73

De acuerdo a los resultados del análisis químico en el Cuadro 5, se observa que el pH del suelo es ligeramente ácido a neutro (6,76), valor que se encuentra dentro del rango óptimo de 6,6 -7,3 (Villarreal, 1988).

Por otra parte la conductividad eléctrica (C.E.) es bajo (0,885 ds/m), valor que indica que no hay problemas de sales que puedan causar daño al cultivo de papa, es aceptable como recomienda Villarreal (1988). Según Orsag (2010), la CE por encima de 4 dS/m perjudica el crecimiento de las plantas, por tal motivo suelo con una $CE < 4$

dS/m presentan una mejor fertilidad natural, entonces podemos decir que el suelo del área de estudio son aptos para la implementación de cultivos sin restricciones.

Además observamos en el Cuadro 5, la capacidad intercambio catiónico (C.I.C) es 16,24 meq/100 g en el suelo, al respecto Chilón (1996) muestra 15 a 20 meq/100 g en el suelo, que significa que el CIC de la parcela experimental es alto, entonces la clase textural franco arcilloso del suelo, tiene mayor retención e intercambio de cationes y mayor retención de agua.

En cuanto al estado de la fertilidad del suelo, se observa que el contenido de materia orgánica es medio de 2,50 %, valor que se encuentra dentro del rango de 2 - 4% como recomienda (Chilón, 1996); con un contenido de nitrógeno total bajo de 0,17 %; presencia alto de fosforo asimilable de 42,73 ppm. Con un contenido de potasio de 1,44 meq/ 100 g de suelo que significa muy alta intercambiable para el cultivo, presencia alto de calcio con 12, 15 meq/100g de suelo con contenido moderada de magnesio 2,17 meq/ 100 g de suelo, y presencia baja de sodio de 0,36 meq/100 g de suelo respectivamente. En general es un suelo moderado en la fertilidad.

4.5 Descripción física del perfil del suelo

La descripción del perfil del suelo fue realizada mediante la excavación de una calicata de 1x1x1 m en el área de estudio donde se muestra en el Cuadro 6 y Figura 6, en el cual se identificó dos horizontes bien diferenciados en la parcela experimental, los cuales se describen a continuación:

Cuadro 6. Descripción física del perfil del suelo

Horizonte	Profundidad (cm)	Color	Textura
Ap	0 – 25	Café claro	Franco arcilloso
Bt	25 – 75	Plomo oscuro	Franco arcilloso

- **Ap: (0 – 25 cm)**, horizonte superficial que presenta un espesor de 25 cm con clase textural franco arcilloso (FY) de color café claro, firme en húmedo y duro en seco; porosidad fina, ausencia de piedras, de consistencia mojado adherente y plástico, y con presencia de raíces finas (Figura 6).

- **Bt: (25 – 75 cm)**, es un horizonte sub superficial que tiene un espesor de 75 cm con clase textural franco arcilloso (FY) de color plomo oscuro, con presencia de humedad, ausencia de piedras, sin presencia de raíces en la profundidad del perfil del suelo (Figura 6).

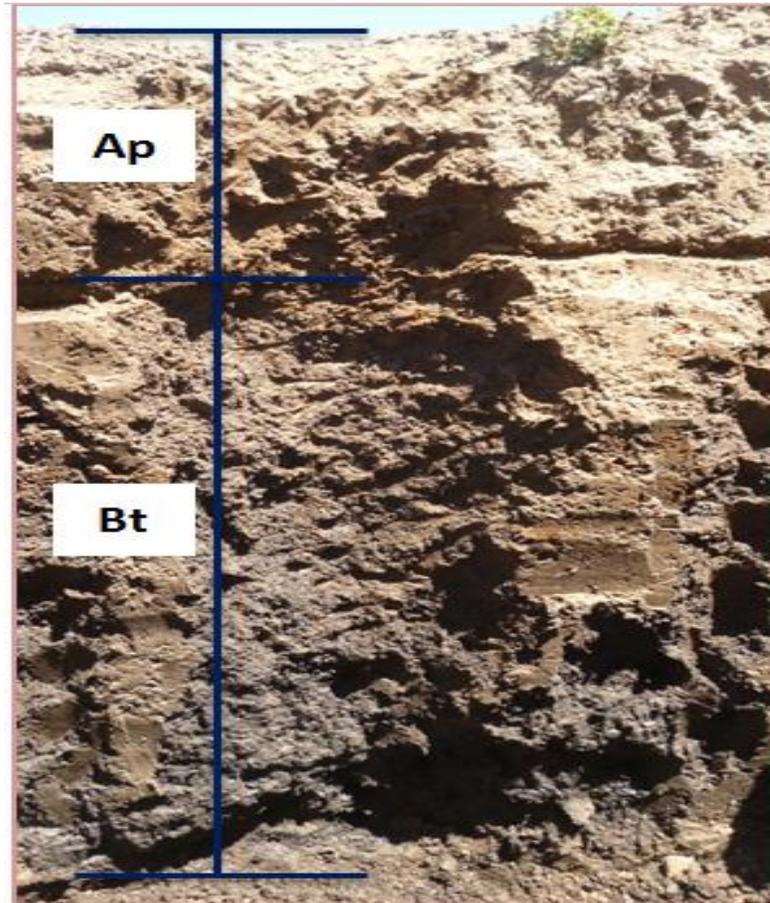


Figura 6. Calicata del suelo experimental

4.6 Aspecto fisiográfico

El aspecto fisiográfico de la región, está dada aproximadamente en un 21% por serranías y 79% de planicies que constituye la cuenca lechera y forrajera, que son aptos para la producción de cultivos agrícolas y las crianzas de animales mayores y menores; la vegetación corresponde a Bosque Húmedo Montano Sub-tropical, donde la vegetación primaria dominante son las plantas xerofitas y mesófitas; las especies más representativas que componen la comunidad vegetal son de tipo herbáceo anuales y plurianuales y algunos de tipo arbustivas (Mamani y Céspedes, 2012).

V. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1 Materiales

Los materiales y equipos que se usaron en el desarrollo del trabajo de investigación; se describen a continuación.

5.1.1 Material vegetal

El material vegetal utilizado fue, un quintal de semilla certificada de papa, variedad Huaycha (*Solanum tuberosum* L.), obtenido de la Asociación de Productores Semilleros del Altiplano Norte "PROSAN" de Municipio de Achacachi de Provincia Omasuyos del Departamento de La Paz.

5.1.2 Material de campo

- Picota
- Pala
- Carretilla
- Wincha de 30 m
- Chuntilla
- Barreno muestreador
- Estacas de madera de 60 cm de longitud
- Marbetes
- Letreros de 15 x 20 cm
- Baldes y regadoras graduadas de 10 litros
- Bolsas plásticas de polietileno 16x20 cm
- Computadora
- Cámara fotográfica digital
- Fluxómetro de 3 m
- Cordel plástico de 350 m
- Planillas de registro
- Turriles de plásticos de 200 litros de capacidad
- Regla metálica 60 cm
- Etiquetas
- Cuaderno de campo
- Tubos de acceso PVC
- Manguera de media pulgada
- Lupa
- Tijera
- Bolsas de tipo red
- Nylon blancos
- Botas
- Barbijo
- Guantes
- Jeringas

5.1.3 Materiales orgánicos e inorgánicos

- Cura papa
 - o (Cruiser 60FS: Thiamethoxam 600 g/l)
 - o (Maxim XL: Fludioxonil 25 g/l + Metalaxyl-M 10 g/l)
- Estiércol de ovino (N, P, K, Ca, Mg, C, Materia orgánica)
- Biol (N, P, K, Ca y S)
- Extracto de banano (K, Ca)
- Insecticida karate (Lambda-cyhalothrin 50 g/l)
- Urea (46-0-0)(133,12 kg Urea/ha)

5.1.4 Equipos y maquinaria agrícola

- Tractor agrícola con sus implementos: arado de disco, rastra.
- Estación meteorológica automática DAVIS Vantage Pro2
- Sonda FDR Diviner 2000 portátil o Sonda de capacitancia
- Cámara de presión tipo Scholander
- Termómetro infrarrojo
- Mochila fumigadora de 20 litros
- Cronómetro
- Balanza analítica

5.1.5 Material de gabinete

- Calculadora científica
- Material de escritorio
- Material bibliográfico
- Impresora
- CDs-DVD
- Flash memory
- Planillas de recolección de datos
- Paquetes de Microsoft office
- Hojas papel bond tamaño carta
- Internet

5.2 Métodos

El desarrollo del procedimiento experimental se trabajó en dos fases importantes: fase de trabajo en campo y fase de trabajo en gabinete.

5.2.1 Fase de trabajo en campo

A continuación, se presentan las siguientes actividades realizadas en campo para el presente estudio.

5.2.1.1 Preparación del terreno

a) Limpieza del terreno

Esta actividad se inició con el recojo de piedras, botellas plásticas y estacas de la parcela y seguidamente se quemó los restos vegetales del cultivo anterior año agrícola que se había cultivado tarwi, en la parcela.

b) Riego general de la parcela

Se aplicó un riego general en toda la parcela experimental, para que el terreno este saturado y en capacidad de campo, y facilite el roturado del terreno.

c) Incorporación del abono orgánico

Antes de la preparación del terreno y para mejorar la estructura del suelo, se trasladó el estiércol de ovino parcialmente descompuesto en una carretilla y con una pala manual, se distribuyó de manera uniforme en toda la parcela experimental, para que en el momento del roturado del suelo se incorpore el abono orgánico al interior del suelo, en una proporción de 10 t/ha.

d) Roturado del suelo

Esta actividad se realizó el 6 de septiembre de 2017, el terreno fue arado una superficie de 277,40 m² por un tractor agrícola con arado de disco a una profundidad de 30 cm de

la capa arable del suelo, con el fin de airear, voltear la capa arable del suelo, además de desenterrar larvas y pupas, exponiéndolos a la radiación solar.

e) Rastrado

Esta labor se realizó con una rastra de discos, se pasó tres veces, en sentidos diferentes donde los terrones quedaron muy pequeños.

f) Nivelación

La nivelación del terreno fue hecho con un tablón amarrado detrás de la rastra, emparejando el suelo, para tener mejor distribución del agua, emergencia uniforme.

5.2.1.2 Delimitación del terreno

La parcela de una superficie de 277,40 m² fue delimitada, dividida y trazada en base al croquis del diseño experimental establecido (Figura 8) de tal forma que los bloques, unidades experimentales y pasillos tengan las mismas dimensiones. Todo esto procedimiento se realizó con ayuda de cinta métrica, estacas y lienzos.

5.2.1.3 Desinfección de la semilla

Para lograr un buen desempeño del cultivo de papa se realizó la desinfección de semilla de papa con cura papa, a razón de 3 cm³ Cruiser más 4 cm³ Maxin en 600 cm³ de agua, sumergiendo en la solución los tubérculos de papa en una carretilla por un lapso de 10 minutos y dejándolos secar por 1 hora.

5.2.1.4 Siembra del cultivo de papa

Esta actividad se realizó en fecha 10 de octubre del 2017, la siembra se inició en forma manual, abriendo los surcos con una picota a una profundidad de 0,1 m, con un distanciamiento entre surcos de 0,6 m y las semillas de papa fueron colocadas dentro de los surcos a una distancia de 0,4 m entre tubérculos y seguidamente se aplicó fertilizante químico por surco a chorro continuo, se utilizó urea (46-00-00) a un nivel una

proporción de 5 kg de fertilizante, luego se procedió al cierre de surcos con la misma herramienta.

5.2.1.5 Marbeteado de plantas

Luego de la emergencia de las plantas de papa, para realizar un seguimiento del cultivo se procedió al marbeteado aleatorio de cinco plantas por unidad experimental cuando las plantas presentaban una altura de 0,05 a 0,10 m, considerando el efecto de borde, teniendo un total de 180 plantas marbeteadas y posteriormente evaluadas. Se menciona que los marbetes indican el número de muestra.

5.2.1.6 Desarrollo de labores culturales

Durante el desarrollo vegetativo del cultivo se realizaron las siguientes labores culturales: aporque, deshierbe, fertilización, control fitosanitario.

a) Aporque

El aporque se realizó en forma manual con una picota, cuando el suelo se encontraba con una humedad adecuada, se efectuó en dos oportunidades, en toda la campaña agrícola:

- El primer aporque fue a los 40 días después de la siembra, en donde se aplicó fertilizante mineral urea (46-0-0), 3 kg al boleó (superficial) en la base de las plantas para que junto con la remoción del suelo ingrese el fertilizante y pueda ser absorbido por la planta.
- Y el segundo aporque a los 80 días después de la siembra donde no se aplicó ningún fertilizante mineral; la aporca consistió en remover el suelo y acumular tierra alrededor del cuello de las plantas, formando un camellón, con la finalidad de favorecer la aireación de la raíz y controlar malezas.

b) Deshierbe

El deshierbe de malezas se realizó en forma manual con una chuntilla en cada unidad experimental y pasillos, para evitar la competencia con las plantas de papa. Manteniendo limpio el cultivo durante todo su ciclo. Las especies extraídas del suelo fueron: quinua silvestre (*Chenopodium album*), reloj reloj (*Erodium cicutarium*) y entre otros.

c) Fertilización foliar

Se realizó fertilización foliar en forma manual con ayuda de una mochila aspersora, se realizó en tres oportunidades, en toda la campaña agrícola:

- La primera fertilización foliar fue a los 43 días después de la siembra, en donde se aplicó biol de forma localizada en las plantas, debido a que el 21 de noviembre de 2017 el cultivo fue dañado por la helada que provocó el daño en las hojas.
- La segunda y tercera aplicación de fertilización foliar se aplicó biol mas jabón diluido como adherente y extracto de banano; en fase de prefloración y en la fase de floración, con la finalidad de favorecer el crecimiento y desarrollo de las plantas de papa.

d) Control fitosanitario preventivo

Durante el crecimiento y desarrollo del cultivo como medida de prevención de control de plagas y enfermedades, se asperjó al follaje de las plantas un producto químico insecticida “karate”, bajo la dosis de 20 cc para 20 litros de agua, para el control de gorgojo de los andes, se aplicó en dos oportunidades: la primera aplicación se realizó en la fase de emergencia del cultivo y la segunda en la fase de prefloración realizándose por la tarde.

e) Drenaje de la parcela experimental

Por la excesiva precipitación durante los meses de enero y febrero se pudo observar pudrición de algunos tubérculos en mínima cantidad, encharcamiento de agua en las unidades experimentales, se observó síntomas de amarillamiento de algunas plantas y para evitar el daño del tubérculo por la alta humedad en el suelo, se realizó un drenaje en la parcela con ayuda de una picota, esto para que no afecte en la producción de papa en el momento de la cosecha.

5.2.1.7 Riego del cultivo

La aplicación de las láminas de riego, fueron aplicados en forma de riego deficitario controlado en los tratamientos propuestos en este trabajo, que correspondieron a una reposición de 100%, 75% y 50% ETC. Para cubrir con la demanda de agua del cultivo se realizó el cálculo de programación de riego en base a parámetros climáticos.

Los riegos fueron suministrados con frecuencia de 7 días por un tiempo de riego de 3 horas, el agua aplicada en surcos se midió en litros a través de baldes y regaderas.

El suministro de riego solo se dio desde el inicio de la fase de desarrollo y crecimiento vegetativo hasta fase de madurez fisiológica de acuerdo a los tratamientos.

5.2.1.8 Cosecha del cultivo de papa

La fecha de la cosecha se realizó cuando alcanzo su madurez fisiológica, el 29 de marzo y el 5 de abril de 2018, es decir, cuando no se tuvo desprendimiento de la piel del tubérculo.

La cosecha del cultivo de la papa se realizó manualmente, con la ayuda de una chonta se cosecho cada planta de papa y se recogieron los tubérculos del suelo de cada planta en bolsas de nylon blanco con sus respectivas identificaciones para su registro. Posteriormente el producto cosechado fue trasladado a un ambiente de laboratorio para su posterior post-cosecha.

5.2.1.9 Post cosecha

Una vez concluida la cosecha de la papa se realizó la post-cosecha, inmediatamente cada bolsa que contenía los tubérculos de papa se realizó la clasificación, selección, conteo y pesado de los tubérculos en una balanza electrónica, luego los tubérculos de papa se envasaron en bolsas de tipo red para su posterior comercialización.

5.2.2 Fase de trabajo en gabinete

5.2.2.1 Programación de riego

Para la programación del riego se trabajó en base a parámetros climáticos “a tiempo real”. Para cubrir la demanda de agua del cultivo se siguió el siguiente procedimiento:

- **Descarga y sistematización de datos climáticos**

Los datos climáticos se recabaron de la estación meteorológica automática DAVIS Vantage Pro2, la cual por medio inalámbrica captura los datos de variables climáticas cada 15 minutos a una consola receptora y almacenadora de datos climáticos, una vez registrados los datos climáticos, los mismos fueron analizados en un ordenador.

Seguidamente la descarga de los datos climáticos registrados por la consola se recabo una vez por semana a las 13:30 p.m. de la tarde. Una vez obtenidos los datos climáticos de la consola, se sistematizaron los datos en un programa Excel como: temperatura máxima, temperatura mínima, evapotranspiración de cultivo de referencia (ET_o), precipitación pluvial (PP).

- **Determinación de la evapotranspiración de cultivo de referencia (ET_o)**

Para la determinación de la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o), se utilizó la ecuación de Penman-Monteith FAO 56 (Allen *et al.*, 2006). donde las variables climáticas que requiere esta (Ecuación 02), fue calculada la evapotranspiración de cultivo de referencia (ET_o) automáticamente gracias al equipo meteorológico

automático DAVIS Vantage Pro 2, establecido en la Estación Experimental de Choquenaira.

$$ET_o = \frac{0,408\Delta(Rn - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad (02)$$

Dónde:

ET_o = Evapotranspiración de referencia (mm/día)

R_n = Radiación neta en la superficie de cultivo (MJ/m²/día)

G = Densidad de flujo de calor del suelo (MJ/m²/día). G = 0 para cálculos diarios

T = Temperatura media del aire a 2 m de altura (m/s)

u₂ = Velocidad del viento a 2 m de altura (m/s)

Δ = Pendiente de la curva de presión de vapor (kpa/°C)

γ = Constante psicométrica (kpa/°C)

e_s = Presión de vapor en saturación del aire (kpa)

e_a = Presión actual del vapor de agua (kpa)

- Duración de fases de crecimiento

La duración de las etapas o fases del cultivo de papa se estimó de acuerdo a las condiciones particulares de la zona del proyecto como se muestra en el Cuadro 7, observándose el periodo de duración de cada fase.

Cuadro 7. Duración de fases de crecimiento

Inicial	Desarrollo	Media	Final	Total
35	35	70	30	170

- Coeficiente del cultivo (Kc)

En el Cuadro 8, se muestra los valores de coeficiente de cultivo (Kc) de papa se determinó según los valores tabulados por la FAO 56 (Allen *et al.*, 2006). Esta recomienda para el cultivo de papa los valores de Kc para las distintas etapas del cultivo: Kc inicial = 0,5; Kc medio = 1,15 y Kc final = 0,4. Estos valores se utilizaron para la programación de riego.

Cuadro 8. Valores del coeficiente del cultivo de papa (Kc)

Cultivo	Kc inicial	Kc media	Kc final
Papa	0,5	1,15	0,4

- La curva de Kc

Después de la determinación de las longitudes de las fases de crecimiento y coeficiente del cultivo de papa, se procedió a la elaboración de la curva del coeficiente del cultivo de papa como se muestra en la Figura 7.

