

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



**“EFECTO DE LA FERTIRRIGACIÓN EN EL RENDIMIENTO DEL
CULTIVO DE PAPA (*Solanum tuberosum* L.) VARIEDAD UNICA EN
CONDICIONES DE DÉFICIT HÍDRICO”**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERO AGRÍCOLA**

PIERO ABRAHAN NATIVIDAD TORIBIO

LIMA – PERÚ

2018

DEDICATORIA

El presente trabajo se lo dedico a mis padres, hermanos y familiares, que fueron el motor para cada impulso durante esta etapa de mi vida.

A la memoria de mi tía Claudia Toribio, por enseñarme a compartir y valorar cada instante de la vida.

AGRADECIMIENTO

A la Universidad Nacional Agraria La Molina por los años que disfruté en sus aulas y por permitirme cruzar fronteras en una etapa especial de mi vida.

A la Facultad de Ingeniería Agrícola por la formación brindada a través de sus grandes maestros.

A mis padres Abraham Natividad y Fortunata Toribio, quienes me apoyaron incondicionalmente en cada meta que me fui proponiendo.

A mis hermanos Brenda y Michael, madrina Nely Rojas y familiares, por el apoyo constante durante toda mi vida universitaria.

A mis colegas Raúl Lopez, Carlos Zamata, Franklin Oviedo y al asesor Ing. Miguel Sánchez, por batallar en un proyecto con presupuesto reducido, pero con la intención de aportar conocimiento y experiencia a la sociedad.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN

ABSTRACT

I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Justificación.....	2
1.2 Objetivos de la investigación.....	3
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
2.1 Características de la especie en estudio.....	4
2.1.1 La papa variedad UNICA.....	4
2.1.2 Crecimiento, desarrollo y tuberización.....	4
2.1.3 Requerimientos climáticos.....	6
2.1.4 Demanda de agua.....	6
2.1.5 Contenido de humedad del suelo.....	6
2.2 Fundamento de la nutrición en papa.....	7
2.2.1 Demanda de nutrientes.....	7
2.2.2 Suelo.....	11
2.3 Fertirriego.....	12
2.3.1 Ventajas.....	13
2.3.2 Desventajas.....	13
2.3.3 Método de inyección en un sistema de riego por goteo.....	14
2.3.4 Dosificación de fertilizantes en la fertirrigación.....	14
2.3.5 Características de los fertilizantes para el fertirriego.....	15
2.4 Riego deficitario.....	15
2.4.1 Riego deficitario controlado.....	16
2.4.2 Riego deficitario de secado parcial de la zona de raíces.....	16

III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	17
3.1 Lugar de estudio.....	17
3.1.1 Características del suelo.....	17
3.1.2 Características del agua.....	18
3.2 Materiales del experimento.....	19
3.3 Metodología de la investigación.....	21
3.3.1 Preparación del terreno.....	21
3.3.2 Diseño y disposición experimental.....	21
3.3.3 Diseño e instalación del sistema de riego por goteo.....	26
3.3.4 Definición de las fuentes de fertilizantes y diseño del programa de fertilización.....	29
3.3.5 Desarrollo de la investigación.....	32
3.3.6 Toma de datos meteorológicos.....	35
3.3.7 Cálculo y aplicación de riego.....	36
3.4 Evaluación de las variables en el cultivo.....	39
3.4.1 Durante el crecimiento y desarrollo.....	39
3.4.2 Durante la cosecha.....	39
3.4.3 Durante la post cosecha.....	40
3.5 Tratamiento estadístico.....	41
3.5.1 Diseño estadístico.....	41
3.5.2 Análisis estadístico.....	42
IV. RESULTADOS.....	44
4.1 Crecimiento y desarrollo.....	44
4.1.1 Porcentaje de emergencia.....	44
4.1.2 Altura de plantas.....	44
4.1.3 Numero de tallos principales por planta.....	46

4.2	Cosecha.....	46
4.2.1	Rendimiento total.....	46
4.2.2	Rendimiento comercial.....	47
4.2.3	Número de tubérculos comerciales y no comerciales.....	49
4.2.4	Tamaño de tubérculos.....	58
4.3	Post cosecha.....	61
4.3.1	Porcentaje de materia seca de tubérculos.....	61
4.3.2	Extracción y absorción de nutrientes por el cultivo.....	61
4.3.3	Balance nutricional del suelo.....	63
4.4	Otros resultados.....	64
4.4.1	Aporte hídrico durante la campaña.....	64
V.	CONCLUSIONES.....	67
VI.	RECOMENDACIONES.....	68
VII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	69
VIII.	ANEXOS.....	74

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Extracción relativa de nutrientes en el cultivo de papa para diferentes rendimientos, según diferentes autores.....	8
Tabla 2: Remoción de potasio en 7.6 Kg t ⁻¹ de tubérculo.....	11
Tabla 3: Datos climáticos de la Estación Davis 2017 UNALM.....	17
Tabla 4: Análisis de suelo.....	18
Tabla 5: Capacidad del suelo para retener agua.....	18
Tabla 6: Análisis de agua.....	19
Tabla 7: Descripción y código de los tratamientos.....	21
Tabla 8: Absorción y extracción de nutrientes por el cultivo de papa para un rendimiento de 60 t ha ⁻¹	30
Tabla 9: Absorción de algunos nutrientes por el cultivo de papa, según diferentes autores y diferente nivel de rendimiento.....	30
Tabla 10: Fuentes de fertilizantes.....	31
Tabla 11: Características principales de los abonos sólidos solubles.....	32
Tabla 12: Distribución porcentual de nutrientes.....	34
Tabla 13: Cantidad de fertilizante en gramos, m ² y día.....	35
Tabla 14: Coeficiente de cultivo.....	36
Tabla 15: Descripción de calibres o diámetros de tubérculos de papa.....	40
Tabla 16: Escalas de contenido de materia seca de tubérculos.....	40
Tabla 17: Altura de planta de los cuatro tratamientos registrados durante el desarrollo de la planta.....	45
Tabla 18: Tallos por planta para cada tratamiento registrados a los 30 y 106 días después de la siembra.....	46
Tabla 19: Rendimiento total de las plantas con diferentes tratamientos a los 110 días después de la siembra.....	46
Tabla 20: Rendimiento comercial de las plantas con diferentes tratamientos a los 110 días después de la siembra.....	48
Tabla 21: Análisis de varianza del número de tubérculos comerciales por planta.....	51
Tabla 22: Prueba de homogeneidad de varianza.....	53

Tabla 23: Comparación de medias, según prueba de Duncan, número de tubérculos comerciales.....	53
Tabla 24: Análisis de varianza del número de tubérculos no comerciales por planta.....	55
Tabla 25: Prueba de homogeneidad de varianza.....	57
Tabla 26: Comparación de medias, según prueba de Duncan, número de tubérculos no comerciales.....	57
Tabla 27: Comparación de medias del rendimiento por calibres de tubérculos por planta del cultivo de papa, sometidos a cuatro tratamientos, según la prueba de Tukey a nivel de $p=0.05$	59
Tabla 28: Materia seca de tubérculos por tratamiento.....	61
Tabla 29: Extracción de nutrientes de hojas y tubérculos para cada tratamiento.....	62
Tabla 30: Absorción de nutrientes para cada tratamiento.....	62
Tabla 31: Balance de nutrientes en el suelo.....	64
Tabla 32: Número de riegos por tratamiento.....	64
Tabla 33: Fecha y volumen de agua aplicado en cada tratamiento.....	66

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fases fenológicas de la papa.....	5
Figura 2: Remoción de nutrientes en 55 t ha ⁻¹ en papa.....	9
Figura 3: Vista en perfil de la alternancia de aplicación de agua a la planta.....	16
Figura 4: Disposición de las unidades experimentales.....	22
Figura 5: Disposición de laterales de riego.....	23
Figura 6: Disposición de laterales con separación de 20 cm en cada surco.....	24
Figura 7: Disposición de lateral tipo 2.....	25
Figura 8: Disposición del sistema de riego en la parcela.....	28
Figura 9: Esquema para la obtención del diseño del programa de fertilización.....	31
Figura 10: Aporte de nutrientes.....	33
Figura 11: Tratamiento de riego.....	37
Figura 12: Vista en planta de la disposición lineal y la aplicación del riego deficitario con secado parcial de raíces.....	38
Figura 13: Vista en planta de la disposición en paralelo y la aplicación del riego deficitario con secado parcial de raíces.....	38
Figura 14: Variación de la altura de plantas con diferentes tratamientos en diez fechas de evaluación.....	45
Figura 15: Rendimiento total para cada tratamiento en t ha ⁻¹	47
Figura 16: Rendimiento comercial para cada tratamiento, en t ha ⁻¹	48
Figura 17: Distribución porcentual del número de tubérculos según su clasificación.....	49
Figura 18: Diagrama de cajas de número de tubérculos comerciales por planta.....	50
Figura 19: Interacción para respuesta.....	51
Figura 20: Normalidad de error de residuos estandarizados del número de tubérculos comerciales.....	52
Figura 21: Diagrama de cajas de número de tubérculos no comerciales por planta.....	54
Figura 22: Interacción para respuesta.....	55
Figura 23: Normalidad de error de residuos estandarizados del número de tubérculos no comerciales.....	56
Figura 24: Tamaño de tubérculos según su clasificación.....	58

Figura 25: Grupos y desviación estándar para las clasificaciones.....	60
Figura 26: Total de nutrientes extraídos por hojas y tubérculos por tratamiento.....	63

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO N° 1: Registro meteorológicos promedio mensual (2017).....	74
ANEXO N° 2: Análisis físico químico del suelo – inicial.....	75
ANEXO N° 3: Análisis de agua.....	76
ANEXO N° 4: Riego previo a la preparación del terreno.....	77
ANEXO N° 5: Registro de la preparación del terreno.....	78
ANEXO N° 6: Prueba de bulbo húmedo.....	79
ANEXO N° 7: Módulo de inyección de fertilizantes.....	80
ANEXO N° 8: Labores culturales desarrolladas.....	81
ANEXO N° 9: Registro de la cosecha y clasificación por calibre.....	84
ANEXO N° 10: Análisis físico químico del suelo – final.....	85
ANEXO N° 11: Análisis factorial para número de tubérculos comerciales.....	89
ANEXO N° 12: Análisis factorial para número de tubérculos no comerciales.....	91
ANEXO N° 13: Prueba de comparación de medias tukey, para los calibres de tubérculos.....	93
ANEXO N° 14: Análisis foliar de hojas.....	96
ANEXO N° 15: Análisis foliar de tubérculos.....	97

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

Acrónimo

ANA	Autoridad Nacional del Agua
CE	Conductividad eléctrica
ET _o	Evapotranspiración de referencia
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
K _c	Coefficiente de cultivo
MINAGRI	Ministerio de Agricultura y Riego
pH	Potencial de hidrógeno
RPD	Riego deficitario con secado parcial de raíces
SAR	Relación de absorción de sodio
SENAMHI	Servicio Nacional de Meteorología
UNALM	Universidad Nacional Agraria La Molina

RESUMEN

El ensayo fue realizado en la parcela experimental de la Facultad de Ingeniería Agrícola de la UNALM. El objetivo principal de la investigación fue comparar y evaluar el efecto de la fertirrigación en el rendimiento del cultivo de papa, variedad UNICA, en condiciones de riego deficitario por secado parcial de raíces (RPD) y en condiciones de 100% ETo, en dos tipos de disposiciones de laterales de riego. El plan nutricional fue estimado a partir de un rendimiento proyectado (60 t ha^{-1}) en función a la absorción de nutrientes por el cultivo, siendo la dosis aplicada por fertirriego: 127 kg N ha^{-1} , $237 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$, $235 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1}$, $66 \text{ kg CaO ha}^{-1}$, $36 \text{ kg MgO ha}^{-1}$ y 29 kg S ha^{-1} . El ensayo se basó en un diseño factorial completamente al azar de dos factores: tipo de riego (T y RP) y tipo de disposición de laterales (1 y 2); obteniendo como resultado cuatro tratamientos (PR1, RP2, T-1 y T-2). El RPD es una técnica de riego por la cual una zona del sistema radicular permanece húmeda mientras la otra zona es sometida a déficit hídrico. En la investigación, la fase experimental se realizó en dos periodos: el primero, entre los días 20-29 después de la siembra (durante el crecimiento) y el segundo, entre los días 76-94 después de la siembra (durante la madurez). Las características evaluadas fueron la emergencia, la altura de las plantas y el número de tallos. Con los tubérculos cosechados se evaluó el rendimiento total y comercial, así como el número y tamaño de tubérculos. En post cosecha se determinó el porcentaje de materia seca y la extracción de nutrientes N, P, K, Mg, Cay S. El análisis estadístico mostró que los resultados de los factores: tipo de disposición y tipo de riego son significativos, y los efectos influyen sobre el rendimiento total, siendo el tipo de riego el que mayor incidencia tuvo en el rendimiento total, mientras que el factor disposición tuvo mayor incidencia en el rendimiento comercial. Los rendimientos comerciales alcanzados fueron de 55 t ha^{-1} , 51 t ha^{-1} , 54 t ha^{-1} y 60 t ha^{-1} para T-1, RP1, RP2 y T-2, respectivamente. Se concluye que con la disposición tipo 2 se obtiene mejor comportamiento en rendimiento, tanto para 100% ETo y 50% ETo.

Palabras claves: Fertirriego; disposición de laterales; riego RPD; UNICA.

ABSTRACT

The trial was conducted in the experimental plot of the Faculty of Agricultural Engineering of UNALM. The main objective of the research was to compare and evaluate the effect of fertirrigation on the yield of the potato crop, variety UNICA, under deficit irrigation conditions by partial root drying (RPD) and in conditions of 100% ETo, in two types of provisions of irrigation sides. The nutritional plan was estimated from a projected yield (60 t ha^{-1}) depending on the absorption of nutrients by the crop, the dose being applied by fertigation: 127 kg N ha^{-1} , $237 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$, $235 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1}$, $66 \text{ kg CaO ha}^{-1}$, $36 \text{ kg MgO ha}^{-1}$ y 29 kg S ha^{-1} . The trial was based on a completely random factorial design of two factors: type of irrigation (T and RP) and type of lateral arrangement (1 and 2); obtaining as a result four treatments (PR1, RP2, T-1 and T-2). The RPD is an irrigation technique by which one zone of the root system remains wet while the other zone is subject to water deficit. In the research, the experimental phase was carried out in two periods: the first, between days 20-29 after sowing (during growth) and the second, between days 76-94 after sowing (during maturity). The evaluated characteristics were the emergence, the height of the plants and the number of stems. With the harvested tubers, the total and commercial yield, as well as the number and size of tubers were evaluated. In post harvest the percentage of dry matter and the extraction of nutrients N, P, K, Mg, Ca and S were determined. The statistical analysis showed that the results of the factors: type of disposal and type of irrigation are significant, and the effects influence the total yield, with the type of irrigation having the highest incidence in the total yield, while the disposition factor had a greater incidence in the commercial yield. The commercial yields reached were 55 t ha^{-1} , 51 t ha^{-1} , 54 t ha^{-1} and 60 t ha^{-1} for T-1, RP1, RP2 and T-2, respectively. It is concluded that with the type 2 disposition, better performance behavior is obtained, both for 100% ETo and 50% ETo.

Key words: Fertigation; lateral arrangement; irrigation RPD; UNICA

I. INTRODUCCIÓN

La papa es uno de los cuatro cultivos alimenticios más importantes del mundo junto al trigo, arroz y maíz, y el segundo más importante de la agricultura del Perú, llegando a representar el 10,6 % del Valor Bruto de la Producción (VBP) del sub sector agrícola, siendo el sustento de más de 710 mil familias. En el Perú, el consumo per cápita se incrementó de 67 a 87 kilos anuales en el 2016, esperando tener un consumo de 100 kilos per cápita anual para el 2021. En la actualidad es el primer productor de papa de América del Sur y el segundo de América Latina. Sin embargo, el rendimiento de producción es inferior en 26% al promedio mundial, siendo la media nacional de 14.7 t ha⁻¹, superado por países vecinos, que oscilan entre 18.4 t ha⁻¹ (Ecuador), 20 t ha⁻¹ (Colombia), 27.9 t ha⁻¹ (Brasil) y 21.6 t ha⁻¹ (Chile). (MINAGRI, 2017).

Debido al bajo rendimiento de la producción, respecto a otros países, y a su importancia económica y social para el Perú, existe la necesidad imperante de utilizar alternativas para incrementar la producción, teniendo entre otras, una aplicación adecuada y racional de fertilizantes, además del correcto manejo del agua durante la producción. Para ello es necesario introducir nuevas tecnologías como el fertirriego mediante el riego por goteo.

En ese contexto, en el presente trabajo de investigación se aplicó la tecnología de fertirrigación, con el objetivo de mejorar la producción, mediante una dosis de fertilización basada en la extracción y absorción de nutrientes, estimadas para un rendimiento esperado de 60 t ha⁻¹. Además, se buscó optimizar el consumo de agua, para ello se aplicó el RPD, en dos tipos de disposiciones de laterales de riego, unas de manera lineal y otra en paralelo. Con los conocimientos generados, se espera contribuir con un paquete de tecnología probada, que el agricultor tome como referencia para mejorar su productividad, ya que producirá más en menos área, usando racionalmente el agua y los fertilizantes.

1.1 Justificación

El mundo atraviesa por un contexto en el que cada vez crece la población y por ello se demanda más alimentos, se estima que para el 2050, la agricultura tendrá que producir un 60% más de alimentos a nivel mundial, y un 100% más en los países en desarrollo (Alexandratos y Bruinsma, 2012), con el incremento de la población existe mayor competencia por el uso suelo y del agua, el sector agrícola representa aproximadamente el 70% de todas las extracciones de agua dulce a nivel mundial, y más del 90% en la mayoría de los países menos desarrollados del mundo (WWAP, 2015). La opción más sostenible será producir más en espacios reducidos y con el menor consumo de agua, lo que será posible gracias a la combinación de un mejor control del agua, un mejor ordenamiento de tierras y mejores prácticas agrícolas.

En el contexto mencionado, la papa se encuentra dentro de los cuatro cultivos alimenticios más importantes del mundo, por ello es fundamental mejorar la producción y hacer que se incrementen los rendimientos. El Perú es gran productor, pero a la vez tiene bajos rendimientos, debido a la influencia de diversos parámetros, ajustar todos ellos no solo puede significar un incremento de rendimientos y mejora de calidades, sino también tener un costo y un ingreso acorde a los mismos. Existen factores que no pueden ser alteradas por los agricultores, mientras que otros si, dentro de los que sí se pueden están, la disponibilidad de agua y de nutrientes.

Existen numerosas técnicas para regar y herramientas que permiten el uso eficiente del agua y fertilizantes. El riego del cultivo de papa es un factor determinante en la producción, “existe relación positiva y directa entre la cantidad de agua que dispone la planta y el rendimiento comercial” (Egúsquiza, 2014). En la actualidad hay un amplio rango de alternativas para la aplicación del agua al cultivo, entre ellos destacan el riego por gravedad, aspersión y goteo. El aporte del agua debe ser en cantidad adecuada y en el momento preciso, de tal forma que la planta no gaste mucha energía para obtenerla, para ello es un reto mantener el suelo con un correcto humedecimiento y con los nutrientes próximos a las raíces.

El agua, junto con la nutrición, constituyen quizás los insumos más relevantes en la producción de un cultivo de papa. De allí, que la presente investigación trata de incorporar la tecnología en la producción de papa, ésta consiste en la incorporación de sistema de fertirrigación, teniendo como línea base el uso racional del agua y los fertilizantes, con el fin de mejorar el rendimiento comercial.

En ese sentido, la presente investigación buscó comparar la aplicación de fertilizantes mediante un sistema de riego presurizado (fertirriego), en el cultivo de papa, en dos tipos de disposiciones de laterales de riego y con riegos al 100% ETo, riego normal, y 50% ETo, riego deficitario con de secado parcial de la zona de raíces (RPD).

1.2 Objetivos de la investigación

Objetivo General.

Comparar el efecto de la fertirrigación en el rendimiento del cultivo de papa en condiciones de 100% ETo y déficit hídrico (riego parcial en zona de raíces), en dos tipos de disposición de laterales de riego.

Objetivos específicos.