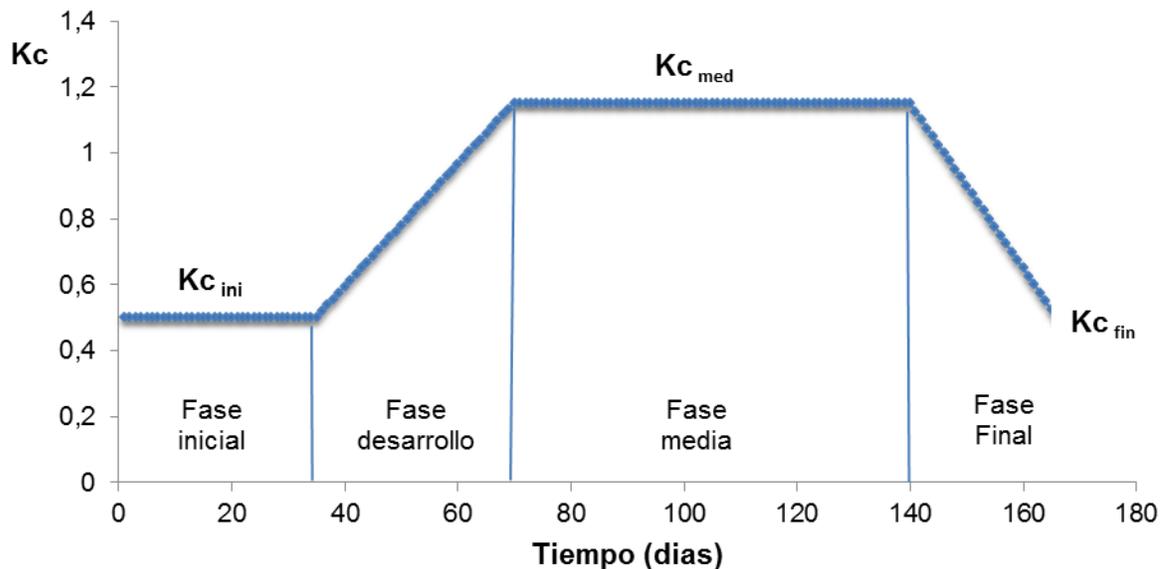


Figura 7. Curva del coeficiente del cultivo de papa

- **Determinación de la evapotranspiración del cultivo (ETc)**

Para su determinación de la evapotranspiración del cultivo (ETc), se calculó con la siguiente (Ecuación 03):

$$ETc = Kc * ETo \quad (03)$$

Dónde:

ETc = Evapotranspiración del cultivo (mm/día)

Kc = Coeficiente de cultivo de cultivo de papa

ETo = Evapotranspiración del cultivo de referencia (mm/día)

- **Determinación de la precipitación efectiva (Pe)**

Se consideró la precipitación efectiva como fijo al 75%, por la recomendación del proyecto de cultivos andinos.

- **Determinación de requerimiento de riego de cultivo**

Se realizó la programación de riego para una frecuencia de 7 días para los volúmenes de agua aplicar para 100%, 75% y 50% de ETc, de acuerdo a los tratamientos propuesto en este trabajo de investigación, se calculó el requerimiento de riego con la siguiente expresión:

$$\text{Req. de riego} = ETc - Pe \quad (04)$$

Dónde:

Req. de riego = Requerimiento de riego (mm)

ETc = Evapotranspiración de cultivo (mm/días)

Pe = Precipitación efectiva (mm)

5.2.3 Diseño Experimental

El diseño experimental aplicado para este estudio fue el diseño estadístico Bloques Completamente al Azar con arreglo en Parcelas Divididas, con tres bloques, dos factores de estudio: el primer Factor A (Parcela grande) láminas de riego con tres niveles y el segundo Factor B (Parcela pequeña) fases fenológicas con cuatro niveles, haciendo un total de 12 tratamientos.

5.2.3.1 Modelo Aditivo Lineal

El modelo aditivo lineal estadístico según lo planteado por Steel y Torrie (1996) responde al siguiente:

Modelo aditivo lineal:

$$\gamma_{ijk} = \mu + \beta_k + \alpha_i + \varepsilon_{ik} + \lambda_j + \alpha\lambda_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad (05)$$

Dónde:

- γ_{ijk} : Una observación cualquiera
- μ : Media poblacional
- β_k : Efecto del k-esimo bloque
- α_i : Efecto del i-esimo nivel del factor A (láminas de riego)
- ε_{ik} : Error experimental de la parcela mayor (Ea)
- λ_j : Efecto del j-esimo nivel del factor B (fases fenológicas)
- $\alpha\lambda_{ij}$: Efecto del i-esimo nivel del factor A, con el j-esimo nivel del factor B (interacción AxB)
- ε_{ijk} : Error experimental de la parcela menor (Eb)

5.2.3.2 Factores de Estudio

Se utilizó dos factores de estudio con sus respectivos niveles de estudio, que se presenta en el Cuadro 9.

Cuadro 9. Factores y niveles de estudio

Factor A: Laminas de riego	Factor B: Fases fenológicas
a1: 100% ETc	b1: Todas las fases
a2: 75% ETc	b2: Fase desarrollo y crecimiento vegetativo
a3: 50% ETc	b3: Fase tuberización y floración
	b4: Fase madurez fisiológica

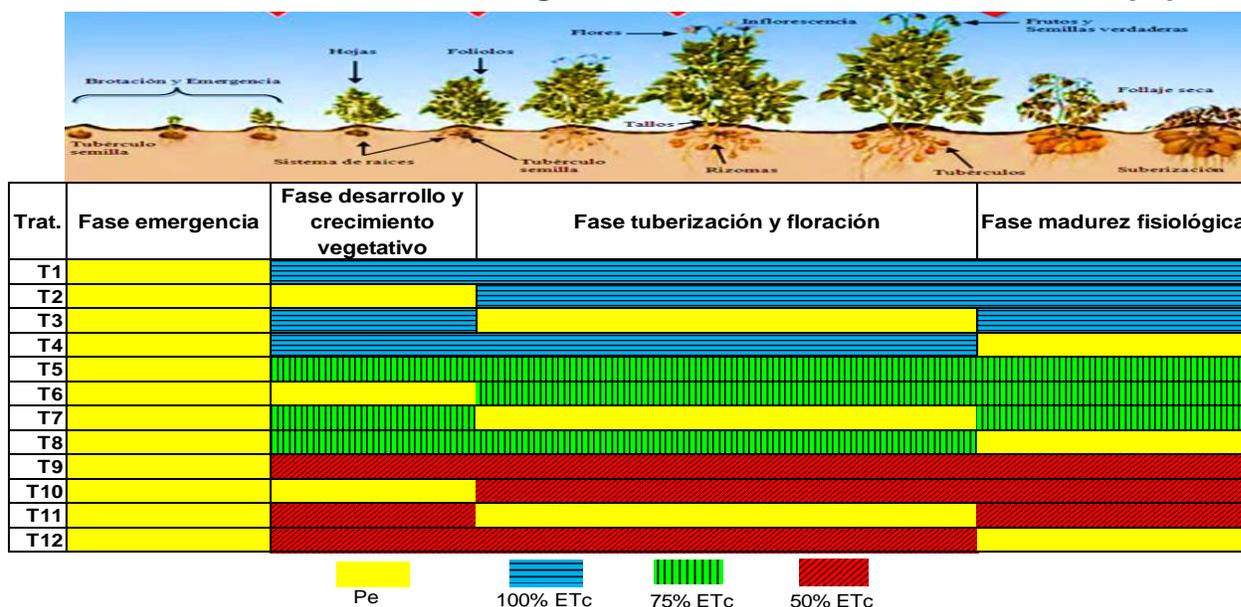
5.2.3.3 Tratamientos

El experimento presenta doce tratamientos que se obtuvieron de la combinación de los dos factores de estudio factor A (FA) y factor B (FB), de la siguiente forma que se muestra en el Cuadro 10.

Cuadro 10. Descripción de los tratamientos combinados

FA	FB	Descripción	Trat.
a1	b1	a1b1 Riego con 100% ETc Todas las fases	T1
	b2	a1b2 Riego con 100%ETc Fase tuberización y floración, madurez fisiológica; sin riego en fase desarrollo y crecimiento vegetativo	T2
	b3	a1b3 Riego con 100% ETc Fase desarrollo y crecimiento vegetativo, madurez fisiológica; sin riego en fase tuberizacion y floracion	T3
	b4	a1b4 Riego con 100% ETc Fase desarrollo y crecimiento vegetativo, tuberización y floración; sin riego en fase madurez fisiológica	T4
a2	b1	a2b1 Riego con 75% ETc Todas las fases	T5
	b2	a2b2 Riego con 75% ETc Fase tuberización y floración, madurez fisiológica; sin riego en fase desarrollo y crecimiento vegetativo	T6
	b3	a2b3 Riego con 75% ETc Fase desarrollo y crecimiento vegetativo, madurez fisiológica; sin riego en fase tuberización y floración	T7
	b4	a2b4 Riego con 75% ETc Fase desarrollo y crecimiento vegetativo, tuberización y floración; sin riego en fase madurez fisiológica	T8
a3	b1	a3b1 Riego con 50% ETc Todas las fases	T9
	b2	a3b2 Riego con 50% ETc Fase tuberización y floración, madurez fisiológica; sin riego en fase desarrollo y crecimiento vegetativo	T10
	b3	a3b3 Riego con 50% ETc Fase desarrollo y crecimiento vegetativo, madurez fisiologica; sin riego en fase tuberización y floración	T11
	b4	a3b4 Riego con 50% ETc Fase desarrollo y crecimiento vegetativo, tuberización y floración; sin riego en fase madurez fisiológica	T12

Cuadro 11. Tratamientos de Riego Deficitario Controlado en cultivo de papa



5.2.3.4 Características del área experimental

En el Cuadro 12. Podemos observar las características y dimensiones del área experimental.

Cuadro 12. Características y dimensiones del área experimental

Descripción	Valor
Número de bloques	3
Número de tratamientos	12
Total de unidades experimentales	36
Número de surcos por unidad experimental	4
Número de semilla por golpe	1
Total de plantas por unidad experimental	20
Distancia entre plantas	0,40 m
Distancia entre surcos	0,60 m
Longitud de la unidad experimental	2,50 m
Ancho de la unidad experimental	2,00 m
Separación entre bloques	1,00 m
Separación entre parcela grande	0,80 m
Separación entre parcela pequeña	0,40 m
Longitud del experimento	29,20 m
Ancho del experimento	9,50 m
Superficie de la unidad experimental	5,00 m2
Superficie útil del experimento	172,8 m2
Superficie total del experimento	277,40 m2

5.2.3.5 Croquis del experimento

En el área del experimento se evaluó 12 tratamientos, cada uno con tres repeticiones, haciéndose un total de 36 unidades experimentales, mismas que fueron dispuestas de manera aleatoria como se ve en la Figura 8.

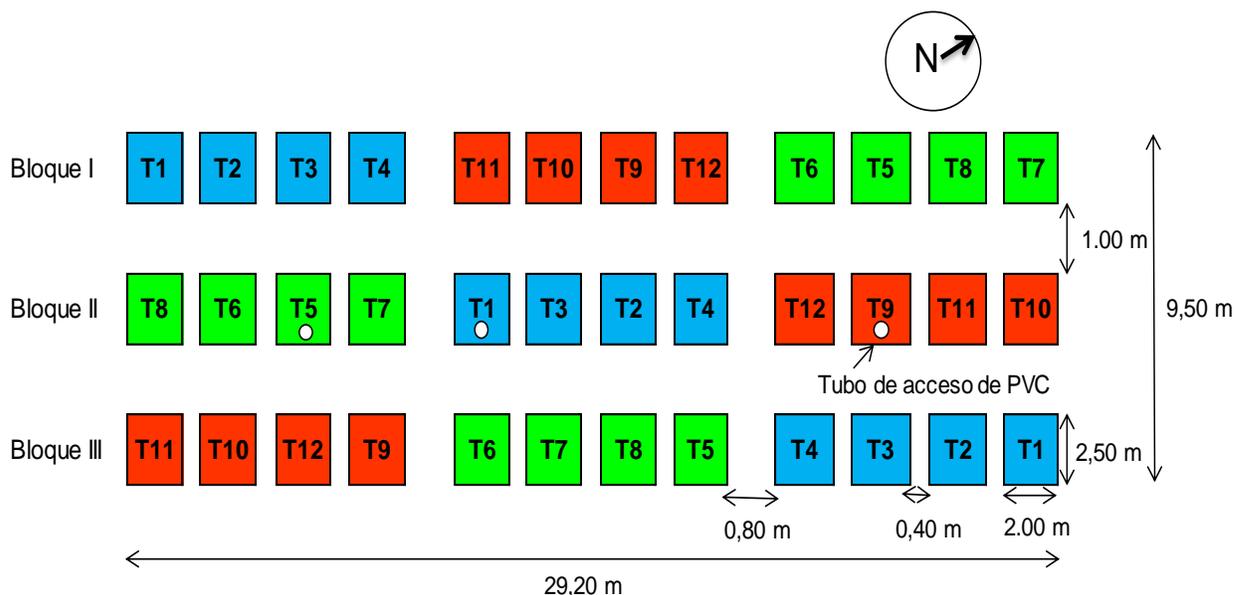


Figura 8. Croquis experimental

5.2.3.6 Análisis Estadístico

En función al modelo lineal del diseño estadístico Bloques Completamente al Azar con Arreglo en Parcelas Divididas, se realizó el análisis de varianza correspondiente a las variables de estudio con un nivel de significancia del $\alpha = 0,05$ o 5%. Donde las decisiones de significancia se tomaron según la siguiente regla:

$Pr > 0,05$ No presenta diferencias significativas (ns) Se acepta hipótesis nula H_0 .

$Pr < 0,05$ Presenta diferencias significativas (*) Se acepta hipótesis alterna H_a .

$Pr < 0,01$ Presenta diferencias altamente significativas (**) Se acepta hipótesis alterna H_a .

Se realizó comparación de medias mediante la prueba de Duncan, con una sensibilidad del 5%, para cada variable de evaluación.

5.2.4 Variables de evaluación

5.2.4.1 Agua aplicada al cultivo de papa

La cantidad total de agua aplicada al cultivo de papa, se evaluó mediante la cantidad de agua aportada por el riego (R) más la precipitación efectiva (Pe).

5.2.4.2 Contenido de humedad en el suelo

El contenido de humedad del suelo, se midió con el equipo sensor sonda FDR Portatil Diviner 2000 previamente calibrado, haciendo la medición dos veces a la semana a las 13:45-14:00 p.m. de la tarde. Para la toma de la medida del humedad del suelo se hizo descender la sonda FDR lentamente hasta el fondo, en cada tubo de acceso instalados en los tres tratamientos, de manera automática cada 10 cm de profundidad, hasta una profundidad de 50 cm se mostraron los valores de humedad del suelo en una pantalla del data logger, de esta manera la medida en cada tubo de acceso de PVC se repitió dos veces para posteriormente obtener una media y a partir de estos datos se evaluó el contenido de la humedad del suelo (Figura 9). Previo a la medición del contenido de humedad del suelo se realizó primeramente la instalación de los tubos de acceso.



Figura 9. Monitoreo de humedad de suelo con sonda FDR Diviner 2000

- Instalación de los tubos de acceso de PVC

Para la instalación de los tubos de acceso se utilizó el siguiente material: Barreno, tamiz de 2 mm, arcilla, agua, tubo de acceso de PVC; para su instalación de los tubos de acceso de PVC en tres unidades experimentales se realizó de acuerdo al siguiente procedimiento:

- Se hizo primeramente la perforación en el suelo de 50 cm de profundidad con ayuda de un barreno con diámetros específicos al tubo de acceso, en tres unidades experimentales pertenecientes a los tratamientos (T1, T5 y T9). Cuidando no desestructurar el perfil del suelo.
- Una vez realizada las perforaciones en el suelo, en las tres unidades experimentales se procedió a tamizar el suelo y juntamente con agua se realizó una pasta espesa en un balde, con la que se llenó el agujero hasta la mitad.
- Seguidamente se introdujo el tubo de acceso de PVC en el agujero perforado y se empujó hasta que llegue al tope y al hacer esto se aseguró de que el barro llegue a rebosar a la superficie del suelo, esto con la finalidad de que no quede aire entre el tubo de acceso y perfil del suelo. De la misma manera se instaló los siguientes tubos de acceso de PVC (Figura 10).

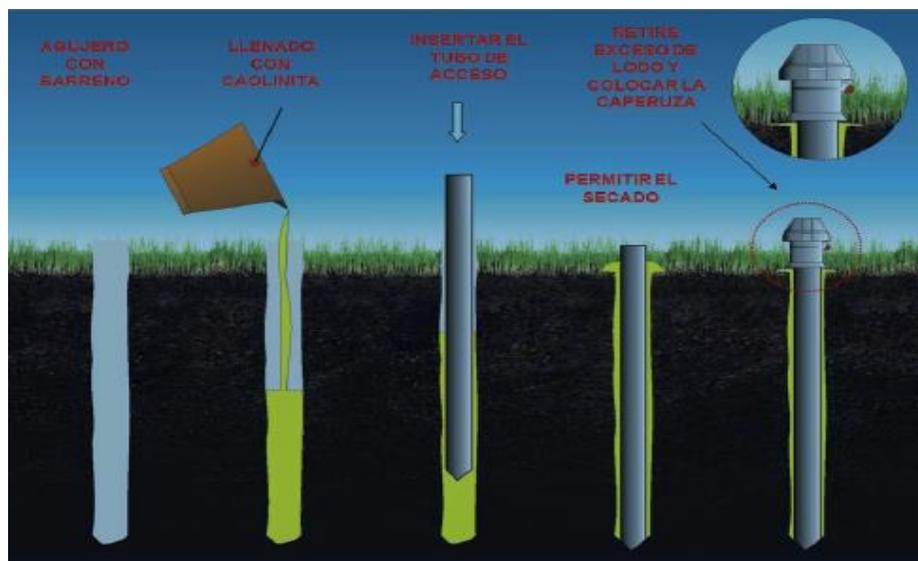


Figura 10. Instalación de tubo de acceso de PVC en el suelo (Sanco, 2000)

5.2.4.3 Potencial hídrico xilemático

Para la evaluación del potencial hídrico xilemático de la plantas se utilizó la cámara de presión de tipo Scholander, las medidas se realizaron una vez a la semana al medio día solar entre las 12:30 a 13:30 p.m. de la tarde, para la medición se seleccionó una planta sana representativa por tratamiento. De la planta seleccionada por tratamiento se seleccionó una hoja que fue embolsado con una bolsa plástica de polietileno y por encima recubierto con papel aluminio dejándolo durante 30 minutos, con el fin de equilibrar su potencial hídrico con el de las estructuras que la sostienen.

Seguidamente pasados los 30 minutos se realizó un corte fino en el peciolo de la hoja con un estilete, rápidamente se insertó el peciolo en la tapa de la cámara dejando fuera de ella una pequeña porción del peciolo, luego se enrosco la tapa en la cámara bien y se inyectó gas nitrógeno en forma lenta y constante a la cámara (Figura 11).

Posteriormente se observa con una lupa en el momento donde se produzca salida de la gota de agua, cuando empezó a salir la savia en forma de gota de agua sobre el corte de peciolo, se lee inmediatamente la presión en el manómetro.

Esa lectura se registró en las planillas, luego se liberó la presión de la cámara y se tomó otra medición de la misma manera, trabajando con rapidez para prevenir que el material pierda excesiva cantidad de agua por transpiración y esto afecte el potencial de agua, por tanto la lectura realizada representa la tensión o potencial hídrico a la que se encontraba la savia en el xilema antes del corte de la hoja.



Figura 11. Medición del potencial hídrico xilemático con cámara de presión

5.2.4.4 Temperatura de la hoja

La evaluación de temperatura del cultivo (T_c) se midió con un termómetro infrarrojo (modelo AR300, marca SMART SENSOR INFRARED THERMOMETER con una precisión de $-32^{\circ}\text{C} - 300^{\circ}\text{C}$), realizando 9 medidas en la planta de la hoja, evitando las nervaduras.

Para la medición el termómetro infrarrojo se ubicó a una altura de 30 cm sobre la cubierta y una distancia de 20 cm de la hoja y se mantuvo con un ángulo de menos de 45° respecto a la horizontal con el fin de que los resultados sean comparables entre las unidades biológicas y los muestreos. Las lecturas fueron realizadas desde 08:00 a.m. hasta 16:00 p.m. entre intervalos de 2 horas, y los datos de temperatura del aire (T_a) fueron obtenidos de la estación climática instalada en la Estación Experimental de Choquenaira. Conociendo el comportamiento de la temperatura del cultivo y del aire, se realizó la comparación la temperatura del cultivo respecto a la temperatura del aire.



Figura 12. Medición de Temperatura foliar ($^{\circ}\text{C}$) a través de termómetro infrarrojo

5.2.4.5 Altura de planta (cm)

Se tomaron registros de altura de planta en cada fase fenológica, iniciándose la primera medida a los 35 días después de la siembra hasta el máximo crecimiento (floración), las mediciones se tomaron desde el cuello de la planta hasta el ápice superior de la planta, dicha magnitud se expresó en centímetros (cm), se evaluaron cinco plantas por unidad experimental.

5.2.4.6 Número de tubérculos por planta (N° tubérculos/planta)

El número de tubérculos por planta se determinó de una muestra de un metro cuadrado por tratamiento. De los cuales se contó el número de tubérculos por planta. Estos datos se registraron y fueron evaluados los resultados obtenidos en cada tratamiento.