- a. Evaluar el efecto de una dosis de fertilización planteada para una producción estimada de 60 t ha^{-1} en dos disposiciones de laterales de riego.
- b. Determinar la absorción y extracción de elementos mayores y menores en el cultivo de papa, y calcular la eficiencia de extracción nutriente para los cuatro tratamientos.
- c. Evaluar el efecto del riego deficitario de secado parcial de la zona de raíces, en el tamaño y cantidad de tubérculos por planta en los cuatro tratamientos.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Características de la especie en estudio

2.1.1 La papa variedad UNICA

“UNICA es una variedad que fue seleccionada y evaluada por el CIP durante más de 7 años. Tiene atributos de resistencia y precocidad que la hacen atractiva para los agricultores involucrados en el cultivo de papa. La adaptación a diferentes ambientes permite una amplia distribución geográfica, en regiones de la costa y sierra del Perú. Las buenas características para el consumo en fresco y para el procesamiento en tiras, representan una alternativa de mejores ingresos para los agricultores por la demanda que puede generar en el mercado” (Gutiérrez y Espinoza, 2007).

Egúsquiza (2014), resalta las siguientes características de la planta; es de porte bajo, follaje verde oscuro con tallos pigmentados, escasa floración, flores de color violáceo algo pálidas (de lejos parecen ser blancas), producen tubérculos de tamaño uniforme, de forma oblonga o alargada, color rojo claro, ojos superficiales, pulpa blanca marfil, brotes rojos violáceos.

Presenta alto rendimiento potencial (50 t ha^{-1}). Para el invierno en zonas de la costa peruana (trópico bajo) y en épocas húmedas de la zona sierra (trópico alto) se puede alcanzar el rendimiento potencial. En la primavera y en la época seca de las respectivas zonas se reduce el rendimiento. Comercialmente se pueden lograr rendimientos promedios de hasta 40 t ha^{-1} ”. (Gutiérrez y Espinoza, 2007).

2.1.2 Crecimiento, desarrollo y tuberización

El conocimiento de la fenología de la planta de papa y de la asimilación de nutrientes durante el crecimiento y desarrollo, es de importancia clave para determinar los sistemas de fertilización.

La papa es un cultivo que requiere asimilar grandes cantidades de, nutrientes en un breve período de tiempo, ya que su sistema radicular es fibroso ramificado, poco desarrollado y superficial, lo que limita la intercepción radical de los nutrientes. Presenta un crecimiento acelerado de su follaje que se expande libremente y un período relativamente corto de engrosamiento de los tubérculos, como órgano de reserva (Gruner, 1982. Citado por Nuñez, 2016).

La papa requiere suelos bien aireados, drenados, profundos, con buen nivel de materia orgánica, pH entre 5 y 7. Es un cultivo moderadamente sensible a la salinidad y relativamente sensible al déficit de agua, especialmente durante el período de formación de estolones y el inicio de tuberización. Entre los factores que limitan la producción de papa, están la temperatura, duración del día, intensidad de luz y condiciones físicas del suelo, niveles de fertilización, los cuales son responsables, en gran proporción, de las variaciones en los rendimientos.

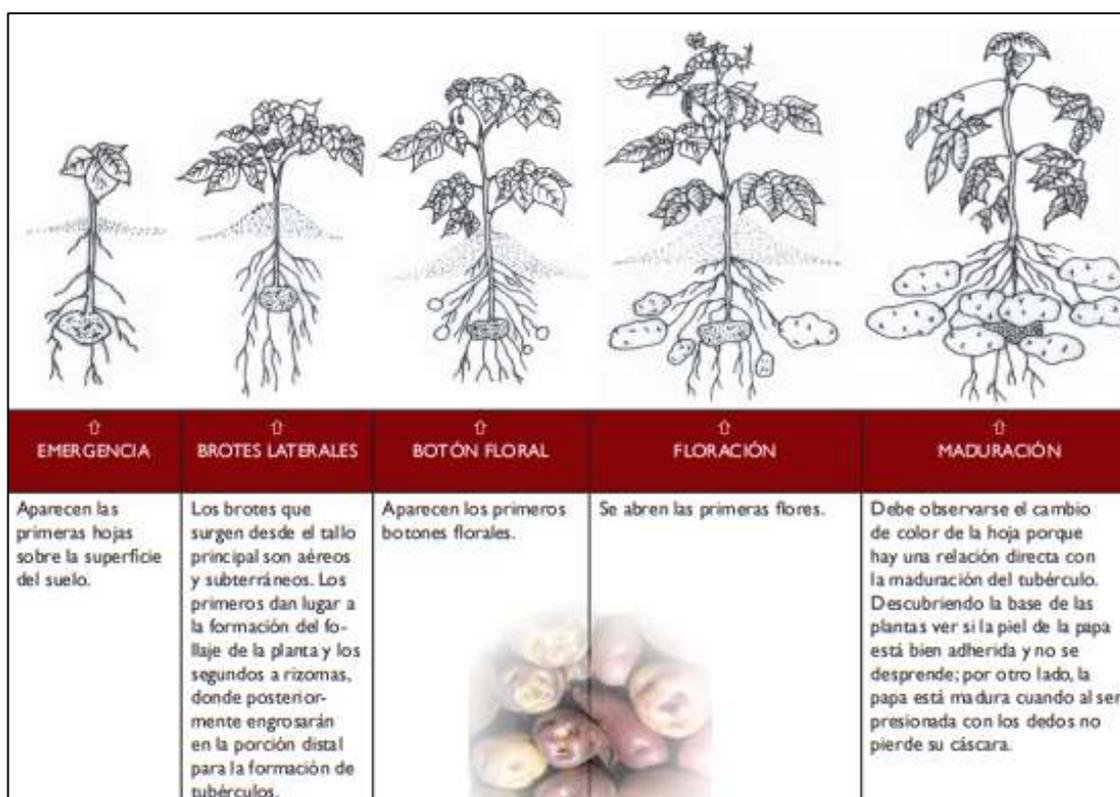


Figura 1: Fases fenológicas de la papa.

FUENTE: SENAMHI

2.1.3 Requerimientos climáticos

Es esencialmente un "cultivo de clima templado", para cuya producción la temperatura representa el límite principal: las temperaturas inferiores a 10° C y superiores a 30° inhiben decididamente el desarrollo del tubérculo, mientras que la mejor producción ocurre donde la temperatura diaria se mantiene en promedio de 18° a 20° C. (ANA, 2000?)

El tubérculo en latencia, inicia su brotación y emergencia en forma lenta a 5 °C y se maximiza a los 14-16 °C. Esto es importante al considerar la época de plantación ya que esta se debe iniciar cuando la temperatura del suelo haya alcanzado por lo menos 7-8°C. La respuesta fotoquímica a la temperatura tiene estrecha relación con la intensidad lumínica. Así, cuando esta última es alta (sobre 50.000 lux) la fotosíntesis neta se optimiza en altas temperaturas. (ANA, 2000?)

2.1.4 Demanda de agua

La papa es exigente en agua y muy sensible al déficit hídrico, demanda en promedio entre 5000-7000 m³/ha/campaña en costa (FAO, 2008), requiriendo (50 mm/semana) durante la formación de tubérculos. Pudiendo alcanzar los 13 mm/día durante el llenado de estos (130 metros cúbicos por hectárea día). Esto, por supuesto, depende de la variedad, situación climática, textura del suelo, etc. (Rojo, 2006). En condiciones de déficit hídrico, son afectados el rendimiento y la calidad de los tubérculos, además de otros parámetros, tales como el grado comercial, densidad, necrosis del centro, manchas, centro hueco y otros. El grado comercial es muy sensible a las deficiencias de manejo del riego. (Kafkafi y Tarchitzky, 2012)

2.1.5 Contenido de humedad del suelo

Existen varios métodos para medir el contenido de humedad en el suelo, estos pueden ser métodos directos o indirectos. Uno de los métodos es el gravimétrico, éste da exactitud, pero requieren de un procedimiento que lleva tiempo y da un dato con demora, otros métodos más sofisticados pueden brindar datos volumétricos (en porcentaje o en mm de agua).

El rendimiento es alto cuando la humedad del suelo se mantiene en un 70% de su capacidad disponible. La humedad constante durante el inicio de la tuberización aumenta la producción de tubérculos. Un incremento en los niveles de humedad de 20-80% incidirá en el crecimiento de los tallos, área foliar, peso seco y número de tubérculos. Riegos frecuentes al momento de la tuberización y una tensión de humedad de 40 kPa (0,4 bar) proporcionan rendimientos altos, gran cantidad de tubérculos, buen contenido de almidón. (Rojo, 2006)

Los terrenos con excesiva humedad, afectan a los tubérculos ya que se hacen demasiado acuosos, poco ricos en fécula y poco sabrosos y conservables. En los terrenos secos las ramificaciones del rizoma se alargan demasiado, el número de tubérculos aumenta, pero su tamaño se reduce considerablemente.

2.2 Fundamento de la nutrición en papa

2.2.1 Demanda de nutrientes

La papa es una especie de alta respuesta a la aplicación de fertilizantes debido a sus características de baja densidad radicular (1.7 cm/cm^3), lo que implica una baja capacidad de exploración del suelo. Esta característica del cultivo determina que éste responda de manera importante a dosis altas de elementos minerales aplicados al suelo. Debido a esta misma razón la papa es una planta muy exigente en humedad disponible. (Sierra, *et al*, 2002)

La extracción de nutrimentos del suelo por el cultivo de papa depende de la variedad, fertilidad del suelo, condiciones climáticas, rendimiento posible de alcanzar y manejo del cultivo. La mayor demanda nutricional del cultivo de papa se presenta a partir del inicio de la tuberización y crecimiento del follaje. (Pumisacho, 2002). Entre los principales nutrientes destacan por cantidad extraída el nitrógeno y potasio, le siguen en importancia el fósforo, calcio, magnesio y azufre (Sierra, *et al*, 2002).

La extracción de nutrientes por el cultivo depende principalmente del rendimiento esperado, a mayor rendimiento, mayor demanda de nutrientes por el cultivo. Este aumento de la demanda se debe a la mayor cantidad de materia seca formada y no a un aumento de la concentración del elemento en cada planta (Sierra, *et al*, 2002). Las cantidades de nutrientes extraídas por el cultivo de papa según diferentes autores con rendimientos moderados a altos se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1: Extracción relativa de nutrientes en el cultivo de papa para diferentes rendimientos, según diferentes autores.