5.2.4.7 Peso de tubérculos por planta (g/planta)

El peso de tubérculos por planta se calculó de una muestra de un metro cuadrado por tratamiento, se pesó en una balanza desde el tubérculo más pequeño hasta el más grande, es decir, el total de los tubérculos por planta. Estos valores se registraron y fueron evaluados por cada tratamiento.

5.2.4.8 Rendimiento total (kg/m²)

El rendimiento total se calculó en kg/m² por unidad experimental una vez cosechado los tubérculos correspondientes de cada unidad experimental.

5.2.4.9 Eficiencia de uso del agua (EUA)

Esta variable se determinó sobre la base del rendimiento obtenido por unidad de superficie, en relación a la lámina de agua aplicada durante el ciclo del cultivo, de acuerdo a la siguiente expresión matemática:

$$EUA = \frac{\text{Rdto.}}{\text{VAU}} \quad (06)$$

Dónde: EUA = Eficiencia de uso del agua (kg/m³)

Rdto. = Rendimiento del cultivo (kg/ha)

VAU = Volumen de agua aplicado (m³/ha)

5.2.4.10 Análisis de costos parciales

Para el análisis de costos parciales del presente trabajo se realizó un cuadro de costos de producción donde se presenta los costos variables, ingresos brutos, ingresos netos y un análisis de beneficio/costo para cada tratamiento. El análisis de costos parciales de este estudio se realizó con el método de evaluación económica propuesto por el (Perrin, 1998).

- Ingreso bruto (IB)

El ingreso bruto se calculó multiplicando el precio por el rendimiento obtenido de cada tratamiento, con la siguiente formula:

$$\mathbf{IB = R * P} \quad (07)$$

Dónde:

IB = Ingreso Bruto

R = Rendimiento

P = Precio

- Ingreso neto (IN)

Este valor se obtuvo restando el total de los costos variables del ingreso bruto, el resultado es la ganancia neta. La estimación de los ingresos netos se calculó a través de la siguiente formula:

$$\mathbf{IN = IB - CV} \quad (08)$$

Dónde:

IN = Ingreso Neto

IB = Ingreso Bruto

CV = Costos variables

- **Beneficio/costo (B/C)**

Este valor se obtuvo dividiendo el ingreso bruto total con el total de los costos, con la siguiente formula:

$$B/C = IBT/CT \quad (09)$$

Dónde:

B/C = Beneficio Costo

IBT = Ingreso Bruto Total

CT = Costo Total

Esta relación beneficio/costo, muestra la ganancia que se puede lograr, cuando este valor da menor a uno; indica que no existe ganancia, hay pérdida en la producción por el alto costo de producción ya sea en los costos variables o en los costos fijos.

Cuando se tiene valor de uno, indica que se recupera los gastos de producción pero no existe beneficio costo. Si el valor es mayor a uno significa que hay rentabilidad en la producción (Mokate, 1998).

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se presentan los resultados obtenidos en el presente trabajo de investigación, para ello se expresan el análisis y discusiones a continuación.

6.1 Agua aplicada al cultivo de papa

El volumen total de agua que fue aplicada al cultivo de papa corresponde a la suma de riego (R) aplicado manualmente más los aportes de la precipitación efectiva (Pe), en cada uno de los tratamientos, como se muestra en el Cuadro 13 y Figura 13.

Cuadro 13. Volumen total de agua aplicada

Trat.	Volumen de agua aplicado con riego		Volumen de agua total (Riego + Pe)	
	L/m ²	m ³ /ha	L/m ²	m ³ /ha
T1	197,9	1.979	524,7	5.247
T2	110,8	1.108	437,6	4.376
T3	107,7	1.077	434,5	4.345
T4	194,3	1.943	521,1	5.211
T5	152,5	1.525	479,3	4.793
T6	87,2	872	414,0	4.140
T7	85,0	850	411,8	4.118
T8	149,8	1.498	476,6	4.766
T9	107,2	1.072	434,0	4.340
T10	63,8	638	390,6	3.906
T11	62,2	622	389,0	3.890
T12	105,4	1.054	432,2	4.322

De acuerdo al Cuadro 13 y Figura 13, durante el periodo del cultivo de papa, el volumen de aporte de agua por la precipitación efectiva (Pe), fue por igual para los doce tratamientos con un valor de 326,80 mm, por hectárea equivaldría a 3.268 m³/ha, mas con los riegos aportados manualmente se tiene la cantidad total de agua aplicada Riego (R) más Precipitación Efectiva (Pe), en cada uno de los tratamientos.

Para el tratamiento de **riego de 100% de la Evapotranspiración del cultivo (ETc)**, en T1 la lámina de riego fue 197,9 mm y el volumen total de agua aplicado fue 524,7 mm/ha equivaldría a 5.247 m³/ha, en T2 la lámina de riego fue 110,8 mm y volumen

total de agua aplicado fue 437,6 mm/ha equivaldría a 4.376 m³/ha, en T3 la lámina de riego aplicado al suelo fue 107,7 mm y el volumen total de agua fue de 434,5 mm/ha equivaldría a 4345 m³/ha y en T4 la lámina de riego fue 194,3 mm y el total de agua aplicado fue de 521,1 mm (5.211 m³/ha).

En cambio para el tratamiento de **riego de 75% de la ETc**, en T5 la lámina de riego 152,5 mm y recibió un volumen de agua total de 479,3 mm (4.793 m³/ha), en T6 la lámina de riego 87,2 mm y el volumen total de agua fue 414,0 mm (4.140 m³/ha), en T7 la lámina de riego fue 85 mm y recibió un volumen total de agua de 411,8 mm (4.118 m³/ha) y en T8 la lámina de riego fue 149,8 mm y el volumen total de agua fue 476,6 mm (4.766 m³/ha).

Finalmente con la aplicación del tratamiento de **riego de 50% de la ETc**, en T9 lamina de riego fue 107,2 mm y el volumen total aplicado fue 434,0 mm (4.340 m³/ha), en T10 lamina de riego fue 63,8 mm y el volumen total de agua fue 390,6 mm (3.906 m³/ha), en T11 lamina de riego fue 62,2 mm y el volumen total de agua fue de 389,0 mm (3.890 m³/ha), y finalmente en T12 lamina de riego aplicado fue 105,4 mm y el volumen total de agua aplicado fue 432,2 mm (4.322 m³/ha).

Al respecto FAO (2008), señala un rango para el cultivo de papa de 500 a 700 mm/ha de precipitación, distribuida en todo su ciclo vegetativo. Esto significa que el gasto de agua para una hectárea de papa sería entre 5.000 a 7.000 m³/ha.

Entonces los volúmenes totales aplicados en la presente investigación están por debajo del intervalo indicado a excepción del T1 y T4, pero estos valores de agua aplicada en los doce tratamientos responde a la estrategia del Riego Deficitario Controlado.

Considerando el cultivo de papa, durante la fase de emergencia el cultivo solo se mantuvo con los aportes de la precipitación efectiva más un riego realizado manualmente, el cual fue de 57,2 mm y luego en sus diferentes fases fenológicas recibió riego deficitario controlado diferenciado desde fase de desarrollo y crecimiento vegetativo hasta fase de madurez fisiológica.

La aplicación de riego deficitario controlado al cultivo de papa se iniciaron en 20 de noviembre de 2017 y concluyeron en 19 de marzo de 2018, donde se tuvo programado en todas las fases 18 eventos de riegos, con restricción hídrica de riego en fase desarrollo y crecimiento vegetativo se tuvo 13 eventos de riego, con riego deficitario controlado en fase tuberización y floración se tuvo programado 8 eventos riego y con riego deficitario controlado en fase madurez fisiológica se tuvo programado 15 eventos de riego, con una frecuencia de riego cada 7 días, de acuerdo a sus necesidades hídricas del cultivo.

Siendo que en algunos fechas no se hizo el riego debido a que las precipitación efectiva (Pe) fue mayor que la evapotranspiración de referencia (ET_o), reduciéndose la aplicación de riego en todas las fases a 12 riegos, con restricción hídrica en fase de desarrollo y crecimiento vegetativo 7 riegos, con restricción hídrica en fase de tuberización y floración 6 riegos y con restricción hídrica en fase madurez fisiológica 11 riegos, en diferentes oportunidades.

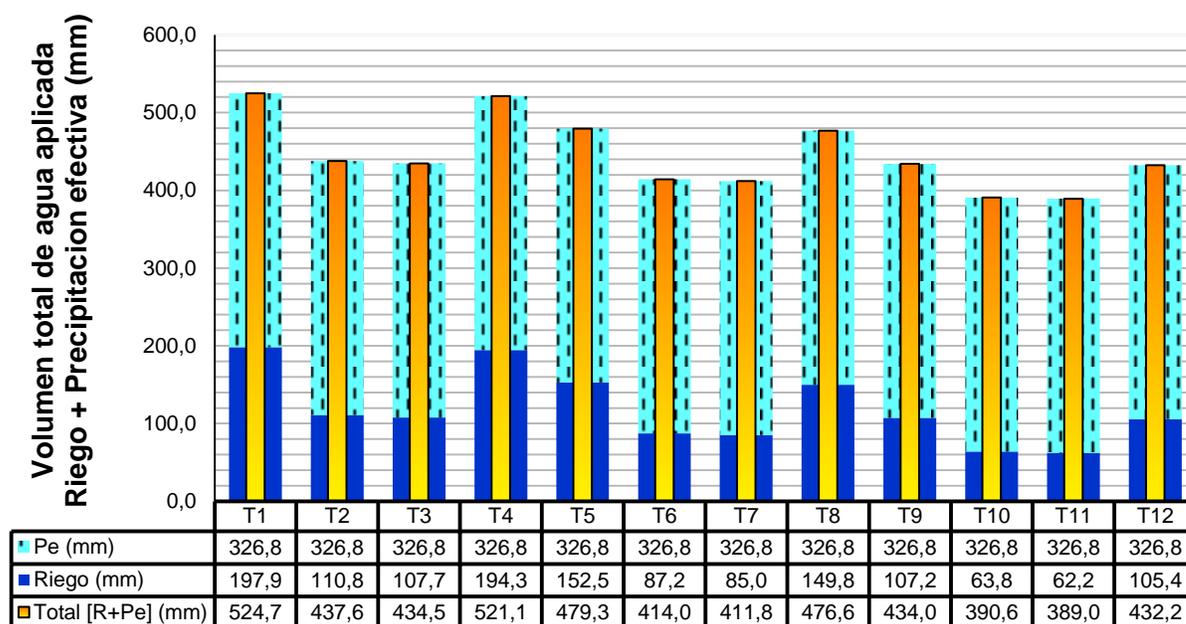


Figura 13. Volumen total de agua aplicada (Riego + Pe)

6.2 Contenido de humedad en el suelo

Durante el periodo de tiempo comprendido entre diciembre de 2017 a marzo de 2018, el contenido volumétrico de agua en el suelo fue medido con sonda FDR Diviner 2000 hasta una profundidad de 50 cm entre intervalos de 10 cm.

Se puede observar en las Figuras 14, 15 y 16, que la humedad existente en el suelo para los tres tratamientos (T1, T5 y T9) regados por tres láminas de riego de 100%, 75% y 50% ETc en todas las fases del cultivo de papa, se ha mantenido la humedad volumétrica (θ_v) en la zona del Agua Fácilmente Aprovechable (AFA) para el cultivo de papa, es decir se encuentra dentro del rango de Capacidad de Campo 36,3% y umbral de riego de 29,3%, dado que el AFA es la fracción de Agua Total Disponible (ADT) que un cultivo puede extraer de la zona radicular sin experimentar estrés hídrico (Allen *et al.*, 2006).

También se puede observar en los figuras los valores obtenidos de humedad del suelo a diferentes profundidades medido con sonda FDR Diviner 2000, nos muestra para 10 y 20 cm de profundidad el contenido de humedad del suelo es más reducido con valores de 27% a 35% y para 30, 40 y 50 cm profundidad, la humedad del suelo son muy notables con valores de 37% a 40%, es decir que a mayor profundidad existe más humedad. A su vez la parcela de investigación presento un suelo de clase textural franco arcilloso (FY) en sus dos horizontes, lo que permite que en sus poros haya más humedad.

Cabe destacar que no solo era por riego mantener la humedad del suelo en la zona de agua fácilmente aprovechable, sino también a partir del mes de enero el cultivo de papa presento cobertura completa y las precipitaciones que ocurrieron en los meses de enero y febrero de 2018, que fueron superiores a la evapotranspiración de referencia (ETo), lo que motivo que el contenido hídrico del suelo se mantuviera en la zona agua fácilmente aprovechable (AFA).

Al respecto Pardavé (2004), indica que las condiciones de humedad deben ser adecuadas para el suelo, esto con el objetivo de obtener mayor porcentaje de

emergencia de las plántulas y un normal desarrollo de la planta de papa. A su vez Montaldo (1984), indica que el cultivo de la papa crece mejor cuando la humedad del suelo se mantiene cerca de la capacidad de campo, para obtener altos rendimientos.

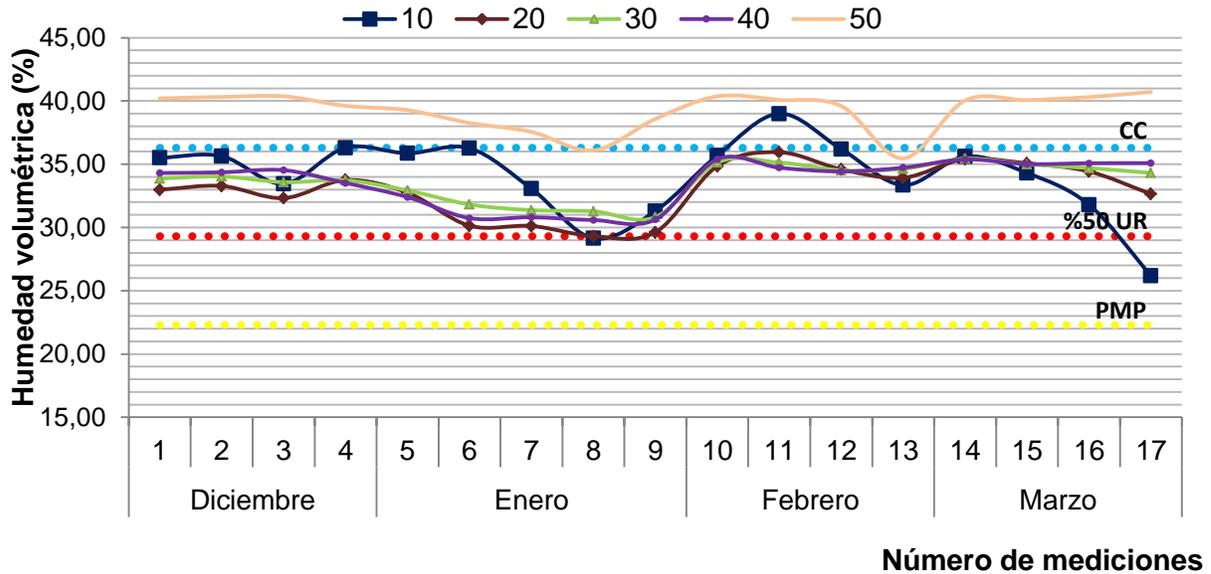


Figura 14. Variación de humedad volumétrica del suelo al 100% ETC

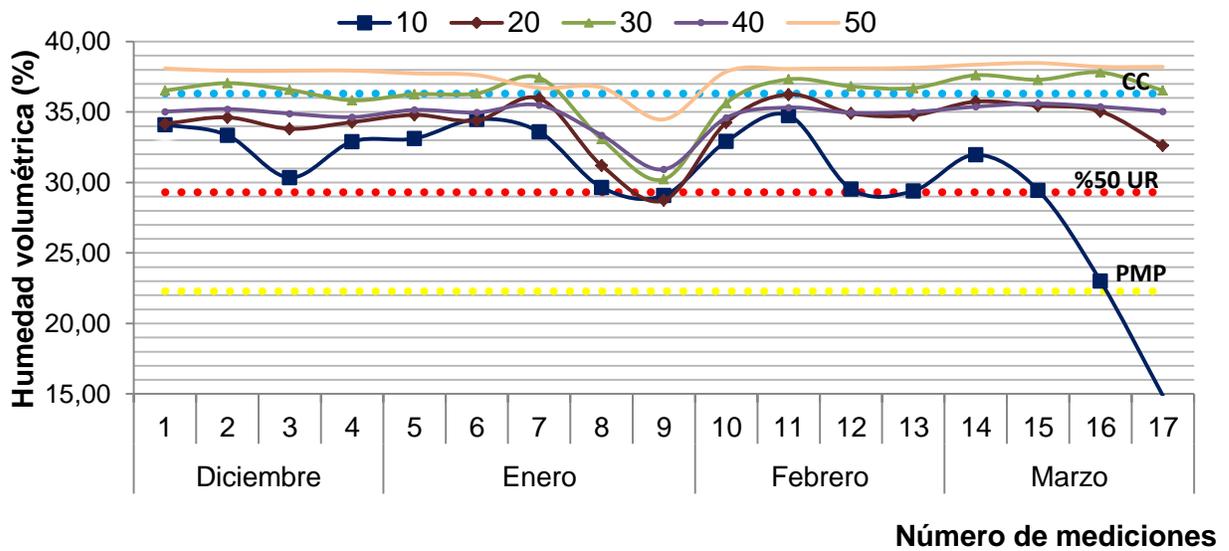


Figura 15. Variación de humedad volumétrica del suelo al 75% ETC

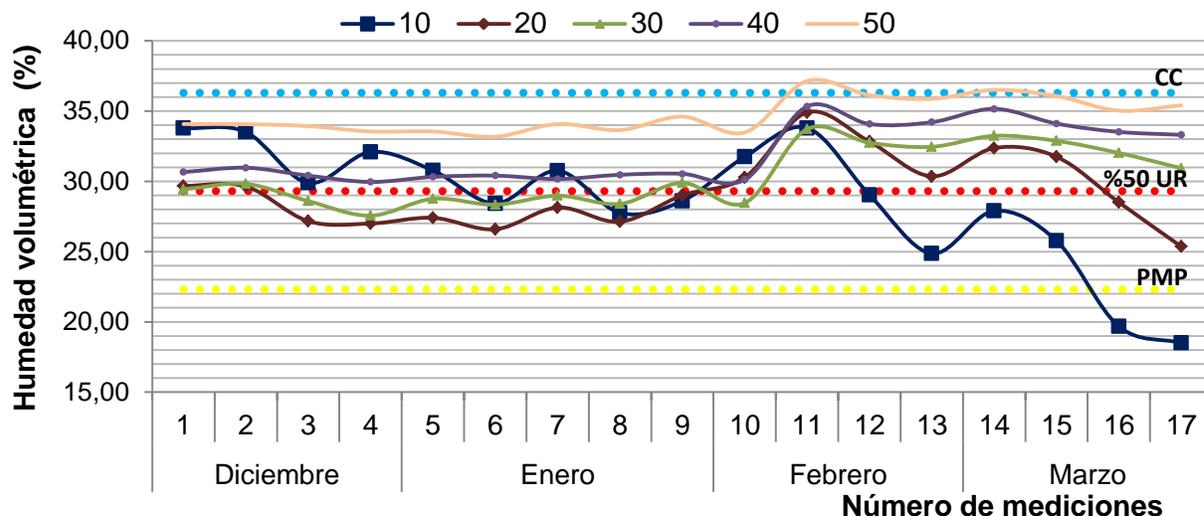


Figura 16. Variación de humedad volumétrica del suelo al 50% ETc

De lo contrario, Román y Hurtado (2002), señalan que los niveles bajos de humedad en el suelo afectan negativamente el rendimiento, tamaño y calidad de la papa. Al respecto Cullen y Wilson (1971), indican malformación de los tubérculos y menor crecimiento de las plantas cuando se tiene bajos niveles de humedad en el suelo.

También Pardavé (2004), indica la humedad excesiva, reduce la aireación y en consecuencia afecta al crecimiento de las raíces, estolones y los tubérculos, de ahí la importancia de la humedad del suelo durante el ciclo del cultivo. Por lo cual se puede indicar que las plantas, tuvo disponibilidad permanente de agua para su desarrollo.

Sin embargo, en relación a los valores de humedad descrito por Cuenca (1989), menciona para un suelo de textura franco arcilloso 36% CC y 20% PMP, por lo tanto la humedad del suelo obtenida en la investigación está en el rango permitido.

Finalmente lo que demuestra que el uso de esta tecnología sonda de capacitancia (FDR) y el monitoreo del clima en tiempo real (Estación Meteorológica), nos indica que se trata de herramientas indispensables para la toma de decisiones con respecto a la frecuencia y tiempos de riego, permitiéndonos así conservar el recurso hídrico, reducir los impactos ambientales, reducir costos y aumentando la rentabilidad de los cultivos agrícolas.

6.3 Potencial hídrico xilemático

Los datos obtenidos en campo para el potencial hídrico xilemático en la planta para los doce tratamientos corresponden a la medición en campo al medio día solar o potencial hídrico foliar mínimo (12:30 a 13:30 pm).

Recordemos que el potencial hídrico foliar medido al medio día o potencial hídrico foliar mínimo corresponde a la fuerza de extracción del agua del suelo por la planta con el máximo de Evapotranspiración potencial (ETP).

En la Figura 17, se presenta los valores de potencial hídrico xilemático en MPa para los doce tratamientos; el comportamiento del potencial hídrico xilemático se mantuvo en el rango entre los -0,4 a -0,7 MPa para todos los tratamientos. Esto explica, según Ferreyra (2006), porque las plantas presentan una fuerte regulación de las pérdidas de agua por transpiración, durante las horas de mayor demanda, lo que se manifiesten grandes diferencias entre los tratamientos de riego, salvo cuando el déficit son extremos.

Asimismo también se puede observar, que cuando la humedad del suelo es alta, el potencial hídrico xilemático se registró valores entre -0,11 a -0,35 MPa pues el cultivo no requiere retener con demasiada fuerza el agua en sus tejidos, es decir mayores valores de humedad producen menores valores de potencial hídrico; en cambio cuando la humedad del suelo es baja, el potencial hídrico xilemático registrado fue de -1 a -1,35 MPa, este valor correspondería a la fuerza máxima de extracción del agua del suelo por el cultivo.

Vacher y García (1990), en condiciones de riego en el altiplano boliviano obtuvieron el potencial hídrico foliar mínimo en cultivo de papa (*Solanum tuberosum ssp. andigena*) entre -0,6 a -0,8 MPa.

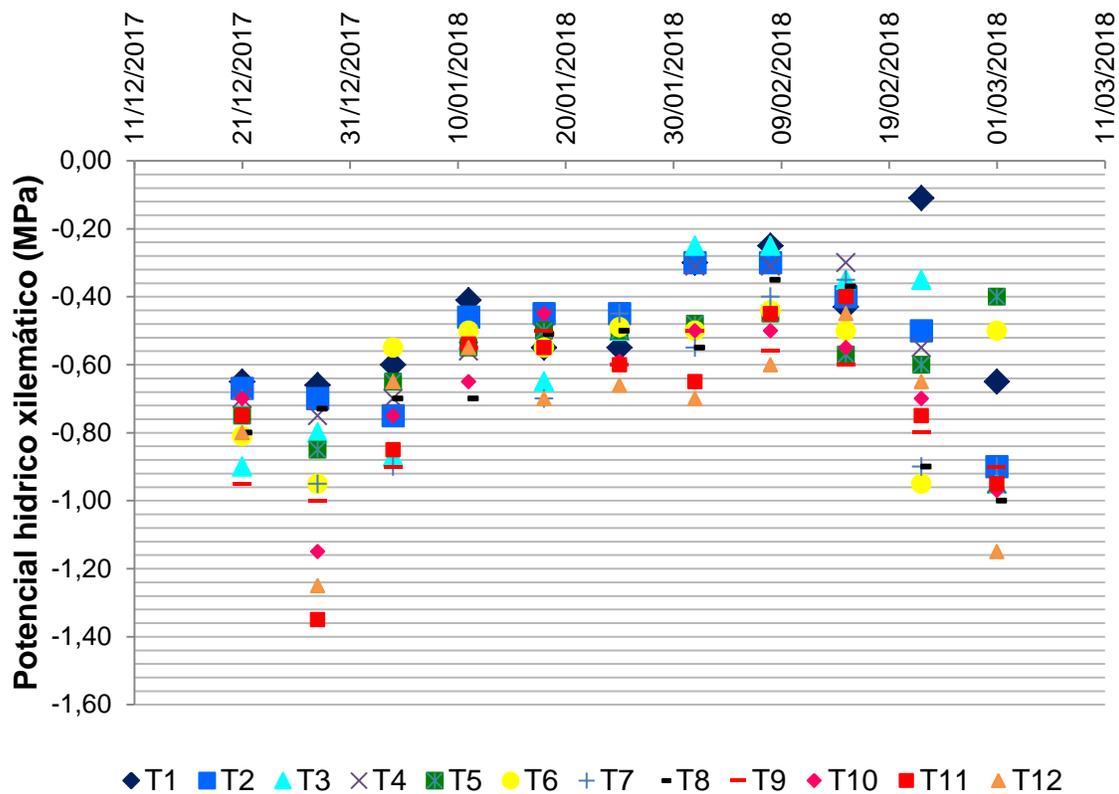


Figura 17. Potencial hídrico xilemático en los diferentes tratamientos

Además en la Figura 17, muestran que las plantas bien regadas con 100% ETc presentan valores de potencial xilemático a medio día de -0,11 a -0,65 MPa, mientras que las plantas con 75% de reposición hídrica de la ETc expresaron valores entre -0,7 a -0,9 MPa y en las plantas regadas con 50% ETc el potencial hídrico xilemático registrado es de -0,9 a -1,15 MPa.

Sin embargo Pino (2002), en correspondencia aplicando diferentes láminas de riego en cultivo de papa, obtuvo que el potencial hídrico xilemático se hizo más negativo a menor riego, con valores de 0,59 MPa con 100% de riego y de -1,15 MPa con 25% de riego.

Rolando *et al.* (2015), reportan como el punto de marchitez permanente del suelo para plantas de papa, cuando el potencial hídrico foliar es -1,6 MPa.

6.4 Temperatura de la hoja

En las Figuras 18, 19 y 20, se muestran la comparación de temperatura del cultivo (T_c) respecto a la temperatura del aire (T_a), se pudo observar que los tratamientos que se encuentran dentro de cada lamina de riego 100%, 75% y 50% de ET_c , los tratamientos se mantuvieron $T_c < T_a$ por lo que estuvieron en condiciones hídricas adecuadas para su desarrollo.

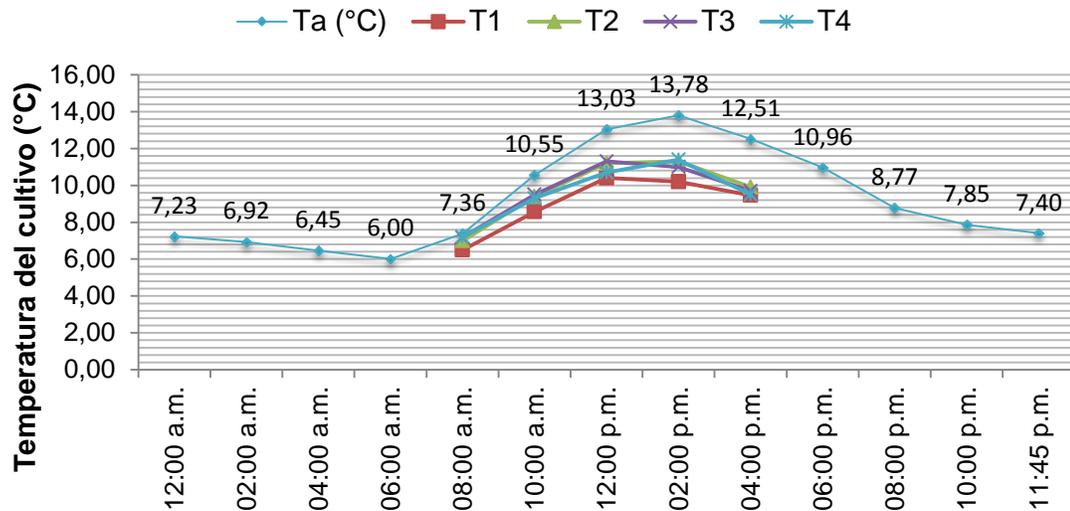


Figura 18. Variación de temperatura del aire vs temperatura del cultivo al 100% ET_c

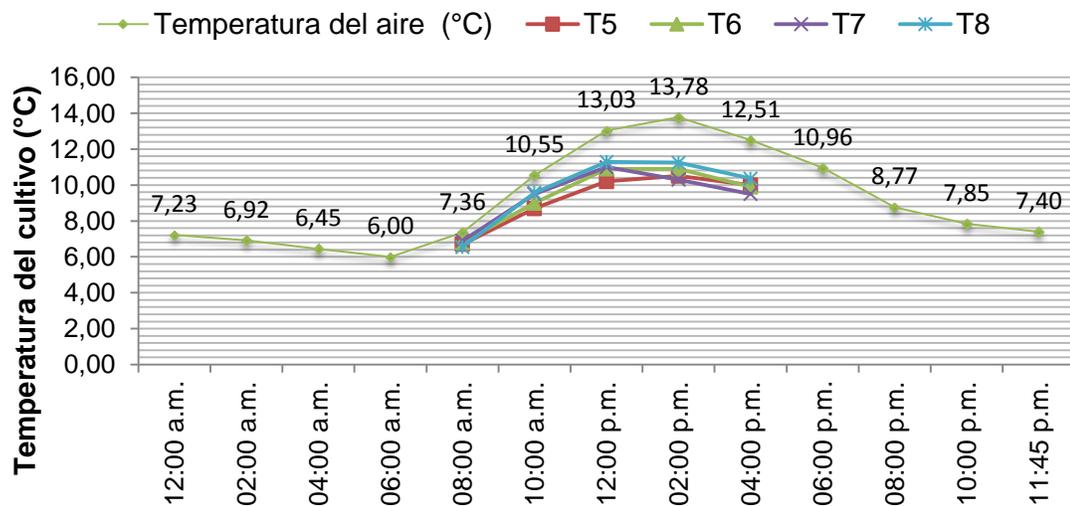


Figura 19. Variación de temperatura del aire vs temperatura del cultivo al 75% ET_c

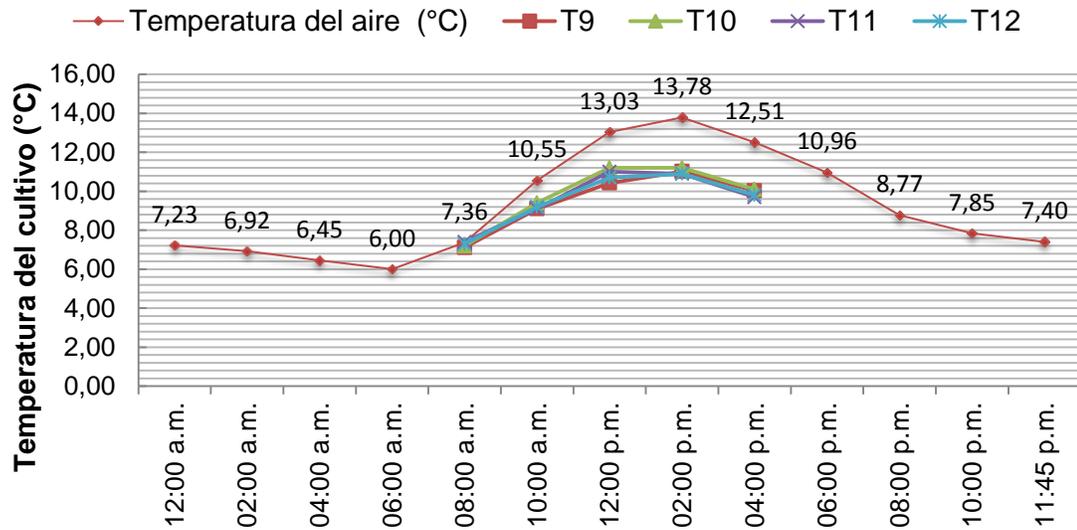


Figura 20. Variación de temperatura del aire vs temperatura del cultivo al 50% ETc

Se puede observar también en los gráficos que las temperaturas altas se encuentran en los horarios de 12:00 a 14:00 p.m. registrándose el valor máximo 13,8 °C y mínimo 6°C para la temperatura del ambiente, en cuanto los valores máximos y mínimos de temperatura del cultivo registrados para los tratamientos oscila de 11,5 °C a 6,4 °C, donde la temperatura de la hoja fue menor a la temperatura del ambiente ($T_c < T_a$) no hubo estrés en las plantas del cultivo. En cuanto a los valores de la **diferencia de temperatura de cultivo y aire**, se pudo observar en los tratamientos un valor máximo de 3,6°C y un valor mínimo de 2,6°C.

Al respecto López *et al.* (2009), mencionan cuando una planta transpira sin estrés hídrico la temperatura de la hoja esta entre 1 a 4°C menor que la temperatura del ambiental; en este caso el Índice de Estrés Hídrico del Cultivo (CWSI) es cero y cuando la temperatura de la hoja, sube asciende más que la temperatura del aire en este caso 4 a 6°C; el déficit hídrico es alto, la transpiración de las hojas se ve drásticamente reducida con el incremento de la temperatura foliar, cuando la planta está muerta o no transpira durante mucho tiempo el CWSI es 1.

También Preston (1992), menciona que el cultivo bien irrigado transpira a su potencial máximo, con el resultado de que la temperatura de foliar sea más baja que la temperatura del aire.

6.5 Altura de planta

En el Cuadro 14, se presenta los resultados del análisis de varianza para la variable altura de planta que corresponde al máximo crecimiento alcanzado por la planta en fase de floración, se observa que no existen diferencias significativas (ns) estadísticamente entre los bloques, láminas de riego, fases fenológicas, e interacción láminas de riego por fases fenológicas. En cuanto al coeficiente de variación se tiene 12,80%, indica que los datos obtenidos en campo son confiables.

Cuadro 14. Análisis de varianza para altura de planta (cm)

F.V.	G.L.	S.C.	C.M.	F	p-valor	sig.
Bloque	2	6,09	3,04	0,03	0,9745	ns
Láminas de Riego	2	119,99	59,99	0,51	0,634	ns
Bloque*Láminas de Riego	4	468,96	117,24			
Fases Fenológicas	3	101,15	33,72	0,28	0,8328	ns
LR*FF	6	193,9	32,32	0,28	0,9405	ns
Error	18	2100,22	116,68			
Total	35	2990,3				

C.V. = 12,80%

En la Figura 21, se presenta la altura de planta para cada tratamiento con aplicación de riego deficitario controlado en fases fenológicas, se tiene que el tratamiento T1 con aplicación de lámina de riego de 100% de Evapotranspiración de cultivo (ETc) en todas las fases fue el que mayor crecimiento de planta obtuvo con un valor de 91 cm, y el tratamiento T11 con aplicación de lámina de riego de 50% de ETc, con restricción hídrica de riego en la fase de tuberización y floración, hubo un menor crecimiento de planta de 79,10 cm de altura.

Al respecto Canqui y Morales (2009), indican que un cultivo de papa crece de 0,5 a 1 m de altura. Se observa en la mayoría de los tratamientos se obtuvieron mayores alturas

relativamente similares y se puede indicar que se encuentran dentro del rango para esta variable, entonces se puede afirmar que el desarrollo de la planta tuvo respuestas favorables a la aplicación de riego deficitario, y al ser favorecidos con la precipitación pluvial y fotoperiodo.

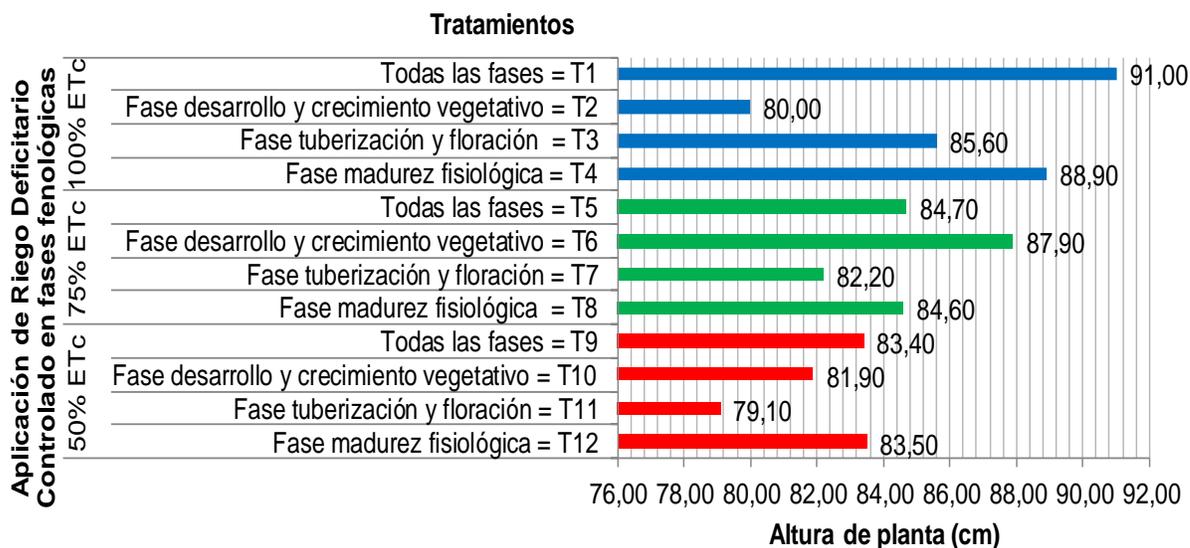


Figura 21. Altura de planta de los tratamientos

Sin embargo Gil *et al.* (2003), mencionan que el crecimiento vegetativo de un cultivo, puede modificarse mediante la aplicación de riegos de alta frecuencia, esto no se traduce en una mayor productividad, ni aumento de las variables de estudio del cultivo.

Al respecto FAO (1989), indica que se pueden obtener buenos resultados en el crecimiento vegetativo si se aplican elementos nutritivos al riego (fertirrigación), que influyen en el rendimiento del cultivo siendo las más importantes características físicas químicas del suelo. También Choque *et al.* (2007), indican que las condiciones medio ambientales, son determinantes en relación al crecimiento de las plantas.

Al respecto Antezana (2001), indica que el exceso de humedad y la disponibilidad de nutrientes en el sustrato pueden influir en el desarrollo y crecimiento de las plantas.

6.6 Número de tubérculos por planta

En el Cuadro 15, se muestra el análisis de varianza para el número de tubérculos por planta, se observa que no existen diferencias estadísticas para láminas de riego e interacción de láminas de riego por fases fenológicas, si existe diferencias significativas en cuanto a fases fenológicas (factor B), esto indica que las fases fenológicas muestran diferencias en número de tubérculos por planta, a un nivel de 5% de probabilidad, por lo tanto se realizó la prueba de Duncan para determinar entre que fases fenológicas existen diferencias. Con un coeficiente de variación de 19,98%, indica una confiabilidad en el manejo de los datos obtenidos en campo.

Cuadro 15. Análisis de varianza para número de tubérculo por planta

F.V.	G.L.	S.C.	C.M.	F	p-valor	sig.
Bloque	2	416,72	208,36	3,25	0,1451	ns
Láminas de riego	2	202,39	101,19	1,58	0,3124	ns
Bloque*Láminas de Riego	4	256,44	64,11			
Fases Fenológicas	3	209,89	69,96	3,83	0,0278	*
LR*FF	6	154,28	25,71	1,41	0,2654	ns
Error	18	328,83	18,27			
Total	35	1568,56				

C.V. = 19,98%

En el Cuadro 16, se muestra la prueba de Duncan al 5% de fases fenológicas de papa, donde muestra que existen dos grupos bien diferenciados, el primero formado por todas las fases y el segundo formado por fase de desarrollo y crecimiento vegetativo, fase de madurez fisiológica y fase de tuberización y floración.

Cuadro 16. Comparación de medias, número de tubérculos por planta

Fases Fenológicas (FF)	Medias	Prueba Duncan $\alpha=0,05$
Todas las fases	25	A
Fase desarrollo y crecimiento vegetativo	20	B
Fase madurez fisiológica	20	B
Fase tuberización y floración	19	B

Según la comparación de medias en la Figura 22, se puede apreciar los valores promedios de fases fenológicas, según los resultados obtenidos en todas las fases

consiguió mayor número de tubérculos por planta con (25 unidades) estadísticamente diferente de los demás fases, por otra parte se determinó que estadísticamente la fase de desarrollo y crecimiento vegetativo, fase de madurez fisiológica y fase de tuberización y floración han demostrado ser iguales, estadísticamente, habiendo alcanzado una media de (20, 20 y 19 unidades de numero de tubérculos por planta).