Rendimiento t/ha	N	P2O5	K2O	CaO	MgO	S	Referencia
	-----kg/ha-----						
20	140	39	190	2	4	6	FAO/IFA, 2002
38	224	67	336	-	-	-	Sierra <i>et al</i> , 2002
40	175	80	310	-	23	16	FAO/IFA, 2002
40	120	55	221	-	-	-	Sierra <i>et al</i> , 2002
56	235	71	400	91	63	22	Westermann, 2005
63	288	128	396	-	35	26	Sierra <i>et al</i> , 2002
94	300	80	480	-	52	-	Sierra <i>et al</i> , 2002

FUENTE: Campos, 2014.

La fertilización precisa para el cultivo de papa es difícil de lograr, debido a que en este proceso intervienen factores dinámicos de tipo biológico, químico y agrofísico que interactúan entre el suelo, la planta y la atmósfera que hacen difícil su predicción (Sierra *et al*, 2002). De la tabla 1 se nota que existe una tendencia general, que a mayor rendimiento existe un moderado incremento de la extracción de nutrientes.

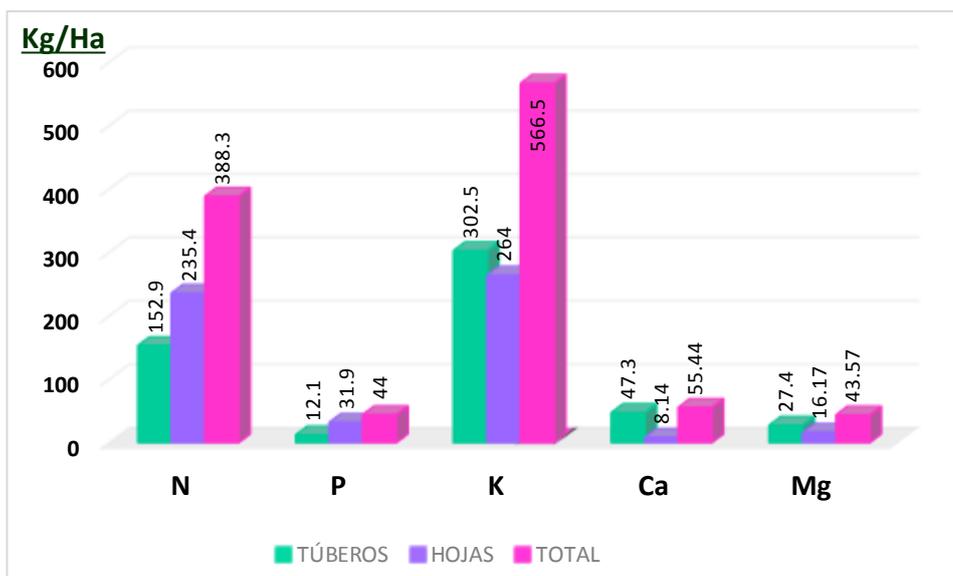


Figura 2: Remoción de nutrientes en 55 t ha⁻¹ en papa.

FUENTE: Reitz, 1991. Citado por Rottenberg, 2017

- **Nitrógeno**

Existen tres formas básicas de fertilizantes nitrogenados.

N-Urea: una molécula eléctricamente neutra– $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$

N- Amoniacal: que lleva una carga eléctrica positiva– catión NH_4^+

N-Nitrato: que lleva una carga eléctrica negativa– anión NO_3^-

El nitrógeno es considerado como uno de los elementos más importantes en la nutrición de las plantas. Es constituyente de la clorofila y está involucrado en el proceso de fotosíntesis. (Campos, 2014). Las necesidades de nitrógeno de un cultivo de papas requieren un cuidadoso manejo. Un elevado suministro de N durante el período inicial de crecimiento demora la formación de los tubérculos y deriva el crecimiento a las partes aéreas vegetativas. (Kafkafi y Tarchitzky, 2012)

La mejor decisión sobre la conveniencia de aplicar N durante la estación de crecimiento se realiza sobre la base de un análisis de tejido. Los valores de N-NO del pecíolo en papa deberían mantenerse en las 25.000 ppm hasta la iniciación de los tubérculos, y en el rango de 13.000 a 15.000 ppm durante el período de su engrosado (Zhang et al., 1996. citado por Kafkafi y Tarchitzky, 2012).

- **Fósforo**

Una elevada concentración de fósforo (P) en el suelo durante los estadios iniciales estimula el número de tubérculos iniciales (Jenkins y Ali, 2000. citado por Kafkafi y Tarchitzky, 2012). La planta absorbe P durante todo el período de crecimiento de los tubérculos, desde los días 35 a 95, a una tasa constante diaria de 51 mg de P por planta.

El National Plant Food Institute (1995), señala que el fósforo actúa en la fotosíntesis, respiración, almacenamiento y transferencia de energía, división celular, alargamiento celular y muchos otros procesos de la planta. Promueve la formación temprana y el crecimiento de las raíces, mejora la calidad de numerosas frutas, verduras y cereales; además el fósforo ayuda a que las plántulas y las raíces se desarrollen más rápidamente, permite a la planta soportar inviernos rigurosos, aumenta la eficiencia de uso de agua, acelera la madurez la cual es importante para la cosecha y para la calidad del cultivo; también contribuye a aumentar la resistencia a las enfermedades en algunas plantas; por otro lado señala que la deficiencia de este elemento se manifiesta con hojas, ramas y tallos purpúreas; madurez y desarrollo lento; pequeños tallos delgados y bajo rendimientos.

El fósforo es un elemento crítico durante el periodo inicial de desarrollo de la planta y de tuberización. Una deficiencia de fósforo retarda el crecimiento apical, dando lugar a plantas pequeñas y rígidas. Se reduce la formación de almidón en los tubérculos, contribuyendo a la formación de manchas necróticas de color castaño-herrumbre, distribuidas en forma dispersa en toda la pulpa. (Oyarzún et al., 2002. Citado por Campos, 2014)

- **Potasio**

El contenido aproximado de potasio en la corteza terrestre es del orden 2.3%. La mayor parte del contenido medio de potasio en la corteza terrestre está unido a minerales primarios o está presente en las arcillas que conforman la fracción mineral del suelo con tamaños de partículas inferiores a 2 μm . Por ésta razón los suelos ricos en arcilla son

también generalmente ricos en potasio (Gardner, 1993. citado por Ramos, 1991).

El Instituto de la Potasa y el Fósforo indica que a pesar de que la mayoría de los suelos contenían miles de kg de potasio (a menudo más de 20 t/ha), solo una pequeña cantidad (menos del 2 %) está disponible para las plantas durante el ciclo de crecimiento (INPOFOS,1997. Citado por Núñez, 2016).

Este cultivo es un gran consumidor de potasio. Los requerimientos diarios nutrimentales durante las etapas críticas en la tuberización (o llenado) son: 4.5 Kg N ha⁻¹, 0,7 Kg P ha⁻¹, 7,2 Kg K ha⁻¹. El incremento en los rendimientos diarios durante las etapas críticas o de llenado puede llegar a ser de 1000 a 1500 Kg ha⁻¹. (Buys, 1987, citado por Rottenberg 2017)

Tabla 2: Remoción de potasio en 7.6 kg t⁻¹ de tubérculo.

Rend. Potenciales (t/ha)	Remoción de K Potasio (Kg/Ha)*
50	380
60	460
70	530
80	600
90	680

FUENTE: Buys, 1987. Citado por Rottenberg, 2017

2.2.2 Suelo

Los mejores suelos son los francos, francos-arenosos, franco-limosos y franco-arcillosos, de textura liviana, con buen drenaje y con una profundidad efectiva mayor de 0.50 m, que permitan el libre crecimiento de los estolones y tubérculos y faciliten la cosecha. (Octavio y Pérez, 2003). Por su parte suelos de textura pesada, es decir con altos contenidos de arcillas, dificultan la expansión total del tubérculo además de adsorber algunos elementos del suelo, particularmente el potasio. Lo cual impide la absorción por parte de la planta.

En general, en fertirriego el aporte del suelo se considera menor que en el sistema tradicional dado el menor volumen de suelo explorado por las raíces, normalmente la mitad que en un sistema tradicional. (Calvache, 2002). Además, la fertilidad de un suelo es medido normalmente en función de la disponibilidad de nutrientes para las plantas. Sin embargo, un suelo con alta cantidad de nutrientes no es necesariamente fértil, ya que diversos factores, como la compactación, mal drenaje, sequía, enfermedades o insectos pueden limitar la disponibilidad de nutrientes por ello, el concepto de fertilidad debería incluir criterios químicos, físicos y biológicos.” (Pumisacho, 2002)

2.3 Fertirriego.

El fertirriego es la aplicación de fertilizantes sólidos o líquidos por los sistemas de riego presurizados, creando un agua enriquecida con nutrientes (Sánchez, 2000). Esta es una moderna técnica agrícola que provee la excelente oportunidad de maximizar los rendimientos y a la vez reducir la polución ambiental (Hagin, 2002. Citado por Melgar), “al incrementar la eficiencia de uso de los fertilizantes, minimizar la aplicación de éstos y aumentar los beneficios económicos de la inversión en fertilizantes. En la fertirrigación, el momento, las cantidades y la concentración de los fertilizantes aplicados son fácilmente controlados” (Melgar, 2012).

La fertirrigación consiste en proporcionar a la planta el fertilizante disuelto en el agua de riego, distribuyéndolo uniformemente para que, prácticamente, cada gota de agua contenga la misma cantidad de fertilizante (Bello, 2000). Los fertilizantes aplicados en el agua de riego se aprovechan con mayor eficiencia, puesto que las raíces no requieren un desarrollo más allá de la zona de humedecimiento y aprovechan al máximo los nutrientes que se apliquen a través del agua de riego (Holzapfel *et al.*, 2001)

Existen diferentes tipos de inyección de fertilizantes, el más común es el inyector de tipo Venturi. Ésta es una unidad que hace uso del principio de succión de Venturi al emplear la presión inducida por el flujo de agua para chupar la solución fertilizante del tanque hacia la línea de riego. (Kafkafi y Tarchitzky, 2012)

2.3.1 Ventajas

La página web del programa para fertilización de cultivos (SMART) indica las siguientes ventajas:

- Mediante este método el fertilizante es aplicado directamente en las zonas de absorción de las raíces, lo que lo convierte en uno de los más eficaces.
- También se puede corregir de manera rápida cualquier requerimiento de nutrientes en el cultivo.
- Otra de las ventajas de la fertirrigación es que le permite al productor controlar el ritmo de crecimiento de la planta, administrando a su conveniencia el nivel de los sistemas de riego y la cantidad de fertilizante.
- Por otro lado, la fertirrigación permite al productor el ahorro de tiempo y mano de obra, además de que la aplicación del fertilizante es más precisa y de manera más uniforme, así como una mejor absorción de la planta.
- Reduce las pérdidas de fertilizantes por percolación, si y solo si se tienen buen manejo en la aplicación de cantidades adecuadas de agua.