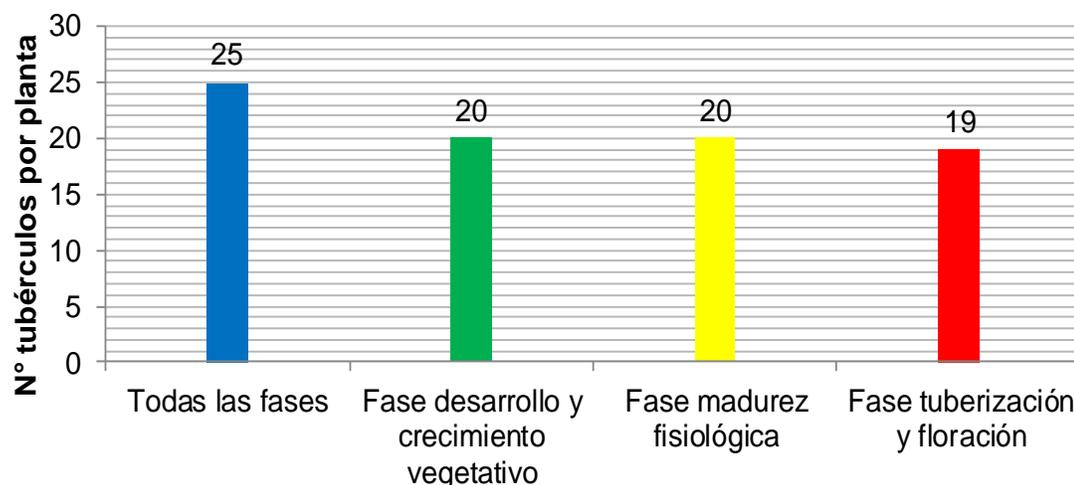


Figura 22. Promedio de número de tubérculos por planta de las fases fenológicas

En la Figura 23, se observa la variación de números de tubérculos por planta que tuvieron en los diferentes tratamientos, se puede indicar que el mayor número de tubérculos de papa fue alcanzado en el tratamiento T1 con 30 unidades de tubérculos de papa con aplicación de lámina de riego de 100% ETc en todas las fases, y el menor número de tubérculos de papa se registró en el tratamiento T10 con 15 unidades de tubérculos de papa con aplicación de riego deficitario de 50% ETc, con restricción hídrica de riego en fase de desarrollo y crecimiento vegetativo. Estas diferencias de promedios se atribuyen a los diferentes niveles de riegos aplicados al cultivo de papa.

Sin embargo el tratamiento que permite obtener el mayor número de tubérculos por planta, fue con la aplicación de lámina de riego 100% ETc en todas las fases. De ello se deduce que para la producción obtenida de papa, el número de tubérculos cosechados por planta se incrementa a medida que aumenta la lámina de riego.

De acuerdo con Yuan *et al.* (2003) indican, que el incremento de riego aumenta el número y peso medio de los tubérculos. Esto genero un desarrollo mayor en la altura y cobertura foliar que consiguientemente produjeron una mejor fotosíntesis o producción de materia seca, que derivo en la formación de mayor número de estolones y estos para formar los tubérculos.

Al respecto Coca (2000), señala que en promedio es encuentran entre 16 a 30 tubérculos/planta en condiciones del altiplano. Si esta observación se toma como parámetro de comparación, si superaron en la mayoría el valor mínimo (16 tubérculos) en la investigación.

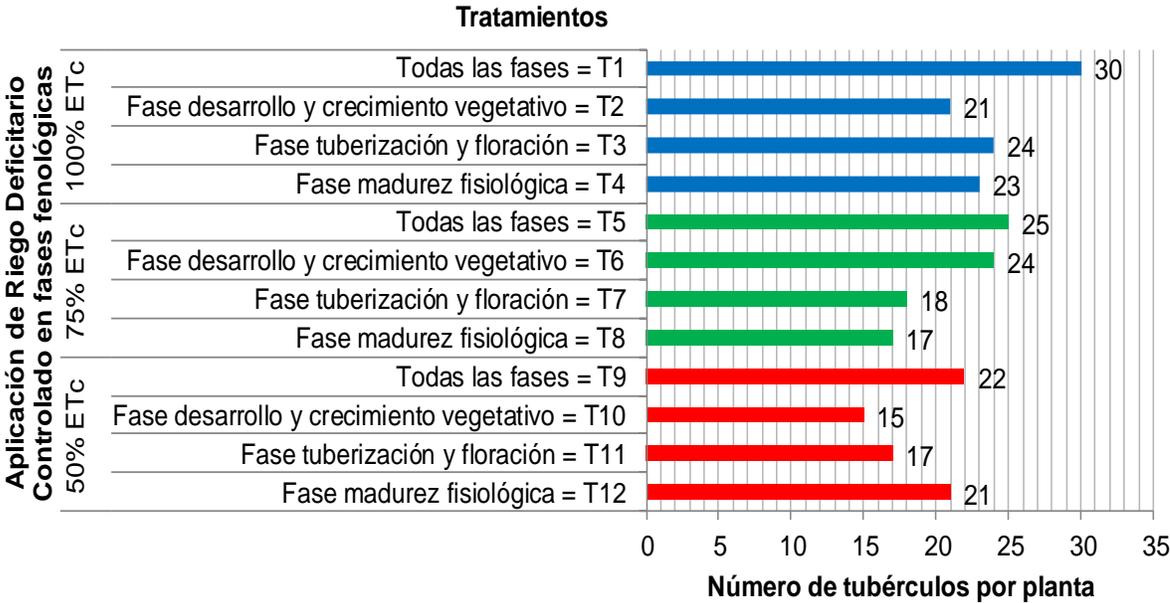


Figura 23. Promedio de número de tubérculos por planta en tratamientos

Por su parte Hernández (2001), señala el incremento de raíces y estolones esta acondicionado por la humedad del suelo y la disponibilidad de nutrimentos.

6.7 Peso de los tubérculos por planta

En el Cuadro 17, se muestra el análisis de varianza para el peso de tubérculos por planta, el cual indica que existen diferencias estadísticas para láminas de riego y

diferencias altamente significativas en fases fenológicas, a un nivel de probabilidad de 5%, por lo que se realizó una comparación de medias, para ver la significancia entre ellos. Mientras la interacción láminas de riego por fases fenológicas no fue significativa lo cual indica que cada factor tuvo un efecto independiente. En cuanto al coeficiente de variación fue de 10,20%, que nos indica que los datos obtenidos en campo son confiables y el cual se encuentra dentro de los parámetros estadísticos de aceptación, en investigación agrícola.

Cuadro 17. Análisis de varianza para peso de los tubérculos por planta

F.V.	G.L.	S.C.	C.M.	F	p-valor	sig.
Bloque	2	14913,83	7456,91	0,28	0,7698	ns
Láminas de riego	2	698090,73	349045,37	13,08	0,0176	*
Bloque*Láminas de Riego	4	106727,26	26681,81			
Fases Fenológicas	3	297657,19	99219,06	8,89	0,0008	**
LR*FF	6	99009,1	16501,52	1,48	0,2408	ns
Error	18	200782,13	11154,56			
Total	35	1417180,24				

C.V. = 10,20%

En el Cuadro 18, se muestra la prueba de Duncan al 5% de probabilidad nos muestran que las láminas de riego presentaron diferencias estadísticamente significativas en cuanto al peso de tubérculos por planta, donde se llegó a determinar que existen dos grupos bien diferenciados, el primero formado por láminas de riego de 75% y 100% ETc y el segundo formado por lamina de riego de 50% ETc.

Cuadro 18. Comparación de medias, peso de tubérculos por planta

Láminas de Riego	Medias	Prueba Duncan ($\alpha=0,05$)
75% ETc	1140,48	A
100% ETc	1127,77	A
50% ETc	838,93	B

En ese sentido, según la comparación de medias en la Figura 24, se puede apreciar que las láminas de riego al 75% y 100% ETc, han demostrado ser los mejores y estadísticamente iguales, donde nos permite obtener peso de tubérculos por planta promedio de 1.140,48 g y 1.127,77 g, mientras con la aplicación de lámina de riego al

50% ETc, ha demostrado ser el peor, habiendo alcanzado en promedio 838,93 g por planta de peso total y deduciendo que existe influencia en las láminas de riego aplicadas en los diferentes tratamientos.

Estas diferencias de peso de tubérculos por planta pueden ser debido a la aplicación de distintos regímenes hídricos, también en el desarrollo del cultivo pudo haber influido la aplicación de extracto de banano que contiene nutrientes como el potasio y calcio, que es el principal elemento responsable de la movilización del almidón desde las hojas hacia el tubérculo es el potasio, de tal forma que un alto contenido de este nutriente es decisivo para la obtención de alto rendimiento y calidad (TODOPAPA, 2008)

El mismo menciona que el cultivo de papa es altamente demandante del nutriente potasio, por lo tanto la disponibilidad de este nutriente en el suelo debe contar con el apoyo de la fertilización foliar en la planta del cultivo.

En consecuencia con la aplicación de lámina de riego de 50% ETc presento menor peso de tubérculos por planta, esto posiblemente debido a la aplicación de RDC en cultivo de papa.

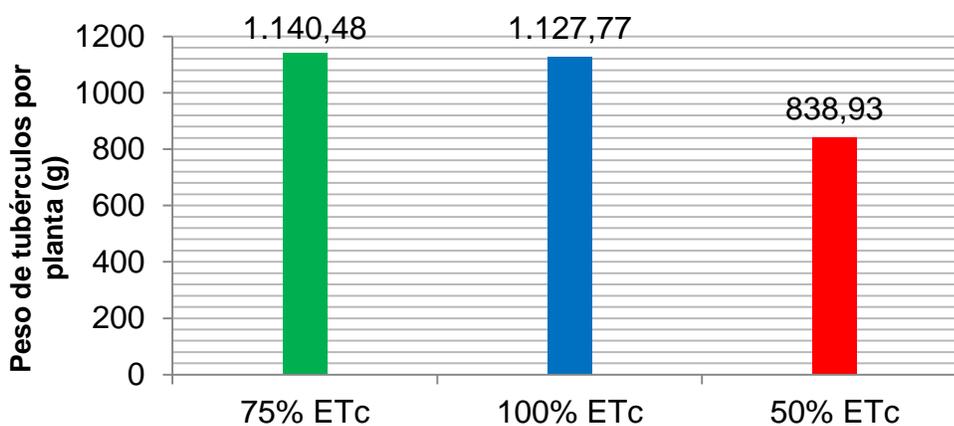


Figura 24. Promedio de peso de tubérculos por planta, láminas de riego

En el Cuadro 19, mostrando la prueba de Duncan al 5% para el peso de tubérculos por planta con relación al factor fases fenológicas.

Cuadro 19. Comparación de medias, peso de tubérculos por planta

Fases Fenológicas (FF)	Medias	Prueba Duncan ($\alpha=0,05$)
Fase desarrollo y crecimiento vegetativo	1130,97	A
Todas las fases	1118,97	A
Fase madurez fisiológica	970,41	B
Fase tuberización y floración	922,56	B

Según el Cuadro 19, la prueba de Duncan al 5%, indica que existen diferencias significativas sobre el peso de tubérculos por planta, donde se llegó a observar dos grupos estadísticamente diferentes, el primero formado por fase de desarrollo y crecimiento vegetativo y todas las fases y el segundo grupo formado por fase de madurez fisiológica y fase de tuberización y floración.

Según la Figura 25, se puede apreciar que en la fase de desarrollo y crecimiento vegetativo y todas las fases son los mejores y estadísticamente iguales, con un promedio de 1.130,97 y 1.118,97 g/planta, mientras que en fase de madurez fisiológica y fase de tuberización y floración han demostrado ser iguales, estadísticamente, habiendo alcanzado una media de 970,41 y 922,56 g/planta.

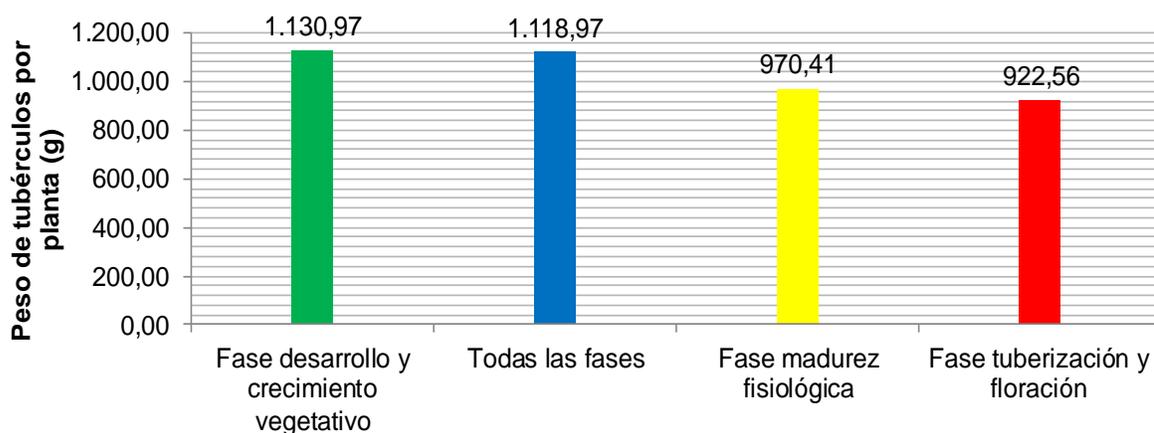


Figura 25. Promedio de peso de tubérculos por planta, fases fenológicas

De los resultados observados en la Figura 25, la fase de desarrollo y crecimiento vegetativo tuvo un mayor peso de tubérculos por planta. El peso de tubérculos por planta que pudo deberse que el riego, nutrientes que incidieron directamente sobre la fisiología de la planta.

Se restringió el riego en la fase de desarrollo y crecimiento vegetativo, para someter a un estrés hídrico, por consiguiente, el contenido de humedad del suelo fue disminuyendo progresivamente, el cual no afectó al peso de tubérculos por planta, que en sus respectivos fases fenológicas recibieron un riego deficitario controlado 25% menos de la reposición hídrica.

En la Figura 26, se muestra el promedio del peso de tubérculos por planta con la aplicación de riego deficitario controlado en las fases fenológicas para los doce tratamientos.

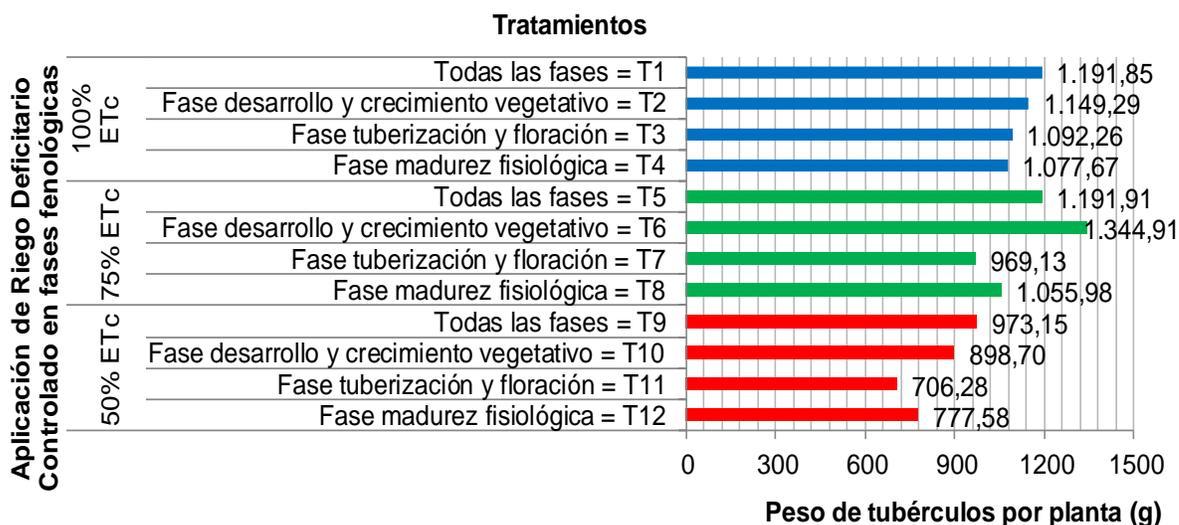


Figura 26. Peso de tubérculos por planta en los tratamientos

En la Figura 26, se puede indicar que el T1 con un nivel de riego del 100% ETC sin restricción hídrica de riego en todas las fases tuvo un peso de tubérculo por planta de 1.191,85 g, seguidamente el T6 con un nivel de riego del 75% ETC con restricción hídrica de riego en fase de desarrollo y crecimiento vegetativo se obtuvo un peso de

tubérculos por planta de 1.344,91 g y finalmente el T9 con un nivel de riego del 50% ETc en todas las fases tuvo un peso de tubérculos por planta de 973,15 g.

Sin embargo, el tratamiento que permite obtener mayor peso en tubérculos por planta, fue con la aplicación de lámina de riego 75% ETc, con restricción hídrica de riego en la fase de desarrollo y crecimiento vegetativo de la fase fenológica del cultivo de papa. Y también puede estar relacionado con la disponibilidad de nutrientes en el suelo. Al respecto Pardavé (2004), indica que el potasio incrementa la eficacia en la elaboración y movilización de azúcares y almidones a los tubérculos incrementando así su tamaño.

El peso de tubérculos sea posiblemente a la aplicación suplementaria de biol, extracto de banano a todos los tratamientos en la misma cantidad, los cuales ayudaron al desarrollo de los tubérculos (Cortes, 1981).

Este punto, coincidiría con lo afirmado por Suquilanda (1984) quien indica que luego de la floración los riegos deben aplicarse cada 8 a 10 días por requerir el cultivo más agua para producir una mayor cosecha, ya que el agua es destinada por la planta en su mayor parte a los tubérculos.

6.8 Rendimiento total

En el Cuadro 20, se presenta los resultados del análisis de varianza (ANVA) para el rendimiento total de los tratamientos en estudio.

Los resultados nos indican que existen diferencias significativas para láminas de riego y diferencias altamente significativas para fases fenológicas, esto nos indica, que las láminas de riego y fases fenológicas muestran diferencias en rendimiento, a un nivel de 5% de probabilidad, por lo tanto se realizó la prueba de Duncan para determinar entre que láminas de riego y fases fenológicas existen diferencias.

Sin embargo en la interacción láminas de riego (LR) por fases fenológicas (FF) no fue significativa (ns) lo cual indica que cada factor tuvo un efecto independiente en los resultados obtenidos.

El coeficiente de variación fue de 10,19%, indica que los valores registrados en la evaluación del ensayo son confiables.

Cuadro 20. Análisis de varianza para el rendimiento total (kg/m²)

F.V.	G.L.	S.C.	C.M.	F	p-valor	sig.
Bloque	2	0,25	0,13	0,27	0,7755	ns
Láminas de riego	2	12,17	6,09	13	0,0178	*
Bloque*Láminas de Riego	4	1,88	0,47			
Fases Fenológicas	3	5,2	1,73	8,98	0,0007	**
LR*FF	6	1,73	0,29	1,49	0,2364	ns
Error	18	3,48	0,19			
Total	35	24,71				

C.V. = 10,19%

En el Cuadro 21, se muestra la prueba de Duncan al 5% para el rendimiento con relación a las láminas de riego.

Cuadro 21. Comparación de medias, rendimiento total

Láminas de Riego	Medias	Prueba Duncan ($\alpha=0,05$)
75% ETc	4,75	A
100% ETc	4,70	A
50% ETc	3,49	B

Según el Cuadro 21, la prueba de Duncan al 5%, se observan dos grupos estadísticamente diferentes, el primero formado por láminas de riego al 75% y 100% ETc donde no se produjeron diferencias significativas y el segundo grupo formado por lámina de riego al 50% ETc.

Por lo tanto los resultados presentados en el Cuadro 21 y Figura 27, se evidencia que el 75% y 100% ETc de láminas de riego fueron los mejores y estadísticamente similares, es decir, con la aplicación de 75% y 100% ETc de láminas de riego nos permiten obtener rendimientos en promedio de 4,75 kg/m² (47,5 t/ha) y 4,70 kg/m² (47,0 t/ha), mientras con la aplicación de 50% ETc de lámina de riego fue menor en el rendimiento, habiendo alcanzado en promedio 3,49 kg/m² (34,9 t/ha).

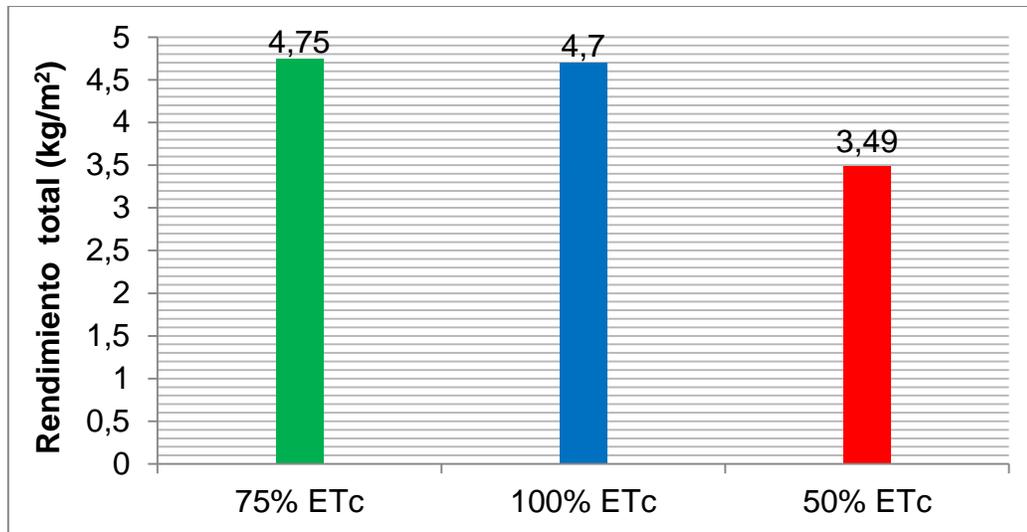


Figura 27. Promedio de rendimiento, láminas de riego

Esta variación en el rendimiento se atribuye a la aplicación de los diferentes niveles de riego, ya que, con la aplicación de láminas de riego 75% y 100% ETc se obtuvieron los mejores resultados en el rendimiento, que a diferencia con la aplicación de lámina de riego al 50% ETc, el suministro de agua, aparentemente no fue el adecuado para el desarrollo del cultivo.

Estos resultados obtenidos en la investigación no coinciden con los resultados obtenidos por Mamani (2017) en riego deficitario controlado en cultivo de papa variedad huaycha, aplicando los mismos niveles de riego, obtuvo rendimientos de 4,112 kg/m² (41,12 t/ha); 3,980 kg/m² (39,80 t/ha) y 2,862 kg/m² (28,62 t/ha). Esta diferencia probablemente se debe a las diferentes texturas del suelo, distinta distribución de la precipitación pluvial y contenido de humedad en el perfil del suelo.

El rendimiento del cultivo en suelos sin riego es inferior que el cultivo bajo empleo de riego, esto influye en general que en la conservación de la humedad y mejorando la estructura del suelo.

En el Cuadro 22, según la prueba de Duncan al 5%, se presenta la comparación de media para el rendimiento total con relación a fases fenológicas, los resultados nos

indican dos grupos bien diferenciados estadísticamente, el primero grupo formado por fase de desarrollo y crecimiento vegetativo, y todas las fases y el segundo grupo formado por fase de madurez fisiológica y fase de tuberización y floración.

Cuadro 22. Comparación de medias, rendimiento total

Fases Fenológicas (FF)	Medias	Prueba Duncan ($\alpha=0,05$)
Fase desarrollo y crecimiento vegetativo	4,71	A
Todas las fases	4,66	A
Fase madurez fisiológica	4,04	B
Fase tuberización y floración	3,84	B

Como se puede observar en el Cuadro 22 y Figura 28, el fase de desarrollo y crecimiento vegetativo, y todas las fases fueron los mejores y similares, que permitieron obtener un rendimiento promedio de 4,71 kg/m² (47,1 t/ha) y 4,66 kg/m² (46,6 t/ha) en comparación a fase de madurez fisiológica y fase de tuberización y floración habiendo alcanzado una media de 4,04 kg/m² (40,4 t/ha) y 3,84 kg/m² (38,4 t/ha) de rendimiento de papa, demostrado ser iguales estadísticamente. Sin duda, los valores que estas variables manifestaron, fueron influenciados por factores climáticos, humedad del suelo y por las restricciones hídricas en diferentes fases fenológicas que fueron realizadas en el estudio.

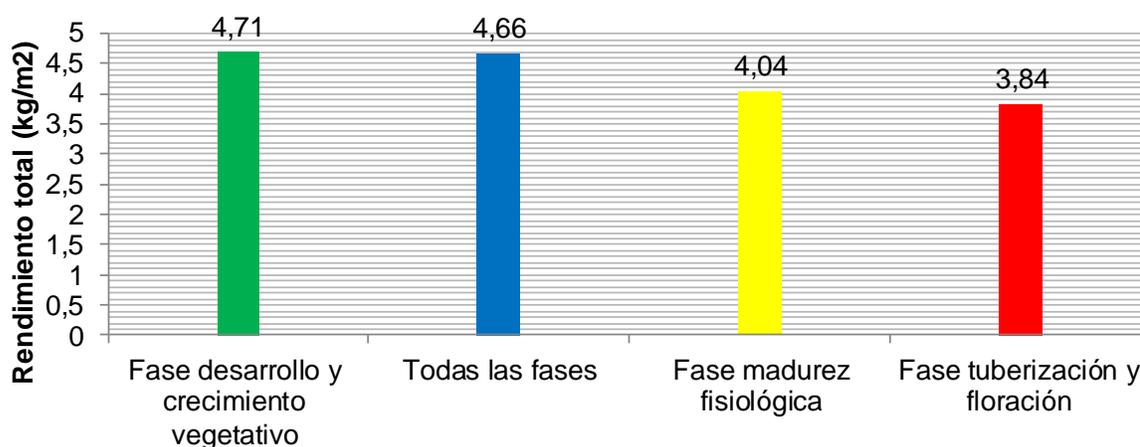


Figura 28. Promedio de rendimiento total de las fases fenológicas

En la Figura 29, se muestra el promedio del rendimiento obtenido para los doce tratamientos.

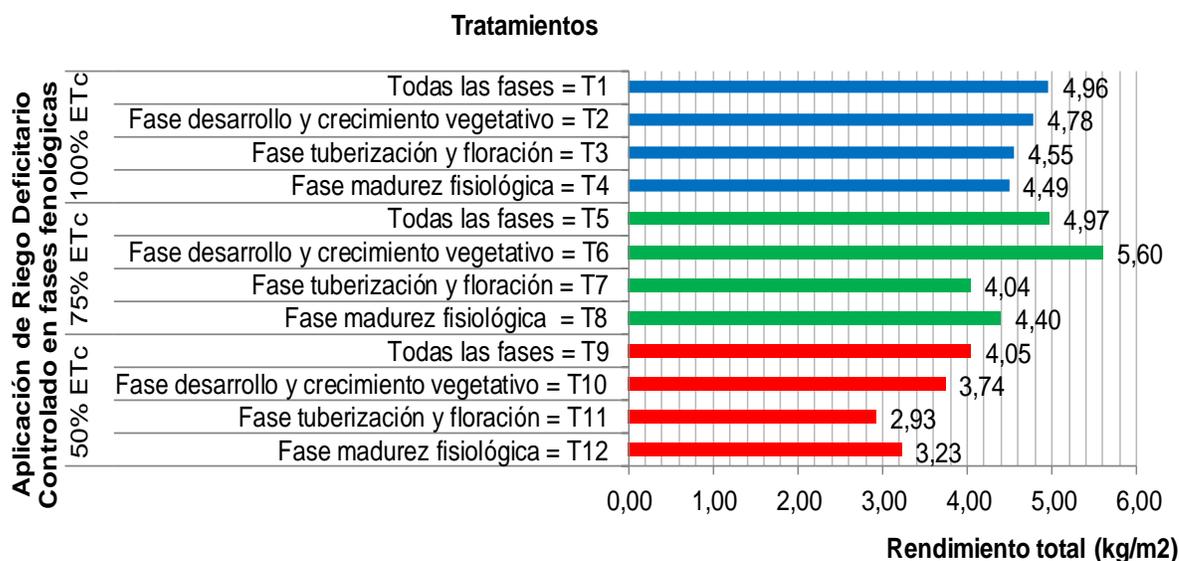


Figura 29. Rendimiento de tubérculos en los tratamientos

Según la Figura 29, observa claramente que hay diferencia en cuanto a rendimientos obtenidos en los diferentes tratamientos, con la aplicación de riego deficitario controlado en diferentes fases del cultivo de papa. Se puede indicar que el T1 con un nivel de riego del 100% ETc sin restricción hídrica de riego en todas las fases del cultivo tuvo una producción de 4,96 kg/m² (49,6 t/ha), seguidamente el T6 con un nivel de riego del 75% ETc, con restricción hídrica de riego en fase de desarrollo y crecimiento vegetativo se obtuvo una mejor producción de 5,60 kg/m² (56,0 t/ha) y finalmente el T9 con un nivel de riego del 50% ETc, sin restricción hídrica de riego en todas las fases se tuvo una producción de 4,05 kg/m² (40,5 t/ha).

Sin embargo, el tratamiento que permite obtener mayor rendimiento de papa, fue con la aplicación de lámina de riego de 75% ETc, en fase de tuberización y floración y madurez fisiológica con restricción hídrica de riego en fase de desarrollo y crecimiento vegetativo del cultivo de papa, cumpliendo la estrategia de riego deficitario controlado de minimizar los aportes hídricos sin que afecte al rendimiento.

Al respecto Figueredo (2018), al evaluar Riego Deficitario Controlado en el cultivo de papa variedad huaycha realizado en la Estación Experimental de Choquenaira, reporto promedios del rendimiento de 50, 64 y 46 t/ha, con láminas de riego 100, 75 y 50% ETc. Por otro lado también, en su tesis de investigación realizada en la variedad huaycha por Mamani (2017) en riego deficitario controlado aplicando los mismos tratamientos de láminas de riego, obtuvo rendimientos de 41,12 ; 39,80 y 28,62 t/ha, resultados que no tienen relación con el presente estudio de investigación.

Esta variación en los rendimientos del cultivo de papa probablemente se debe a las diferentes prácticas de manejo de cultivo, épocas de siembra, texturas del suelo y distinta distribución y volúmenes de las precipitaciones pluviales. Pero si se demuestran que los rendimientos de papa huaycha bajo una programación de riego aumentan sustancialmente respecto al cultivo a secano.

Para la variedad de huaycha utilizadas en el altiplano boliviano, de acuerdo al MDRyT-INIAF (2016), los rendimientos obtenidos a nivel agricultor están alrededor de 18 a 20 t/ha y a nivel experimental con riego esta variedad supera los 30 t/ha.

Entonces los rendimientos obtenidos en campo dependen de muchos factores, Patiño (2000), indica que el rendimiento está muy relacionado con la época de siembra, calidad de semilla, densidad, variedad empleada, niveles de fertilización y control fitosanitario. Al respecto Antezana (2001), también indica que los mayores rendimientos dependen de factores como en el suelo y clima que sean adecuados.

También Ministerio de Agricultura (2012), indica los rendimientos dependen del nivel de tecnología usada, principalmente por el uso de semilla certificada, variedades mejoradas, fertilización, adecuadas practicas agronómicas, riego tecnificado, y control efectivo de plagas y enfermedades, así como otros factores.

En conclusión, se puede indicar que rendimientos aceptables se dan cuando hay un estrés hídrico moderado en la fase de emergencia y en la fase de desarrollo y crecimiento vegetativo del cultivo; se debe evitar estrés hídrico en la etapa o fase de

tuberización y floración es decir en el llenado de tubérculos que podría reflejarse obteniendo menores rendimientos.

6.9 Eficiencia de uso del agua (EUA)

En la Cuadro 23, se presenta la eficiencia de uso del agua (E.U.A.), en relación al rendimiento total obtenido para los doce tratamientos, sometidos a tres láminas de riego (100%, 75% y 50% ETc). Cabe resaltar que los índices de EUA, se determinó en base al rendimiento total obtenida y el agua total aplicada (riego más precipitación efectiva en todo el ciclo del cultivo de papa).

Cuadro 23. Eficiencia de uso del agua para el cultivo de papa

Trat.	Agua aplicada (m ³ /ha)	Rdto. (kg/ha)	E.U.A (kg/m ³)	Producción de 1 kg de papa (L de agua)
T1	5.247	49.633,33	9,46	106
T2	4.376	47.800,00	10,92	92
T3	4.345	45.466,67	10,46	96
T4	5.211	44.900,00	8,61	116
T5	4.793	49.700,00	10,36	96
T6	4.140	56.033,33	13,53	74
T7	4.118	40.366,67	9,80	102
T8	4.766	43.966,67	9,22	108
T9	4.340	40.533,33	9,34	107
T10	3.906	37.433,33	9,58	104
T11	3.890	29.333,33	7,54	133
T12	4.322	32.333,33	7,48	134

En el Figura 30, podemos observar con la aplicación de la **lámina de riego de 100% ETc** en los tratamientos T1, T2, T3 y T4, el mejor tratamiento fue T2 con restricción hídrica de riego en la fase de desarrollo y crecimiento vegetativo obtuvieron 10,92 kg de papa en un metro cubico de agua.

Seguidamente con la aplicación de **75% ETc de lámina de riego** en los tratamientos T5, T6, T7 y T8 donde el mejor tratamiento fue el T6 con restricción hídrica de riego en la fase de desarrollo y crecimiento vegetativo, logro producir 13,53 kg de papa por cada metro cubico de agua aplicada.

Finalmente, con la aplicación de **50% ETC lámina de riego** en los tratamientos T9, T10, T11 y T12 donde el mejor tratamiento se mostró el T10 con restricción hídrica de riego en la fase de desarrollo y crecimiento vegetativo, logrando producir 9,58 kg de papa en un metro cubico de agua.

Cabe indicar que el T6 alcanzo el valor más alto con 13,53 kg de papa por cada metro cubico de agua y fue el que mejor aprovecho el agua total (Riego + Pe), para generar un mayor peso en el producto cosechado y que representa un ahorro hídrico de agua en comparación con el resto de los tratamientos que presentaron las menores eficiencias respectivamente.

Al respecto Oweis (2012), menciona que la productividad del agua para el cultivo de papa, superiores a 7 kg/m³, ya representa una buena productividad.

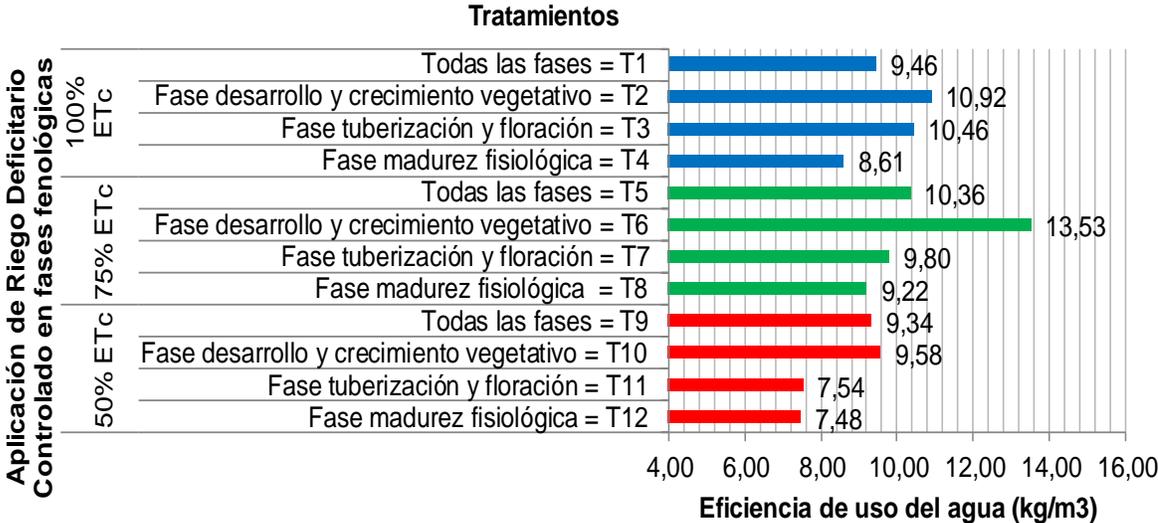


Figura 30. Eficiencia de uso del agua en la producción

Sin embargo Mamani (2015), encontró los siguientes resultados aplicando láminas de riego para la variedad huaycha en el índice de eficiencia de uso del agua de 10,8 kg/m³ a 13,7 kg/m³.

Por otra parte varios estudios han evaluado la Eficiencia de Uso del Agua (EUA) en papas, en el Sur de Túnez se reportaron valores entre 8 y 14 kg/m³ (Nagaz *et al.*, 2007). En Irán, se reportaron valores de EUA en papa entre 1,92 y 5,25 kg/m³ (Rashidi y Gholami, 2008). España, reporto valores de EUA entre 8,6 y 11,6 kg/m³ en el 2011 y entre 7,1 y 8,4 kg/m³ en 2012, dependiendo de las tasas de riego aplicada y de la temporada (Camargo *et al.*, 2015).

Este comportamiento se puede atribuir a las diferencias en: las características físicas del suelo, en las condiciones medio ambientales y las investigaciones realizadas en diferentes lugares.

6.10 Análisis de costos parciales

En Cuadro 24, se presenta el análisis de costos parciales para cada tratamiento, se realizaron un análisis de costos variables para cada tratamiento como se muestra en (anexo 7).

Cuadro 24. Análisis de costos de producción

Trat.	Rdto. (t/ha)	Rdto. Ajust. (t/ha)	Rdto. (qq/ha)	P (qq/Bs)	IB (Bs/ha)	CP (Bs/ha)	IN (Bs/ha)	B/C (Bs)
T1	49,63	44,67	893,34	80	71.467,20	30.304	41.163,20	2,4
T2	47,80	43,02	860,40	80	68.832,00	29.804	39.028,00	2,3
T3	45,47	40,92	818,46	80	65.476,80	29.704	35.772,80	2,2
T4	44,90	40,41	808,20	80	64.656,00	30.204	34.452,00	2,1
T5	49,70	44,73	894,60	80	71.568,00	30.064	41.504,00	2,4
T6	56,03	50,43	1.008,54	80	80.683,20	29.664	51.019,20	2,7
T7	40,37	36,33	726,66	80	58.132,80	29.584	28.548,80	2,0
T8	43,97	39,57	791,46	80	63.316,80	29.984	33.332,80	2,1
T9	40,53	36,48	729,54	80	58.363,20	29.824	28.539,20	2,0
T10	37,43	33,69	673,74	80	53.899,20	29.824	24.375,20	1,8
T11	29,33	26,40	527,94	80	42.235,20	29.464	12.771,20	1,4
T12	32,33	29,10	581,94	80	46.555,20	29.764	16.791,20	1,6

Rdto = Rendimiento; Rdto A= Rendimiento Ajustado; P = Precio; IB = Ingreso Bruto; CP = Costo de producción; IN = Ingreso neto; B/C = Beneficio/Costo.

- **Ingreso bruto**

En el Cuadro 24, se muestra el análisis realizado para todos los tratamientos en función a los rendimientos obtenidos y su precio en el mercado para cada uno, se tiene mayor ingreso bruto en el tratamiento T6, obtuvo un mayor ingreso bruto de 80.683,20 Bs/ha al resto de los otros tratamientos.

- **Ingreso neto**

La estimación de los beneficios netos presentes en el Cuadro 24, se observa que para el tratamiento T1 el ingreso neto que se obtuvo es de 41.163,20 Bs/ha, el mejor ingreso neto obtenido es de 51.019,20 Bs/ha para el tratamiento T6.

- **Beneficio/Costo (B/C)**

En el Cuadro 24, se observa en cuanto a la relación beneficio/costo (B/C) para los doce tratamientos son mayores a uno (1), lo que indica rentabilidad en la producción de papa. Sin embargo, la que indica mejores ganancias es el T6 donde se utilizó una lámina de riego de 75% de ETc con restricción hídrica de riego en la fase de desarrollo y crecimiento vegetativo llega ser la más rentable en la producción económicamente con un valor de Bs 2,7 es decir que por cada valor invertido y recuperado se tiene una ganancia de Bs 1,7.

VII. CONCLUSIONES

De acuerdo a los objetivos planteados y los resultados encontrados en la presente investigación se llegó a las siguientes conclusiones:

- En la evaluación de los parámetros agronómicos del cultivo de papa en condiciones de Riego Deficitario Controlado (RDC) no se reportaron diferencias significativas en la variable altura de planta, pero si se obtuvo diferencias significativas y altamente significativas estadísticamente en las variables agronómicas por efecto de riego deficitario en número de tubérculos por planta, peso de tubérculos por planta y rendimiento; en láminas de riego y fases fenológicas.

En cuanto al rendimiento obtenido del cultivo de papa, con la aplicación de la estrategia de Riego deficitario Controlado se identificó al tratamiento T6 con un rendimiento de $5,60 \text{ kg/m}^2$ (56,0 t/ha), a comparación de otros tratamientos.