2.3.2 Desventajas

Según Cañamero y Laguna, (2012), las desventajas son las siguientes:

- Si no hay un buen reparto del agua no hay, lógicamente, una buena distribución de los fertilizantes. En los riegos presurizados se precisa un adecuado coeficiente de uniformidad de la instalación, al ser la nutrición de cada planta proporcional a la cantidad de agua que recibe.
- Es necesario el uso de fertilizantes solubles
- Es necesario la preparación técnica del personal, pues la fertirrigación puede conducir a fracasos si no es bien realizada y controlada.
- Es necesario tener una inversión inicial, para la compra de equipos de fertirriego, fertilizantes solubles.

2.3.3 Método de inyección en un sistema de riego por goteo

a) Inyectores Venturi.

Su funcionamiento se basa en el efecto Venturi, que consiste en producir un estrechamiento en el flujo principal del agua para causar una depresión. Ésta resulta suficiente para succionar la solución química desde un depósito abierto hasta dicho flujo. El Venturi se instala en un by-pass del circuito principal para poder regular el caudal succionado (CREA, 2005)

Ventajas:

- Es un sistema simple y barato.
- Es fácil de instalar, no tiene partes móviles y es particularmente conveniente para parcelas pequeñas o en caso de no disponer de energía eléctrica.

Inconvenientes:

- Para que funcione el sistema se ha de producir una pérdida de carga (hasta 1 kg/cm²).
- Aunque se puede modificar el flujo en el Venturi por medio de válvulas, el caudal inyectado es muy sensible a la variación de presión en el sistema.

2.3.4 Dosificación de fertilizantes en la fertirrigación

Para aplicar la misma dosis de fertilizante durante un estadio específico fenológico de una planta, pueden realizarse dos patrones diferentes de aplicación según el cultivo, el tipo de suelo y el sistema de manejo del establecimiento. (Sne, 2006, citado por Kafkafi y Tarchitzky, 2012)

a) Dosificación cuantitativa

Está basada en aplicación de cantidades específicas de fertilizantes a una determinada área a través del agua de riego. Los requerimientos de nutrientes se expresan generalmente en unidades de la cantidad / superficie, tales como Kg/ha lbs/acre, etc. La inyección de los fertilizantes no es proporcional al flujo de agua. Puesto que la relación

de dilución y el caudal de inyección no son constantes, la concentración de los fertilizantes es alta al principio y se disminuye a medida que avanza el riego. (SMART).

b) Dosificación proporcional

En ésta, la dosis de fertilizantes que se aplica al campo es proporcional al agua requerida por el cultivo, por lo tanto, la concentración del fertilizante en el agua de riego permanece constante. (Cañamero y Laguna, 2012)

2.3.5 Características de los fertilizantes para el fertirriego

Un amplio rango de fertilizantes, tanto sólidos como líquidos, es adecuado para la fertirrigación, dependiendo de las propiedades fisicoquímicas de la solución fertilizante (Kafkafi y Tarchitzky, 2012).

Deben considerarse cuatro factores principales al elegir fertilizantes para fertirrigación:

- Tipo de cultivo y estadio de crecimiento.
- Condiciones del suelo.
- Calidad de agua.
- Disponibilidad y precio del fertilizante

2.4 Riego deficitario

Aprovechando la tecnología existente en el riego, principalmente en riego localizado, se está trabajando en busca de la posibilidad de ajustar los aportes de agua de riego a sus estrictas necesidades, ahorrando así el exceso y evitando un consumo consuntivo. Ante ello surge la necesidad de utilizar técnicas de riego como es el riego deficitario, siendo capaces de reducir el agua aplicada con el mínimo impacto posible sobre la producción, toman una especial relevancia en su estudio (Sánchez y Torrecillas, 1995).

El riego deficitario controlado y el secado parcial de raíces son dos técnicas de riego que están siendo aplicadas en numerosos cultivos de todo el mundo, con el propósito de alterar la fisiología de la planta y explotar eficientemente las señales hidráulicas y químicas para obtener beneficios agronómicos de interés comercial como pueden ser: controlar un

excesivo vigor, incrementar la calidad del fruto, ahorrar agua y mejorar la eficiencia en el uso del agua (Santos et al., 2007).

2.4.1 Riego deficitario controlado

El riego deficitario controlado es una estrategia de aplicación de agua basada en la idea de reducir los aportes hídricos en aquellos periodos fenológicos en los que un déficit hídrico controlado no afecta 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. (Sanchez-Blanco y Torrecillas, 1995)

2.4.2 Riego deficitario de secado parcial de la zona de raíces

El Secado Parcial de Raíces es una técnica de déficit de riego que consiste en someter una parte del sistema radicular a déficit hídrico mientras la otra se mantiene irrigada. La finalidad es inducir la producción de ácido absísico (ABA) en las raíces parcialmente secas que sirva como señal para que las hojas reduzcan la apertura estomatal y de esta manera disminuya la pérdida de agua. Al mismo tiempo, las raíces bien irrigadas mantienen el follaje con buen estado hídrico. (Rojas *et al*, 2007)

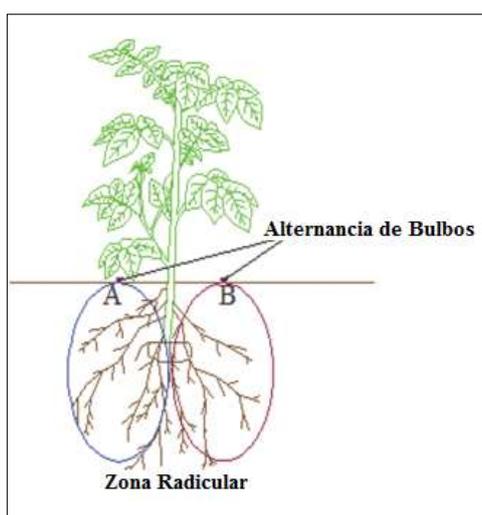


Figura 3: Vista en perfil de la alternancia de aplicación de agua a la planta.

FUENTE: Sánchez y Meza (2014)

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Lugar de estudio

La investigación se desarrolló en la parcela experimental de la facultad de Ingeniería Agrícola (FIA), en la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM), colindante con el centro de ventas de la UNALM y a la derecha de la puerta principal. La ubicación geográfica es: Latitud su 12° 4' 54'', longitud oeste 76° 56' 50'' y altitud de 240msnm. Los datos climatológicos (Tabla 3) fueron obtenidos de la estación Davis, perteneciente al departamento de Recursos Hídricos de la FIA, son correspondientes a la fase experimental.

Tabla 3: Datos climáticos de la Estación Davis 2017 UNALM.

Mes	T° media (°c)	HR Media (%)	Precipitación (mm)	Tanque de evaporación (mm)
Junio	18.01	81.63	0.75	31.48
Julio	17.32	88.12	0	38.43
Agosto	16.40	90.85	0.50	37.23
Septiembre	16.20	91.95	0.75	44.57

FUENTE: Estación Davis, FIA-UNALM

3.1.1 Características del suelo

El análisis de suelos fue desarrollado por el Laboratorio de agua, suelo, medio ambiente y fertirriego, de la facultad de Ingeniería Agrícola, los resultados indican que la conductividad eléctrica (CE) es de 1.05 dS m⁻¹, valor que muestra que el suelo es muy ligeramente salino, suelo es de textura franco arenoso, de reacción moderadamente alcalino (pH 7.56), presentó un alto nivel medio de fosforo (50.19ppm) y alto nivel de potasio disponible (242 ppm), además presenta baja Capacidad de Intercambio Catiónico (13.91), notándose la necesidad de incorporar materia orgánica, siendo este (1.49%).

Tabla 4: Análisis de suelo

pH	CE(1:1)	CaCO ₃	M.O	P	K	CIC
(1:1)	ds/m	%	%	ppm	ppm	Cmol (+)/Kg
7.56	1.05	1.32	1.49	50.19	242	1.32

FUENTE: Laboratorio de agua, suelo, medio ambiente y fertirriego UNALM

Teniendo en cuenta que la papa es un cultivo de arraigamiento poco profundo, se consideró para el análisis una profundidad de 30 cm, en esta profundidad el suelo es capaz de retener 40.28 mm, como se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5: Capacidad del suelo para retener agua.

Profundidad (cm)	CC %	PMP (%)	Da (gr/cm ³)	Agua retenida (%)	Agua retenida (mm)
0-30	19.1	7.8	1.5	16.95	50.85

FUENTE: Elaboración propia.

3.1.2 Características del agua

El agua utilizada tanto para la preparación de la solución madre de fertilizantes como para el riego, fue el agua almacenado en el reservorio perteneciente a la FIA. La caracterización físico-química se muestra en la Tabla 6.

La conductividad eléctrica del agua es ligeramente salina, con una CE de 0.75 dS.m⁻¹. El RAS calculado fue de 0.52, corroborando que el agua es baja en sodio y presenta condiciones favorables para su uso en riego.

Tabla 6: Análisis de agua

Parámetro	Unidades	Valor
CE	dS.m ⁻¹	0.66
pH	-	7.52
Calcio	meq/l	4.90
Magnesio	meq/l	0.83
Sodio	meq/l	0.89
Potasio	meq/l	0.05
Suma de Cationes	meq/l	6.67
Cloruros	meq/l	1.13
Sulfatos	meq/l	2.67
Bicarbonatos	meq/l	2.83
Nitratos	meq/l	0.00
Carbonatos	meq/l	0.00
Suma de aniones	meq/l	6.62
SAR	-	0.52
Clasificación	-	C2-S1
Boro	ppm	0.57

FUENTE: Laboratorio de Agua, Suelo, Medio Ambiente y Fertirriego UNALM

3.2 Materiales del experimento

- **Material vegetal**

Se utilizó la papa de variedad UNICA, semillas evaluadas y seleccionadas por sus buenas características agronómicas y bromatológicas. Se optó por esta variedad, ya que cumplía con las características: precocidad, adecuada para los meses en los que se desarrolló la fase de campo, y buena demanda por el mercado.

- **Sistema de riego presurizado**

Se aprovechó la instalación de un sistema de riego presurizado, financiado por el Proyecto de Innovación Tecnológica - 2016, con la finalidad de controlar la aplicación del riego parcial en la zona de raíces.

- **Sistema de fertirrigación**

Aprovechando el agua como medio de transporte, para los nutrientes, se optó por la inyección de fertilizantes mediante un sistema de inyección tipo Venturi, ubicada en la parcela demostrativa con la finalidad de disminuir las pérdidas que podrían ocurrir en la conducción por el bajo caudal a utilizar. El Venturi genera una pérdida de carga equivalente a 10mca, a la parcela llega 21mca, por consiguiente, se contó con suficiente presión para el correcto funcionamiento del sistema.

- **Equipo de medición de humedad**

Se utilizaron cuatro sensores del tipo FDR y también se hicieron mediciones continuas por el método gravimétrico, en el que se utilizaron: barreno para extraer muestras, sobres de papel y horno.

- **Equipo de medición de pH y CE**

Se utilizaron para hacer el control de las soluciones madres y también de muestras de suelo. El equipo utilizado fue HQd Portable Meter (HACH)

- **Fertilizantes**

Se contó con cinco fuentes principales de fertilizantes: Fosfato monoamónico (16% N-61%P), sulfato de potasio (50%K), nitrato de calcio (15.5%N-26%CaO), nitrato de potasio (13.5%N-45%K), Krista-Mg (16%Mg-13%S).

- **Equipo de medición meteorológica**

Entre los equipos meteorológicos utilizados tenemos al Tanque Evaporímetro clase "A", perteneciente a la FIA.

- **Materiales complementarios**

- Balanza de precisión
- Mochila de fumigar
- Herramientas para las labores agronómicas (palas, azadas, picos, etc)

- **Herramientas computacionales**

- Software libre R
- AutoCAD
- Microsoft office 2010 (Word, Excel, Power Point)

3.3 Metodología de la investigación

3.3.1 Preparación del terreno

Se aplicó riego pesado mediante el uso de aspersores, una vez identificado el suelo apto para el laboreo se realizó la labranza del terreno utilizando tractor con el implemento arado de disco, finalmente se niveló el terreno de manera manual con el uso de rastrillos, palas y carretilla.

3.3.2 Diseño y disposición experimental

A. Diseño experimental

La presente investigación está basada en un Diseño Factorial Completamente al Azar (D.F.C.A). Se consideró dos factores: (a) tipos de disposición de lateral (Disposición 1 y Disposición 2) y (b) tipos de riego (100% ETo –“T” y 50% ETo –“RP”), obteniendo como resultado cuatro tratamientos, y viendo por conveniente hacer 5 repeticiones para cada uno.

Tabla 7: Descripción y código de los tratamientos.

DESCRIPCIÓN	COMBINACIÓN
Disposición 1, con lamina de riego 50% ETo en RPD	RP1
Disposición 1, con lamina de riego 100% ETo	T-1
Disposición 2, con lamina de riego 50% ETo en RPD	RP2
Disposición 2, con lamina de riego 100% ETo	T-2

FUENTE: Elaboración propia

B. Distribución experimental

En la parcela experimental se instaló 20 unidades experimentales con una distribución completamente al azar como se muestra en la Figura 4; las dimensiones de cada unidad experimental fueron de 3.0m x 4.5m. Todas las parcelas recibirán la misma dosificación en cuanto a fertilización y control fitosanitario.

- El experimento cuenta con cuatro tratamientos. (RP1, T-1, RP2 y T-2)
- Los experimentos tienen 20 unidades experimentales. (1,2,3...20)
- Cada unidad experimental está formada por 45 plantas.
- Cada tratamiento tiene 5 repeticiones.

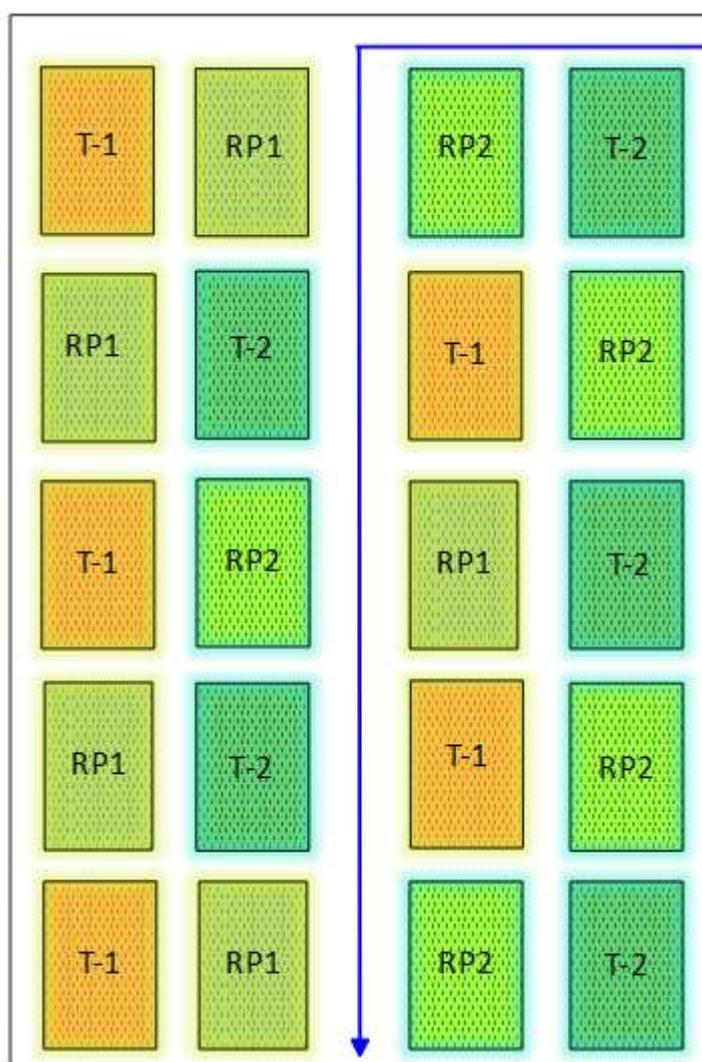


Figura 4: Disposición de las unidades experimentales.

FUENTE: Elaboración propia.

C. Tipos de disposición de laterales de riego

En el presente estudio se hizo la prueba de dos tipos de disposición de laterales de riego; la disposición tipo 1, con laterales paralelas, y la disposición de lateral tipo 2, con lateral lineal. En la Figura 5, se muestra los dos tipos de disposiciones de laterales de riego de los tratamientos.

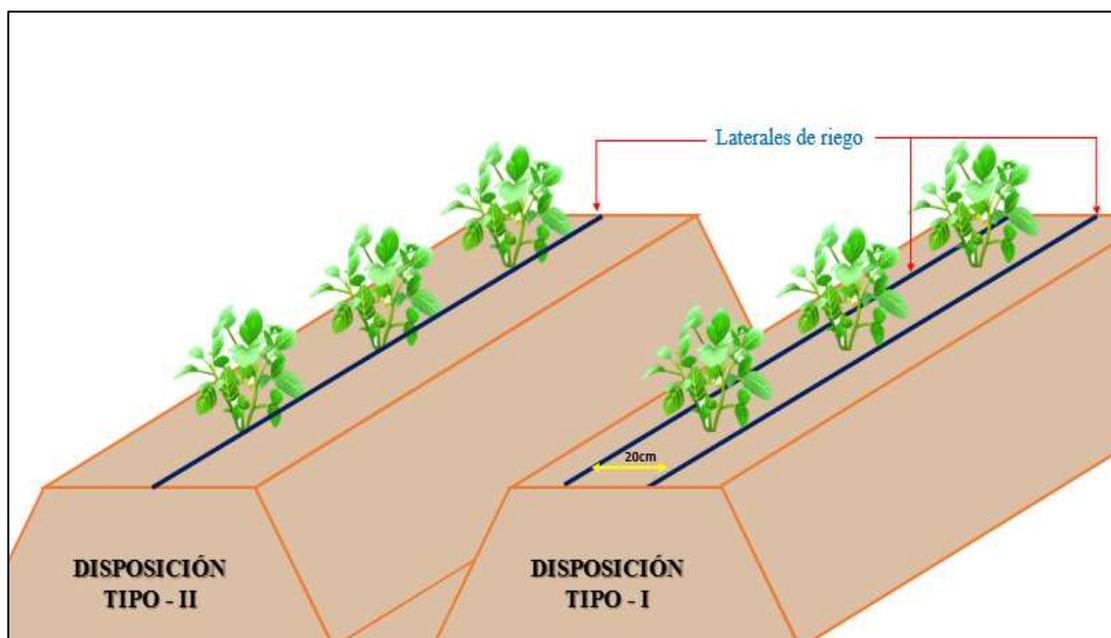


Figura 5: Disposición de laterales de riego.

FUENTE: Elaboración propia.

- **Disposición de lateral tipo 1 (paralela)**

En esta disposición, en cada surco se instaló dos laterales de riego separadas por una distancia de 20 cm, logrando que los emisores tengan una disposición paralela, permitiendo obtener mayor ancho en la franja de humedecimiento, los emisores fueron colocados cada 30 cm y ubicados entre planta y planta.



Figura 6: Disposición de laterales con separación de 20 cm en cada surco.

FUENTE: Elaboración propia

- **Disposición de lateral tipo 2 (lineal)**

En esta disposición, en cada surco se instaló un lateral, en el caso de las unidades con aplicación de riego deficitario con secado parcial de raíces, se utilizó dos laterales juntas con emisores alternados, en cada lateral se alterna la disposición de los goteros, estos están distanciados a 60 cm en cada una de ellas. Al aplicar el RP2, se busca humedecer la mitad de la zona radicular de la planta.



Figura 7: Disposición de lateral tipo 2.
FUENTE: Elaboración propia.

D. Tipos de riego

En la presente investigación se puso a prueba dos formas de aplicación de riego, estas se basaron en la reducción de la lámina de riego y en la forma de humedecimiento de la zona de raíces (Riego deficitario con secado parcial de raíces).

- **Riego deficitario de secado parcial de raíces 50% ETo (RP1 y RP2)**

Al aplicar el RP1, se busca humedecer la mitad de la zona radicular de la planta, con una lámina reducida al 50%, esta aplicación se hizo de manera temporal en dos etapas del desarrollo fenológico de la planta (crecimiento y madurez), considerando que son etapas donde la restricción de agua no es determinante en gran medida.