Notándose que el T6 fue la que más influencia presentó con la aplicación de lámina de riego 75% ETc, equivalente a un 25% de restricción hídrica de riego, con restricción hídrica en la fase de desarrollo y crecimiento vegetativo cumpliendo la estrategia RDC de minimizar los aportes hídricos sin que se afecte significativamente el rendimiento, dando a concluir que el T6 se constituye en una óptima opción para el RDC.

- En cuanto a la dinámica del agua en el suelo bajo los diferentes tratamientos se mantuvieron en la zona de agua fácilmente aprovechable (AFA). Encontrándose dentro de la Capacidad de Campo y Umbral de Riego.
- Determinando el potencial hídrico xilemático durante el periodo del cultivo se observó que no hay muchas diferencias significativas por lo que los valores

fueron similares, se mantuvieron en el rango de -0,4 a -0,7 MPa para todos los tratamientos.

- En cuanto en la evaluación de la temperatura de la hoja con respecto al temperatura ambiente, las plantas estuvieron transpirando normalmente, no hubo estrés hídrico donde la diferencia de temperatura de la hoja respecto a la temperatura ambiental fue de 2,6 a 3,6 °C.
- En la evaluación de la eficiencia de uso del agua (EUA) en el cultivo de papa en los diferentes tratamientos de RDC de las distintas fases fenológicas, se encuentran en niveles óptimos en cuanto a los valores alcanzados del EUA. Sin embargo el T6 presento un mejor aprovechamiento del agua aplicada logrando producir 13,53 kg/m³ (74,0 l/kg) con déficit hídrico de riego en la fase de desarrollo y crecimiento vegetativo comparación a otros tratamientos, por lo tanto este tratamiento fue el que mejor aprovecho el agua total (Riego+Pe), para generar un mayor peso del producto cosechado por unidad de agua.

Entonces el T6 responde óptimamente al fin del RDC que es de reducir los volúmenes de agua sin afectar significativamente el rendimiento, incrementando la eficiencia de uso del agua y por consiguiente un ahorro de este recurso hídrico, que repercutiría en una mayor rentabilidad del cultivo.

- En cuanto a la evaluación de los costos de producción del cultivo de papa manifiesta una rentabilidad positiva y óptima para los doce tratamientos, sin embargo el T6, es más rentable con Bs 2,7 en cuanto a beneficio/costo, donde se puede obtenerse buena rentabilidad a comparación a otros tratamientos

VIII RECOMENDACIONES

De acuerdo a los resultados y conclusiones logrados por la presente investigación se llegan a las siguientes recomendaciones:

- De acuerdo al rendimiento se recomienda aplicar una lámina de riego al 75%, con un estrés hídrico moderado en la fase de emergencia, fase de desarrollo y crecimiento vegetativo del cultivo. Se debe evitar estrés hídrico en la etapa o fase de tuberización y floración es decir en el llenado y desarrollo de tubérculos, para obtener una buena producción y por lo tanto se generaría una eficiencia de uso del agua.
- Para mejorar el rendimiento de papa, se sugiere el manejo y buena práctica agrícola en la producción del cultivo de papa, en las labores culturales, como en los controles fitosanitarios ya que de estos factores depende para asegurar la inocuidad de las cosechas.
- Se recomienda para futuros ensayos realizar trabajos de investigaciones de riego deficitario controlado (RDC) similar, en el cultivo de papa y en otros tipos de cultivos, de esta manera comparar corroborar o mejorar los resultados obtenidos en las siguientes campañas y de esta manera se podrá contribuir al uso racional del agua como estrategia frente al cambio climático.

IX. BIBLIOGRAFÍA

ACEVEDO, C.; ORTEGA, S. 2010. Effects of grapevine vitis vinífera L. Water status on water consumption vegetative growth and grape Quality.

ACEVEDO-OPAZO, C., S. ORTEGA-FARÍAS, S. FUENTES. 2010. Effects of grapevine Vitis vinifera L.)water status on water consumption, vegetative growth and grape Quality: An irrigation scheduling application to achieve regulated deficit irrigationA-gric. Water Manage.97, 956-964.

ALLEN, G.; PEREIRA, S.; RAES, D. y SMITH, M. 2006. Evapotranspiración del cultivo. “Guía para la determinar los rendimientos de agua en los cultivos”. FAO. Roma- Italia. 154-159 págs.

ALLEN, R.; PEREIRA, L.; SMITH, M. 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. Irrigation and Drainage. Roma, FAO. 56 p.

ALVARADO, F. 1986. Crecimiento del cultivo de papa. Bogotá, Colombia. CIP-ICA.

ANTEZANA, L. F. 2001. Determinación de rendimientos potencial de cultivos priorizados de papa (*Solanum tuberosum*), Oca (*Oxalis tuberosa*) e isaño (*Tropaeolum tuberosum*) en el departamento de Cochabamba. Tesis Ing. Agr. Cochabamba, Bolivia. UMSS-FCA y P. 120 p.

ARANDA, C. J. 2000. Usos eficientes del agua. Instruments for Sustainable Development of Water Resources.

ARANO, F. V. 2014. Evaluación de la influencia de los recursos hídricos en las actividades productivas bajo riego mediante el análisis climático y gestión de riego en la cuenca del río Sajhuaya. Tesis de Maestría. Universidad Mayor de San Andrés. La Paz, Bolivia.

BIDEGAIN, M. 2017. El clima y su interacción con la agricultura. Curso Internacional en Agrometeorología aplicada. La Paz, Bolivia.

BONET, L.; FERRER, P.; CASTEL, J. R.; INTRIGLIOLO, D. S. 2010. Soil capacitance sensors and stem dendrometers. Useful thols for irrigation scheduling of comercial orchardas. Span J. Agric Res 8. 852 – 865 p.

- CADAHIA, C. 2005. Fertirrigación. 3ra Edición. España. Mundi – Prensa. 681 p.
- CAMACHO, F. 2004. Factores limitantes del Altiplano para la agricultura y degradación de propiedades físicas del suelo. La Paz, Bolivia.
- CAMARGO, D. C.; MONTOYA, F.; ORTEGA, J. F.; CORCOLES, J. I. 2015. Potato yield and water use efficiency responses to irrigation in semiarid conditions. *Agronomy Journal*. 2120 – 2131 p.
- CANQUI, F.; MORALES, E. 2009. Conocimiento Local en el Cultivo de la Papa. Fundación PROINPA. Cochabamba, Bolivia.
- CASPARI, H. BEHBOUDIAN, M.; CHALMERS, D. 1994. Water Use, growth, and fruit Yield of “Hosui” Asian Pears under Deficit Irrigation, 119(3).
- CENTA. 2002. Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal. Guía Técnica Cultivo de Papa. (En línea). Consultado 17 de diciembre de 2017. Disponible en: [www.centa.gob.sv/hortalizas/Guia Papa](http://www.centa.gob.sv/hortalizas/Guia%20Papa).
- CHILÓN, E. 1996. Inventario y caracterización de terrazas precolombinas de Bolivia. En Memorias de seminario “Alternativas tecnológicas Andino-amazónicas para el desarrollo Rural”, Organizado por el Centro de Alternativas Tecnológicas Andino-amazónicas para el desarrollo CIDAT-Facultad de Agronomía, UMSA, La Paz, Bolivia.
- CHILÓN, E. 1997. Manual de fertilidad de suelo y nutrición de plantas. La Paz, Bolivia. CIDAT (Centro de Investigación y difusión de alternativas para el desarrollo). 185 p.
- CHIPANA, R. 2003. Principios de Riego y Drenaje. IRTEC. Universidad Mayor de San Andrés, Facultad de Agronomía. La Paz, Bolivia.
- CHOQUE, E. ESPINOZA, R. GABRIEL. J. 2007. Resistencia a helada en germoplasma de papa nativa de Bolivia. *Revista Latinoamericana de la Papa*. 14 (1). 24-32 p.
- CISNEROS, R. 2003. Apuntes de Riego y Drenaje. Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. México.
- COCA, M. 2000. Informe anual de la Estación Experimental de Belén. La Paz, Bolivia. 50 p.

- CULLEN, J.C. y WILSON, A.R. 1971. Producción Comercial de Patatas y su Almacenamiento. Ed. Acribia. España.
- DE LA CASA, A., G. OVANDO, A. RODRÍGUEZ y L. BRESSANINI. 2003. Evaluación del estrés hídrico en papa con datos de termometría infrarroja y humedad de suelo. Enviado a la Revista Argentina de Agrometeorología.
- DOOREMBOS, J.; KASSAN, A. 1986. Yield response to water. Irrigation and drainage. FAO. 2006. Agricultura y alimentación. Roma –Italia. 193 p.
- FAO 2008. Atlas Mundial de la papa. FAOSTAT; World Potato Congress; Argenpapa; Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas.
- FAO. 1977. Calidad del agua para la agricultura. Estudios FAO: Riego y Drenaje 56. Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la Alimentación.
- FAO. 1989. Irrigation water management Irrigation Scheduling. Training Manual N°4. Rome Italy.
- FAO. 1997. Calidad del agua para la agricultura. Estudios FAO: Riego y Drenaje 56. Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la Alimentación.
- FAO. 2002. Deficit irrigation practices. Water reports n° 22. 102 p.
- FAO. 2014. Infografía de estadísticas sobre el agua. Informe programa. Aquastat. www.fao.org/nr/water/aquastat/main/indexesp.stm.
- FAOSTAT. 2017. FAOSTAT online data base Consultado en: 14 junio de 2018. <http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx>.
- FERERES, E. Y SORIANO, M. A. 2007. Deficit irrigation for reducing agricultural water use. Journal of experimental Botany, 58(2): 147-159 Pp.
- FERNÁNDEZ, J.E.; GIRON, I.F.; MORENO, F. 2001. Heat-pulse measurements of sap flow in olives for automating irrigation: tests, root flow and diagnostic of water stress. Agricultural Water Management. 99-123.
- FIGUEREDO, F. 2018. Riego Deficitario Controlado mediante sensores en tres variedades de papa (*Solanum tuberosum*) en la Estación Experimental de Choquenaira-

Vicha. Tesis de Grado, Universidad Mayor de San Andrés, Facultad de Agronomía. La Paz, Bolivia.

FUENTES, J. L. 1999. Manual práctico sobre utilización de suelos y fertilizantes. Madrid – España. Mundi – Prensa. 155 p.

FUENTES, J. L. 2003. Técnicas de riego. Editorial Mundi-Prensa. Madrid.

GALLARDO, M.; THOMPSON, R. B. 2003b. Uso de los sensores de planta para la programación del riego. Dirección General de Investigación y Formación agraria de la Junta de Andalucía. 353 – 374 p.

GALLARDO, M.; THOMPSON, R.B.; FERNÁNDEZ, M. 2003a. Relaciones hídricas en suelo y planta y mejora de la eficiencia en el Uso del agua en Cultivos protegidos. Dirección General de Investigación y Formación Agraria de la Junta de Andalucía. 71 – 94 p.

GARAY, R. 1999. Manual “Primera aproximación para la identificación de tipos de suelos agrícola del valle del río Mantaro”. IGP.

GARCÍA, M. 2008. Manejo de Riego: Uso de instrumentos de medición de agua del suelo y del estado hídrico de los cultivos, presentación de casos de estudio incluso en riego deficitario. Guatemala. Consultado en: 2 de septiembre de 2017. Disponible en: [http:// ceer.isa.utl.pt/cyted/2008](http://ceer.isa.utl.pt/cyted/2008) Guatemala.

GIL, R. FERNÁNDEZ, M. GONZALES, A. 2003. Efecto de la frecuencia de riego sobre el crecimiento y productividad de un cultivo de pepino bajo invernadero. XXI Congreso nacional de Riegos. Especial America. 38-43 .

GIRONA, J.; MATA, M. GOLDHAMER, D.; JOHNSON, R. 1993. Patterns of soil and tree wáter status and leaf functioning during regulated deficit irrigation scheduling in peach Journal of the American Society for Horticultural Sciense. 118 (5): 580-586 p.

GONZALES, F.; HERRERA, J.; LÓPEZ, T. 2010. Ciencias Técnicas Agropecuarias Vol. 19 N° 1, p. 65 - 72.

GOODWIN, L. Y BOLAND, A. 2002. Scheduling deficit irrigation of fruit trees for optimizing water use efficiency. Deficit Irrigation Practices, 67-77 p.

- GUZMÁN, G. S. 2010. Evaluación de la productividad del agua en el cultivo de papa para la zona de Santa María. Tesis de Grado. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería. 92 p.
- HANCCO, R. M. 2014. Evaluación del comportamiento de cuarenta y uno genotipos de papa (*Solanum tuberosum* L.), para tolerancia a la sequía en zonas áridas. Tesis de Grado. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. Facultad de Agronomía.
- HAVERKORT, A. 1986. Manejo del agua en la producción de papa. Boletín de información técnica 15. Lima, Perú. Editorial agropecuario hemisferio sur CIP 24.
- HERNÁNDEZ, R. 2001. Nutrición mineral. Venezuela. Consultado en: 15 de enero de 2018. Disponible en: forest.ula.ve/rubenhg/nutriccionmineral.
- HIJMANS, R.J. 2003. The effect of climate change on global potato production. *American Journal of Potato Research*, 80 (4). 271-279.
- Idso, S.B. y K.L. Clawson. Foliage temperature: effects of environmental factors with implications for plant water stress assesment and the CO2/Climate connection. *Water Resources Research*, v.22 n.12 p.1133-1138. 1986.
- INE- MDRyT. 2017. Instituto Nacional de Estadística – Ministerio de Desarrollo Rural y Tierras. “Superficie, producción y rendimiento” (En Línea): Consultado 22 de noviembre del 2017. Disponible en: www.ine.gob.bo/indice/general.aspx.
- JEREZ, J. SIMPEFENDORFER, C. 2000. Efecto del riego en el cultivo de papa. *Especial de riego y drenaje*. INIA. 26-28 p.
- KING, B. STARK, J.; LOVE, S. 2003. Potato production in limited water supplies. University of Idaho. Potato research & education. Consultado en: 30 de diciembre de 2017. Disponible en: www.a.edu/potato/research/index.htm.
- KIRDA, C. 2002. “Deficit irrigation scheduling base two plant growth stages showing water stress tolerant”. *Deficit irrigation practices*. FAO. Series title: Water reports 22. Food and agricultural Organization, United Nations. Rome, Italy.
- KOHLI, A.; FRENKEN, K.; SPOTTORNO, C. 2010. Desambiguación de las estadísticas sobre el agua Informe FAO programa AQUASTAT.

LÓPEZ, H.; KALAZICH, B.; GUTIÉRREZ, M. 2002. Cultivo de papas para primores. Instituto de Investigaciones agropecuarias, revista Tierra Adentro N° 45. 22 a 25 p.

LÓPEZ, R., ARTEAGA, R., SÁNCHEZ, I. 2009. Evapotranspiración del cultivo de tomate de cascara estimada mediante el potencial matricio del suelo. Rev. Fitotec. México. Vol. 33 (2): 157-168 p.

MAMANI, F.; CÉSPEDES, R. 2012. Revista en imágenes. Estación Experimental Choquenaira. Facultad de Agronomía – UMSA. La Paz, Bolivia. 32 p.

MAMANI, W. 2015. Riego Deficitario en el Cultivo de Papa (*Solanum tuberosum* L.) en el Municipio de Achacachi-La Paz, Tesis de grado, Universidad Mayor de San Andrés, Facultad de Agronomía. La Paz, Bolivia.

MARTÍNEZ, M. T. 2010. Caracterización y optimización del ahijado del arroz en el Delta del Ebro. (Tesis doctoral). Universidad Politécnica de Valencia. 296 pp.

MARTÍNEZ, V.; CALATRAVA, J.; MARTIN, B. 2009. “Economic assessment of shade-cloth covers for agricultural irrigation reservoirs in a semi-arid climate”. Agric. Water Manage.

MDRyT. 2008. Lanzamiento del Año Internacional de la Papa en Bolivia (MEMORIA). La Paz, Bolivia. p. 76.

MDRyT. 2012. Compendio agropecuario del Estado Plurinacional de Bolivia. Editora, GRECO S.R.L. La Paz, Bolivia.

MDRyT-INIAF. 2016. Descriptor de variedades inscritas en el registro nacional de variedades. Volumen I. p. 224.

MEDRANO, H; BOTA, J; CIFRE, J; FLEXAS, J; RIBAS,M; GULIAS,J. 2007. Eficiencia en el uso del agua por las plantas. Investigaciones geográficas no.43:p.63-64. Disponible en www.rua.ua.es/dspace/handle/100455.pdf.

MEZA, R. 2012. Evaluación del rendimiento del cultivo de papa bajo la aplicación de una estrategia de riego deficitario (PRD) utilizando cintas de riego. Disponible en,http://www.Lanolina.edu.pe/eventos/agrícola/2012/xl_congreso/ponencias/ponencia_20.pdf

- MOKATE, K. M. 1998. Evaluación financiera de proyectos de inversión. Ediciones Uniandes. Santa fe de Bogotá, Colombia. 108 pp.
- MONTALDO, A. 1984. Cultivo y Mejoramiento de la Papa. Instituto Interamericano de Cooperación para la agricultura. Costa Rica.
- NAGAZ, K.; MASMOUDI, M. M.; MECHLIA, N. B. 2007. Soil salinity and yield of drip – irrigated potato under different irrigation regimes with saline water in arid conditions of southern Tunisia. *Journal of Agronomy*. 324 - 330 p.
- NAOR, A. 2001. Irrigation and crop load influence fruit size and water relations in field-grown “Spadona” pear. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 126: 252-255.
- NILSEN, E. T. Y ORCUTT 1996. *Physiology of plants under stress. Abiotic factors* John Wiley and Sons, New York. Consultado en noviembre de 2017. Disponible en [www.elsitioagricola.com/articulos/sierra fertilización](http://www.elsitioagricola.com/articulos/sierra_fertilizacion).
- ODEPA. 2015. Cultivos anuales: Estimación de superficie sembrada a nivel nacional años agrícolas 2013/14 y 2014/15. Consultado en 22 mayo de 2018. <http://www.odepa.cl/cultivos-anuales-201112-y-201213-2>.
- OLARTE, W. 2003. *Diseño y Gestión de Sistemas de riego por Aspersión en laderas*. Primera edición. Masal, Cusco.
- ORSAG, V. 1989. Factores Limitantes del altiplano para la agricultura y degradación de las propiedades físicas del suelo. En *seminario de Agroecológica*. La Paz, Bolivia. Facultad Agronomía-UMSA 12 p.
- ORSAG, V. 2010. *El recurso suelo. Principios para su manejo y conservación*. Primera Edición. Edit. Zeus. La Paz, Bolivia. 256 p.
- ORTUÑO, M. F.; MORENO, F.; TORRECILLAS, A. 2010. Could trunk diameter sensors be used in woody crops for irrigation scheduling. A review of current knowledge and future perspectives. *Agric Water Manag* 97. 1 -11 p.
- OWEIS, T. 2012. *Improving agricultural water management: From efficiency to productivity* Presentation realized in La Paz.

- PARDAVE, C. 2004. Cultivo y comercialización del cultivo de papa. Perú – Palomino. 133 p.
- PATIÑO, J. F. 2000. Rendimiento potencial de papa nativa (*Solanum tuberosum ssp Andigena y stenotomum*), papaliza (*Ullucus tuberosus*), oca (*Oxalis tuberosa* Mol) e isaño (*Tropaolum tuberosum*), en la localidad de Candelaria (Provincia Chapare-Cochabamba). Tesis de Grado. Cochabamba, Bolivia. FCA y P-UMSS. 1-90p.
- PERRIN, R. 1988. La formulación de recomendaciones a partir de datos agronómicos. Manual de metodología de evaluación agronómica. Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo. CIMMYT. 3ra edición. México D. F. 90 p.
- PINO, M. T. 2016. Estrés hídrico y térmico en papas, avances y protocolos. Santiago, Chile. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Boletín INIA n° 331. 148 p.
- PIZARRO, C. F. 1987. Riegos localizados de alta frecuencia (RLAF). Goteo, micro aspersión, exudación. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid España. Pp 73.
- PRESTON, K. A., CHALMERS, D. J., MOREMONG, M. 1992. Canopy air temperate difference and soil water as predictors of water stress of Apple trees growm in a humid, temperate climate. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 117: 453-458.
- PROINPA. 2009. Programa de Investigación de Productos Andinos. Compendio de enfermedades, insectos, nematodos y factores Abióticos que afectan el cultivo de papa en Bolivia. Cochabamba, Bolivia.
- PROINPA-IBTA. 1998. Informe compendio del programa de investigación de la papa. Cochabamba, Bolivia.
- QUISPE, A. (2002). Introducción de cuatro variedades de papa (*Solanum tuberosum* L.) bajo dos densidades de siembra en la localidad de Phusa-Ichoca Provincia Inquisivi. Tesis de Grado, UMSA. La Paz, Bolivia.
- QUISPE, E.; JIMÉNEZ, R. (s.f.). Manual de Buenas Prácticas Agrícolas del Cultivo de Papa y Reproducción por Brotes. FDPIOCC. La Paz, Bolivia.
- QUISPE. A 2000. Caracterización Preliminar del Banco de Germoplasma de Papas Nativas del Altiplano Norte en la Estación experimental de Belén. La Paz, Bolivia. Pp 80.