- **Riego testigo 100% ETo (T-1 y T-2)**

Se aplicaron los riegos siguiendo una frecuencia de un día, establecido en el plan de riego y el plan de fertirrigación; estos riegos se realizaron de manera uniforme en todas las unidades experimentales de presente tratamiento, se aplicó la lámina de riego al 100% de lo establecido, esto se hizo durante todo el proceso productivo del cultivo.

3.3.3 Diseño e instalación del sistema de riego por goteo

La instalación del sistema de riego está formada por los siguientes elementos: Sistema de filtrado, equipo de fertilización, válvulas medidoras, unidad de control, reguladores de presión y sus indicadores, mangueras de polietileno para los laterales y los goteros katiff de 2.3 l h⁻¹.

a) Montaje de la instalación de riego localizado.

La parcela donde se realizó el experimento ya contaba con una instalación primaria de riego presurizado, esta fue complementada y mejorada. Se hizo la instalación del sistema de inyección de fertilizantes (tipo Venturi) para la fertirrigación; para el control preciso en la aplicación del riego, se instaló contadores que permitieron registrar el volumen exacto de agua aplicada a cada unidad experimental, se incorporó válvulas de aire a los arcos de riego y se hizo la instalación de las mangueras porta laterales con sus respectivos goteros, estas últimas fueron instalados de acuerdo a la ubicación aleatoria de las unidades experimentales. Los laterales de riego llevaron consigo una válvula de paso para el control manual del flujo de agua.

La instalación de los laterales y goteros se adaptaron a los requerimientos del presente estudio. Primero se tuvo en cuenta los dos factores que intervenían directamente: disposición de laterales de riego y el tipo de riego a aplicar.

Cada tratamiento tuvo una particularidad que ameritó una adecuada ubicación de los laterales de riego; para el tratamiento PR1 y T-1 la disposición de laterales que se utilizó

fue de manera paralela, con una separación de 20 cm entre ellas; para el tratamiento T-2 se hizo uso de un solo lateral por cada hilera de plantas, considerando una ubicación de los goteros de manera continua con un espaciamiento de 30 cm entre ellos, mientras que para el tratamiento RP2 se tuvo que instalar dos laterales juntas por cada hilera de plantas con una separación alternada de goteros, ubicándose cada 60 cm en cada lateral de riego. Se utilizó marco de plantación, con una separación entre plantas de 0.3m y entre franjas de 1 m., con el fin de conseguir un mayor número de ejemplares por superficie de cultivo y lograr un mejor aprovechamiento de la superficie.

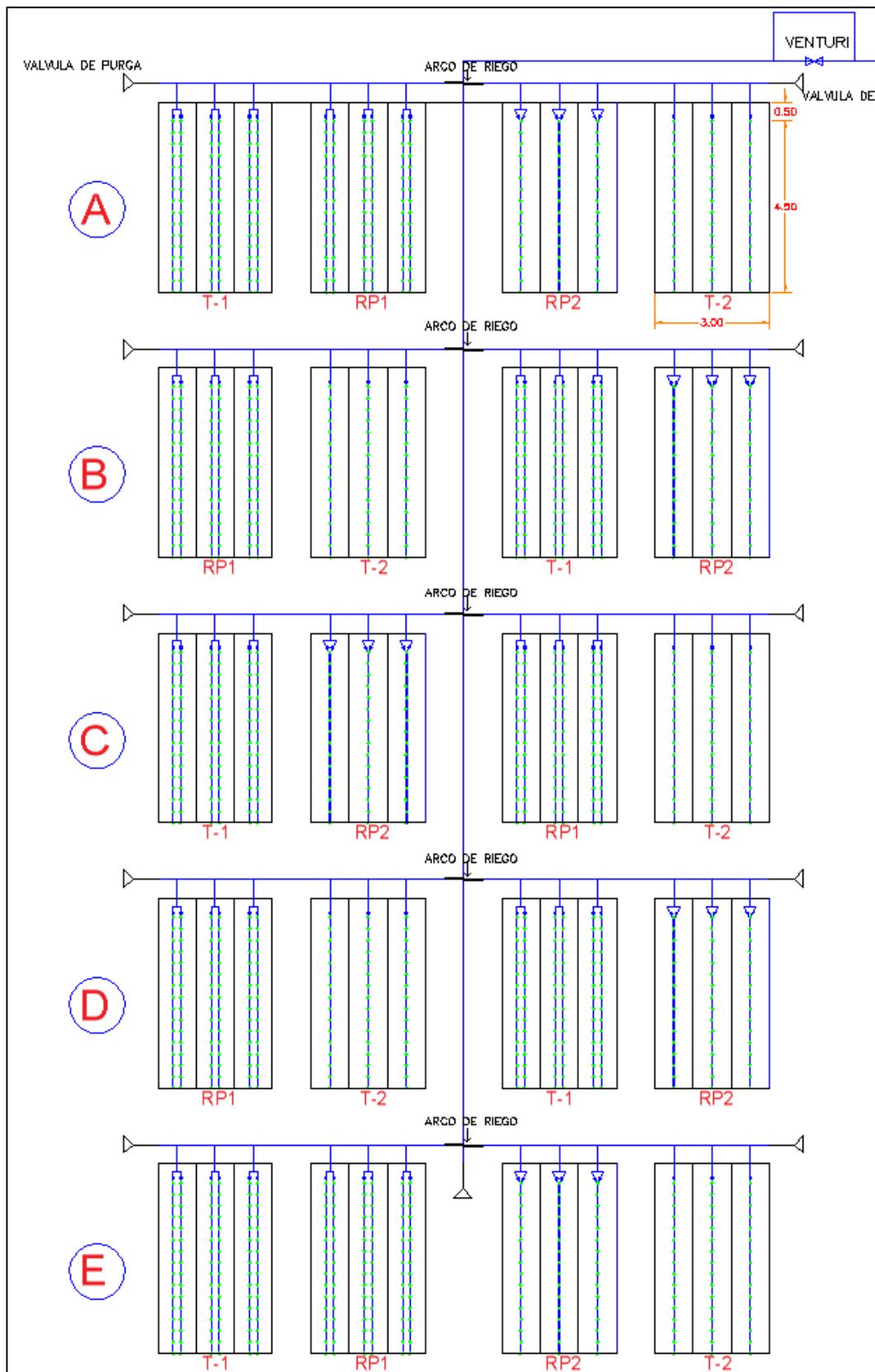


Figura 8: Disposición del sistema de riego en la parcela.

FUENTE: Elaboración propia

b) Instalación del sistema de fertirriego

En la experimentación se utilizó dosificación de tipo cuantitativa, para ello se hizo uso de un sistema de inyección tipo Venturi. Este fue instalado en el mismo campo experimental con la finalidad de disminuir el efecto longitudinal de la tubería en fertirriego. Si la tubería es demasiado larga los fertilizantes que se inyectan en el principio de la línea no podrán llegar a los emisores. (SMART). Esto debido a los bajos caudales aplicados por unidad de planta.

3.3.4 Definición de las fuentes de fertilizantes y diseño del programa de fertilización

- **Estimación de la producción.**

Considerando que una de las características de la variedad UNICA es su elevado rendimiento, que va de moderado a alto, además la cantidad de nutrientes extraídos depende del rendimiento total, en la presente investigación se proyectó alcanzar aproximadamente un rendimiento de 60 tha^{-1} .

- **Muestreo y análisis de suelo.**

Se tomaron muestras de suelo teniendo presente la variabilidad espacial y temporal de la parcela, procurando tomar muestras representativas y homogéneas. La muestra fue trasladada al Laboratorio de agua, suelo, medio ambiente y fertirriego de la FIA, con la finalidad de conocer las características físicas del suelo y la cantidad de nutrientes que se disponía en el suelo.

- **Datos de estudios sobre extracción y absorción de nutrientes en papa.**

La extracción de nutrientes por el cultivo dependerá principalmente del rendimiento esperado, a mayor rendimiento, mayor demanda de nutrientes por el cultivo. (Sierra *et al*, 2002).

Tabla 8: Absorción y extracción de nutrientes por el cultivo de papa para un rendimiento de 60 t ha⁻¹

NUTRIENTE	REQUERIMIENTO (kg/tn)	IC	ABSORCIÓN (kg/ha)	EXTRACCIÓN (kg/ha)
N	5.5	0.6	330	211.2
P	0.9	0.8	54	42.1
K	8.3	0.7	492	324.7
Ca	1.4	0.1	84	5.9
Mg	0.8	-	48	-
S	0.7	-	42	-

FUENTE: García, 2016.

Tabla 9: Absorción de algunos nutrientes por el cultivo de papa, según diferentes autores y diferente nivel de rendimiento.

Tubérculos tn/ha	kg/ha					Referencia
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Mg	S	
38	224	76	336	-	-	Dahnke y Nelson, 1976
40	120	55	221	-	-	Kupers, 1972
63	288	128	396	35	26	Tisdale y Nelson, 1975
94	300	80	480	52	-	Sierra y Rojas, 1989

FUENTE: Sierra et al, 2002.

Se consideró, los valores de las tablas, de manera orientativa, teniendo en cuenta que pueden variar dependiendo de distintos factores, como mejoras genéticas de cultivares, condiciones de cultivo, niveles de rendimiento extremos, entre otros.

- **Diagnóstico de la fertilización**

El diagnóstico de la fertilización se realizó con la colaboración del especialista en suelos y fertirrigación, Mg. Sc. Alaluna Gutierrez, Edgardo, quien en base a los requerimientos nutricionales de la planta y al rendimiento proyectado (60 t ha⁻¹), planteó la dosis de fertilizantes a utilizar y el plan de fertilización a aplicar. De la interpretación del resultado de análisis de suelo se identificó el bajo contenido de materia orgánica, es por ello que se decidió en aplicar 10 t ha⁻¹ de humus, esto se realizó durante la siembra.