- RASHIDI, M. Y GHOLAMI, M. 2008. Review of crop water productivity values for tomato, potato, león, watermelon and cantaloupe in Iran. *International Journal of Agriculture and Biology*. 432 pp.
- RAZURI, L. ROMERO, G. D. 2008. Efecto del riego deficitario controlado en la producción del cultivo de tomate najo riego localizado. *Agricultura Andina*. Volumen 14. Junio. Venezuela. 2 p.
- RODRÍGUEZ, R. A.; RAZURI, R. L.; SWAROWSKY, A. 2014. Efecto del Riego Deficitario y diferentes frecuencias en la producción del cultivo del pimentón. *Inter-Ciencia*. Vol. 39 Nº 8. Venezuela. 1 pág.
- ROLANDO, J. L.; RAMÍREZ, D. A.; YACTAYO, W.; MONNEVEUX, P.; QUIROZ, R. 2015. Leaf greenness as a drought tolerance related trait in potato (*Solanum tuberosum* L.). *Environ Exp. Bot* 110: 27- 35 p.
- SÁNCHEZ, M.; TORRECILLAS, A. GIRONA, J. DOMINGO, R. 1995. Riego deficitario controlado. Mundi prensa. 188 p.
- SANTOS, P. 2010. El riego y sus tecnologías. Editorial CREAUCM. España.
- SCHOLANDER, P. F.; HEMMINGSEN, E. D. 1964. Bradstreet. Hydrostatic pressure and osmotic potential in leaves of mangroves and some other plants. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 52. 119-125 p.
- SEPA, 2007. Informe de Evaluación Interna. Campaña Agrícola 2006-2007. Cochabamba, Bolivia.
- SIERRA, C. 2005. Fertilización de la papa. (En línea) Chile. Consultado 15 de SNET. 2005. Balance hídrico integrado y dinamico en El Salvador: Componente evaluación de recursos hídricos. Consultado en 9 de noviembre de 2017. Disponible en: <http://portafolio.snet.gob.sv/digitalizacion/pdf/pa/doc00005/doc00005-contenido.pdf>.
- STARK, J.C. Y J.L. WRIGHT. 1985. Relationship between foliage temperature and water stress in potatoes. *American Potato Journal*, v. 62 p. 57-68.
- STEEL, R. Y TORRIE, J. 1996. Bioestadística. Principios y Procedimientos. 2da Edición. Mc GRAM-HILL/INTERAMERICANA DE MÉXICO. S.A. DE C.V. 622 p.

- TARJUELO, L. M. 1999. El riego por aspersión y su tecnología. 2da edición. España. Mundi – Prensa. 557 p.
- TUBEROSA, R. 2012. Phenotyping for drought tolerance of crop in the genomics era. *Frontiers in physiology*. 347 p.
- TURNER, N. 1990. Plant water relations and irrigation management. *Agricultural water management*. (17). Pp. 59-73.
- USDA 2006. Requerimiento de Agua para Riego. Parte 623. Manual Nacional de Ingeniería s/f.
- USDA. 1975. U. S. Salinity Staff, Clasificación de aguas de riego. USDA. Washington D.C.
- VACHER, J., GARCÍA, M. 1990. Uso consuntivo y comportamiento hídrico de la papa amarga (*Solanum juzepzukii*) y de la papa dulce (*Solanum tuberosum ssp. andigena*) en el Altiplano Boliviano. Informe ORSTOM-SENAMHI. 71-72 p.
- VALVERDE, J. C. 1998. Riego y drenaje. 1ra edición. San José – Costa Rica. Universidad Estatal a Distancia. 219 p.
- VILLAFUERTE, 2008. Descripción del Cultivo de la Papa. Consultado en: 10 de enero 2018. Disponible en: www.agroancash.gobp.pe/public/articulos/aip2008/.
- VILLALOBOS, F. J.; MATEOS, L. 2009. Fitotecnia: Bases y tecnologías de la producción agrícola. 2da. Edición. España. Mundi – Prensa.
- VILLARROEL, A. J. 1988. Manual práctico para la interpretación de análisis de suelos en laboratorio. Cochabamba, Bolivia. 34 p.
- WACKER, B. 2002. What is TDR and FDR exactly, en: www.Sowacs.com/sensors/whatistdrfdr.html. Consultado en 2 enero de 2018.
- ZÚÑIGA, C. 2004. Manejo del riego mediante un monitoreo hídrico en tiempo real determinado con la técnica Frequency Domain Reflectometry. Universidad de Chile. 47. 11-47 p.

ANEXOS

Anexo 1. Análisis de suelo (IBTEN)



MINISTERIO DE ENERGÍAS
 INSTITUTO BOLIVIANO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA NUCLEAR
 CENTRO DE INVESTIGACIONES Y APLICACIONES NUCLEARES
 UNIDAD DE ANÁLISIS Y CALIDAD AMBIENTAL

ANÁLISIS FÍSICO QUÍMICO DE SUELOS

INTERESADO : *PROY ; PROGRAMACION DE RIEGO DEFICITARIO* NO SOLICITUD: *114B / 2017*
 PROCEDENCIA : *Departamento LA PAZ,* FECHA DE RECEPCION : *19 / Junio / 2017*
Provincia: INGAVI FECHA DE ENTREGA : *14 / Julio / 2017*
Comunidad : CHOQUENAIRA

ESTACION EXPERIMENTAL DE CHOQUENAIRA

DESCRIPCIÓN : *MUESTRA DE SUELO ; PARCELA 2 ; Maria Huanca*

Nº Lab.	PARAMETRO	Resultado	Unidades	Método	
337-01 /2017	TEXTURA	ARENA	29	%	Hidrómetro de Bouyoucos
337-02 /2017		ARCILLA	36	%	Hidrómetro de Bouyoucos
337-03 /2017		LIMO	35	%	Hidrómetro de Bouyoucos
337-04 /2017		CLASE TEXTURAL	FY	-	Hidrómetro de Bouyoucos
337-05 /2017		GRAVA	0.0	%	Gravimetría
337-06 /2017	CARBONATOS LIBRES	P	-	Reacción ácida	
337-07 /2017	pH en agua 1:5	6.76	-	Potenciometría	
337-08 /2017	pH en KCl 1:5	5.24	-	Potenciometría	
337-09 /2017	Conductividad eléctrica en agua, 1:5	0.177	dS/m	Conductancia	
337-10 /2017	CATIONES	Acidez de cambio (Al + H)	0.12	meq/100 g	Volumetría
337-11 /2017		Calcio	12.15	meq/100 g	Absorción atómica
337-12 /2017		Magnesio	2.17	meq/100 g	Absorción atómica
337-13 /2017		Sodio	0.36	meq/100 g	Emisión atómica
337-14 /2017		Potasio	1.44	meq/100 g	Emisión atómica
337-15 /2017	Suma de Bases	16.12	meq/100 g	Suma de bases	
337-16 /2017	Capacidad de Intercambio Catiónico	16.24	meq/100 g	Volumetría	
337-17 /2017	% de Saturación	99.25	%	Cálculo numérico	
337-18 /2017	Materia orgánica	2.50	%	Walkley Black	
337-19 /2017	Nitrogeno total	0.17	%	Kjeldahl	
337-20 /2017	Fósforo asimilable	42.73	ppm	Espectrofotometría UV-Visible	

OBSERVACIONES,- ** Cationes de Cambio extraídos con Acetato de amonio 1 N.
 C.I.C. Capacidad de Intercambio Catiónico.
 CARBONATOS LIBRES, A. Ausente, P. Presente, PP. Presente en gran cantidad

CLASE TEXTURAL

F : Franco Y : Arcilloso FA : Franco Arenoso YL : Arcilloso Limoso
 L : Limoso YA : Arcilloso Arenoso AF : Arenosos Franco FYL : Franco Arcilloso Limoso
 A : Arenoso FYA : Franco Arcilloso Arenoso FY : Franco Arcilloso FL : Franco limoso



[Handwritten Signature]

RESPONSABLE DE LABORATORIO

JORGE CHUNGARA C.

Of. Av. 6 de Agosto 2005, Telf.: 2433481, 2433482, 2433677, 2128383 Fax: (0591 2) 2433063, La Paz - Bolivia Casilla 4821, Telf.: 2800095 CIN-Viacha, E-mail: ibten@entelnet.bo * Página Web: www.ibten.gob.bo

Anexo 2. Análisis de agua (IBTEN)



MINISTERIO DE ENERGÍAS
 INSTITUTO BOLIVIANO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA NUCLEAR
 CENTRO DE INVESTIGACIONES Y APLICACIONES NUCLEARES
 UNIDAD DE ANÁLISIS Y CALIDAD AMBIENTAL

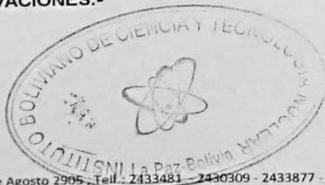
ANÁLISIS FÍSICO QUÍMICO DE AGUAS

INTERESADO : **PROYECTO PROGRAMACIÓN DE RIEGO DEFICITARIO** Nº SOLICITUD: **193 / 2017**
 PROCEDENCIA : **Departamento LA PAZ,** FECHA DE RECEPCION : **09 / Octubre/ 2017**
 Provincia: INGAVI, FECHA DE ENTREGA : **10 / Noviembre/ 2017**
 Comunidad : CHOQUENAIRA

DESCRIPCIÓN : *Muestra de agua: Comunidad Choquenaira*

Nº Lab.	PARAMETRO	Resultado	Unidades	Método
620-01 2017	pH	9,65	-	Potenciometría
620-02 2017	Conductividad eléctrica	303,000	µS/cm	Conductancia
620-03 2017	Sodio	31,68	mg / L	Flamometría
620-04 2017	Potasio	9,20	mg / L	Flamometría
620-05 2017	Calcio	16,68	mg / L	Absorción atómica
620-06 2017	Magnesio	4,77	mg / L	Absorción atómica
620-07 2017	Cloruros	11,28	mg / L	Método argentométrico
620-08 2017	Carbonatos	43,36	mg / L	Volumetría
620-09 2017	Bicarbonatos	0,00	mg / L	Volumetría
620-10 2017	Sulfatos	35,52	mg / L	Espectrofotometría UV-Visible
620-11 2017	Sólidos Suspendidos	9,00	mg / L	Gravimétrico
620-12 2017	Sólidos Totales	125,05	mg / L	Gravimétrico
620-13 2017	Sólidos Disueltos	115,65	mg / L	Gravimétrico
620-14 2017	Boro	0,11	mg / L	Espectrofotometría UV-Visible

OBSERVACIONES.-



RESPONSABLE DE LABORATORIO
 JORGE CHUNGARA C.

Anexo 3. Promedio de altura de planta de papa (cm).

Láminas de riego	Fases Fenológicas	BI	BII	BIII	PROMEDIO
100% ETc	Todas las fases del cultivo	97,2	85,2	90,6	91,0
	Fase desarrollo	88,6	79,0	72,4	80,0
	Fase media	89,6	90,4	76,8	85,6
	Fase final	88,2	96,6	81,9	88,9
75% ETc	Todas las fases del cultivo	74,8	88,6	90,8	84,7
	Crecimiento vegetativo	81,8	89,6	92,4	87,9
	Tuberización y floración	64,2	91,8	90,6	82,2
	Madurez fisiológica	96,8	71,2	85,8	84,6
50% ETc	Todas las fases del cultivo	86,2	75,0	89,0	83,4
	Crecimiento vegetativo	91,8	65,6	88,2	81,9
	Tuberización y floración	70,5	86,0	80,8	79,1
	Madurez fisiológica	87,0	97,0	66,6	83,5

Anexo 4. Promedio de número de tubérculos por planta (N° tubérculos/planta).

Láminas de riego	Fases Fenológicas	BI	BII	BIII	PROMEDIO
100% ETc	Todas las fases del cultivo	41	28	22	30
	Crecimiento vegetativo	31	20	13	21
	Tuberización y floración	26	27	18	24
	Madurez fisiológica	24	22	22	23
75% ETc	Todas las fases del cultivo	23	33	18	25
	Crecimiento vegetativo	25	31	16	24
	Tuberización y floración	14	24	16	18
	Madurez fisiológica	16	23	12	17
50% ETc	Todas las fases del cultivo	27	26	12	22
	Crecimiento vegetativo	17	14	15	15
	Tuberización y floración	24	11	17	17
	Madurez fisiológica	20	24	18	21

Anexo 5. Promedio de peso de tubérculos por planta (g/planta).

Láminas de riego	Fases Fenológicas	BI	BII	BIII	PROMEDIO
100% ETc	Todas las fases del cultivo	1.305,37	1.148,35	1.121,82	1.191,84
	Crecimiento vegetativo	1.372,47	1.046,32	1.029,07	1.149,28
	Tuberización y floración	1.182,32	1.095,20	999,25	1.092,25
	Madurez fisiológica	947,45	1.171,02	1.114,55	1.077,67
75% ETc	Todas las fases del cultivo	1.004,52	1.272,10	1.299,10	1.191,90
	Crecimiento vegetativo	1.356,35	1.429,10	1.249,27	1.344,90
	Tuberización y floración	908,02	1.002,67	996,70	969,13
	Madurez fisiológica	1.035,52	1.053,92	1.078,50	1.055,98
50% ETc	Todas las fases del cultivo	1.154,97	907,60	856,87	973,14
	Crecimiento vegetativo	945,67	774,22	1.006,22	898,70
	Tuberización y floración	707,82	640,67	770,35	706,28
	Madurez fisiológica	849,35	700,00	783,40	777,58

Anexo 6. Promedio de rendimiento total (kg/m²).

Láminas de riego	Fases Fenológicas	BI	BII	BIII	PROMEDIO
100% ETc	Todas las fases del cultivo	5,44	4,78	4,67	4,96
	Crecimiento vegetativo	5,71	4,35	4,28	4,78
	Tuberización y floración	4,92	4,56	4,16	4,54
	Madurez fisiológica	3,95	4,88	4,64	4,49
75% ETc	Todas las fases del cultivo	4,18	5,32	5,41	4,97
	Crecimiento vegetativo	5,65	5,95	5,21	5,60
	Tuberización y floración	3,78	4,18	4,15	4,03
	Madurez fisiológica	4,31	4,39	4,49	4,39
50% ETc	Todas las fases del cultivo	4,81	3,78	3,57	4,05
	Crecimiento vegetativo	3,94	3,10	4,19	3,74
	Tuberización y floración	2,94	2,66	3,20	2,93
	Madurez fisiológica	3,53	2,91	3,26	3,23

Anexo 7. Costos de producción

COSTO DE PRODUCCIÓN DE CULTIVO DE PAPA PARA T1 (100%)

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	COSTO UNITARIO (Bs)	CANTIDAD	COSTO TOTAL (Bs)
1. INSUMOS				
Semilla de papa var. Huaycha	qq	310	40	12.400,00
Biol	litro	2	120	240,00
Fertilizante Urea	bolsa (50 kg)	180	2	360,00
insecticida Karate (2 aplicaciones)	frasco (250 ml)	85	2	170,00
Cura papa	frasco	179	6	1.074,00
Abono orgánico	qq	10	200	2.000,00
Subtotal				16.244,00
2. PREPARACIÓN DEL TERRENO				
Aplicación de abono orgánico	jornal	80	6	480,00
Arada con tractor	ha	400	1	400,00
Rastrado y nivelado con tractor	ha	200	1	200,00
Subtotal				1.080,00
3. SIEMBRA				
Surcado y tapado con tractor	ha	400	1	400,00
Colocado de semilla de papa	jornal	80	6	480,00
Fertilizador	jornal	80	6	480,00
Sub total				1.360,00
4. LABORES CULTURALES				
Riego	jornal	100	12	1.200,00
Aporque con tractor	ha	200	1	200,00
Desyerbe	jornal	80	4	320,00
Control fitosanitario	jornal	80	2	160,00
sub total				1.880,00
5. COSECHA Y POS-COSECHA				
Cosecha de papa	jornal	100	40	4.000,00
Pos-cosecha	jornal	80	20	1.600,00
Subtotal				5.600,00
5. OTROS GASTOS				
Bolsas red	bolsa	880	1	880,00
alimentos y refrigerios	serv.	1500	1	1.500,00
Transporte	bolsa	880	2	1.760,00
Subtotal				4.140,00
Total				30.304,00

COSTO DE PRODUCCIÓN DE CULTIVO DE PAPA PARA T5 (75%)

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	COSTO UNITARIO (Bs)	CANTIDAD	COSTO TOTAL (Bs)
1. INSUMOS				
Semilla de papa var. Huaycha	qq	310	40	12.400,00
Biol	litro	2	120	240,00
Fertilizante Urea	bolsa (50 kg)	180	2	360,00
insecticida Karate (2 aplicaciones)	frasco (250 ml)	85	2	170,00
Cura papa	frasco	179	6	1.074,00
Abono orgánico	qq	10	200	2.000,00
Subtotal				16.244,00
2. PREPARACIÓN DEL TERRENO				
Aplicación de abono orgánico	jornal	80	6	480,00
Arada con tractor	ha	400	1	400,00
Rastrado y nivelado con tractor	ha	200	1	200,00
Subtotal				1.080,00
3. SIEMBRA				
Surcado y tapado con tractor	ha	400	1	400,00
Colocado de semilla de papa	jornal	80	6	480,00
Fertilizador	jornal	80	6	480,00
Sub total				1.360,00
4. LABORES CULTURALES				
Riego	jornal	80	12	960,00
Aporque con tractor	ha	200	1	200,00
Desyerbe	jornal	80	4	320,00
Control fitosanitario	jornal	80	2	160,00
sub total				1.640,00
5. COSECHA Y POS-COSECHA				
Cosecha de papa	jornal	100	40	4.000,00
Pos-cosecha	jornal	80	20	1.600,00
Subtotal				5.600,00
5. OTROS GASTOS				
Bolsas red	bolsa	880	1	880,00
alimentos y refrigerios	serv.	1500	1	1.500,00
Transporte	bolsa	880	2	1.760,00
Subtotal				4.140,00
Total				30.064,00

COSTO DE PRODUCCIÓN DE CULTIVO DE PAPA PARA T9 (50%)

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	COSTO UNITARIO (Bs)	CANTIDAD	COSTO TOTAL (Bs)
1. INSUMOS				
Semilla de papa var. Huaycha	qq	310	40	12.400,00
Biol	litro	2	120	240,00
Fertilizante Urea	bolsa (50 kg)	180	2	360,00
insecticida Karate (2 aplicaciones)	frasco (250 ml)	85	2	170,00
Cura papa	frasco	179	6	1.074,00
Abono orgánico	qq	10	200	2.000,00
Subtotal				16.244,00
2. PREPARACIÓN DEL TERRENO				
Aplicación de abono orgánico	jornal	80	6	480,00
Arada con tractor	ha	400	1	400,00
Rastrado y nivelado con tractor	ha	200	1	200,00
Subtotal				1.080,00
3. SIEMBRA				
Surcado y tapado con tractor	ha	400	1	400,00
Colocado de semilla de papa	jornal	80	6	480,00
Fertilizador	jornal	80	6	480,00
Sub total				1.360,00
4. LABORES CULTURALES				
Riego	jornal	60	12	720,00
Aporque con tractor	ha	200	1	200,00
Desyerbe	jornal	80	4	320,00
Control fitosanitario	jornal	80	2	160,00
sub total				1.400,00
5. COSECHA Y POS-COSECHA				
Cosecha de papa	jornal	100	40	4.000,00
Pos-cosecha	jornal	80	20	1.600,00
Subtotal				5.600,00
5. OTROS GASTOS				
Bolsas red	bolsa	880	1	880,00
alimentos y refrigerios	serv.	1500	1	1.500,00
Transporte	bolsa	880	2	1.760,00
Subtotal				4.140,00
Total				29.824,00