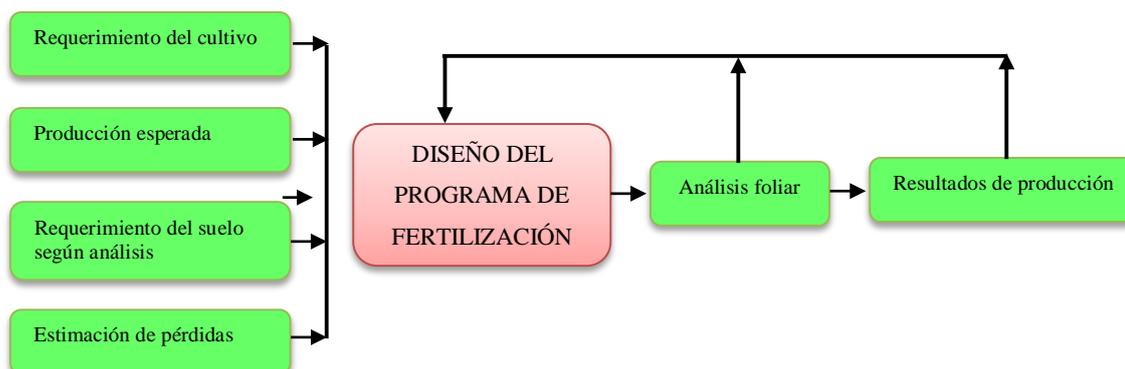


Figura 9: Esquema para la obtención del diseño del programa de fertilización.

FUENTE: Elaboración propia.

Tabla 10: Fuentes de fertilizantes.

Fuentes	Formula
Fosfato monoamónico	(16-61-0)
Sulfato de potasio	(0-0-50)
Nitrato de calcio	N(15.5%)-CaO(26%)
Nitrato de potasio	(13.5-0-45)
KRISTA- Mg	Mg (16%) - S(13%)

FUENTE: Elaboración propia.

Tabla 11: Características principales de los abonos sólidos solubles.

Fertilizante	Composición (N-P-K)	Solubilidad	Manejo	Observaciones
Nitrato de potasio	13.5-0-45	316 g/l a 20 °C	-----	-Aunque es menos soluble que los anteriores, es muy recomendado para el aporte de potasio en fertirrigación. -Produce una ligera subida del pH de la solución
Nitrato de calcio	15.5-0-0 (26 CaO)	1220 g/l a 20 °C	-----	-Se utiliza por su aporte de calcio en suelos carentes del mismo o en cultivos hortícolas muy exigentes.
Sulfato de potasio	0-0-50 (17 S)	110 g/l a 20 °C	Solución madre: 1/10 abono + 9/10 agua	-Su solubilidad es muy baja comparada con la del cloruro y el nitrato de potasio.
Fosfato monoamónico (MAP)	16-61-0	227 g/l a 0 °C; 434 g/l a 27 °C	Solución madre: 1/5 abono + 4/5 agua	-Requiere una buena agitación para su disolución. -Tiene bajo efecto salinizante y reacción ácida. -Cuando se usan aguas alcalinas, se aconseja corregirlo con ácido nítrico.

FUENTE: Adaptado de CREA, 2005.

3.3.5 Desarrollo de la investigación

- **Aplicación de los fertilizantes durante la producción del cultivo.**

Las plantas a lo largo de su ciclo productivo tienen diferentes requerimientos nutricionales, presentándose periodos críticos de mayor necesidad, por consiguiente, es indispensable una disposición adecuada de los fertilizantes para garantizar que sean mejor aprovechados. Para ello se optó convenientemente en aplicar los fertilizantes en forma fraccionada mediante dosis de fertilización en porcentaje durante la investigación y también teniendo en cuenta el desarrollo fenológico productivo de la papa (Figuras 10)

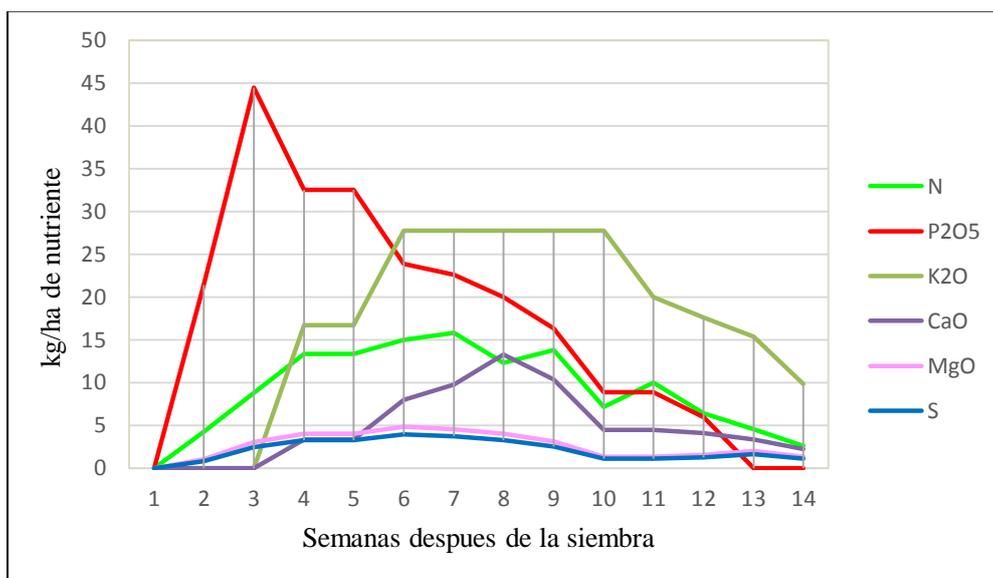


Figura 10: Aporte de nutrientes.

FUENTE: Elaboración propia.

- **Estrategia de aplicación**

En cuanto al aporte de fósforo (P), se aplicó durante la emergencia un 9% con la finalidad de ayudar en la formación temprana de raíces y tallos aéreos, se fue incrementando progresivamente hasta el día 50 después de la siembra, luego se fue disminuyendo hasta hacerse nula la aplicación en el día 90 después de la siembra. La planta absorbe P durante todo el período de crecimiento de los tubérculos, desde los días 35 a 95, a una tasa constante diaria de 51 mg de P por planta (Kafkafi y Tarchitzky, 2012). El buen desarrollo radicular garantiza la función de absorber el agua y los nutrientes contenidos en el suelo. La fertilidad del suelo es una de las condiciones que determinan el número y longitud de los estolones (Egúsquiza, 2014)

Tabla 12: Distribución porcentual de nutrientes.

DDS	Crecimiento, desarrollo y tuberización	N	P2O5	K2O	CaO	MgO	S
		----- kg/ha -----					
0-14	Emergencia	3%	9%	0%	0%	3%	3%
14-21	Mayor desarrollo y elongación de brotes	7%	19%	0%	0%	8%	8%
21-30	Tallos aéreos diferenciados, mayor elongación de raíces	11%	14%	7%	5%	11%	11%
30-50	Estolones diferenciados	22%	24%	19%	17%	24%	24%
50-60	Tuberización masiva	22%	18%	24%	35%	24%	24%
60-70	Tuberización o llenado	16%	11%	24%	22%	12%	12%
70-90	Mayor ritmo de tuberización	18%	6%	27%	21%	17%	17%
90-110	Madurez	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	TOTAL	100%	81%	100%	100%	100%	100%

FUENTE: Elaboración propia.

La aplicación de potasio fue a partir de la tercera semana después de la siembra, la proporción de éste nutriente se fue incrementando progresivamente hasta el día 90 después de la siembra, la finalidad de su aplicación en grades proporciones es la de mejorar las condiciones de la planta para tolerar déficit hídrico, además de intervenir en diferentes procesos de síntesis y transporte de los azúcares desde las hojas y su conversión en almidón en el tubérculo (Egúsqüiza, 2014), su aplicación durante la temporada de crecimiento permite lograr más kilos por hectárea de producción.

El Nitrógeno es muy importante para el desarrollo foliar de la planta, porque ayuda a lograr una mayor tasa fotosintética y también estimula el crecimiento del tubérculo. Se reduce el abastecimiento de nitrógeno proveniente del suelo, para lograr condiciones óptimas de tuberización. (Egúsqüiza, 2014)

Tabla 13: Cantidad de fertilizante en gramos, m2 y día.

Semanas después de la siembra	N	P2O5	K2O	CaO	MgO	S
	----- (g) día y m2 -----					
1	0	0	0	0	0	0
2	0.21	1.07	0	0	0.05	0.04
3	0.29	1.48	0	0	0.10	0.08
4	0.45	1.08	0.56	0.11	0.13	0.11
5	0.45	1.08	0.56	0.11	0.13	0.11
6	0.50	0.80	0.93	0.27	0.16	0.13
7	0.53	0.75	0.93	0.32	0.15	0.12
8	0.41	0.67	0.93	0.44	0.13	0.11
9	0.46	0.54	0.93	0.34	0.10	0.08
10	0.24	0.30	0.93	0.15	0.04	0.04
11	0.33	0.30	0.67	0.15	0.04	0.04
12	0.21	0.20	0.59	0.14	0.05	0.04
13	0.15	0	0.51	0.11	0.07	0.05
14	0.13	0	0.49	0.11	0.07	0.05
15	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0
TOTAL	4.35	8.27	8.00	2.25	1.24	1.01

FUENTE: Elaboración propia.

Para este caso la fertilización fue en base a estimaciones según las extracciones del cultivo, siendo un método válido si se aplica un abonado racional. En el proyecto se utilizó riego por goteo por lo que se tuvo que adaptar la fertilización a las características que este tipo de riego presenta, tales como una menor zona mojada, una gran eficiencia, menor lavado de nutrientes, mayor rendimiento de las unidades fórmula (U.F) aportadas etc. Siendo necesario, por lo tanto, fraccionar lo máximo posible las U.F. que demanda el cultivo a lo largo de su ciclo y a su vez establecer las relaciones N / P₂O₅ / K₂O para cada estado fenológico de la planta (Medina, 2002).

3.3.6 Toma de datos meteorológicos

Se cuenta con un tanque e evaporímetro clase "A" (ET₀), ubicado en el campo experimental de la FIA, detrás de la facultad. Las mediciones se realizaron todos los días a las 4:30 pm.

3.3.7 Cálculo y aplicación de riego

El tiempo de riego fue calculado en base a:

La evapotranspiración (ETP), obtenida a partir del producto de la Evapotranspiración de referencia (ETo) y el coeficiente del cultivo (Kc).

$$ETP = ETo \times Kc.$$

ETo: se obtiene al multiplicar la lectura del tanque de tipo A y su coeficiente del tanque (0.8).

$$ETo = \text{Lectura Tanque} \times 0.80$$

Kc.: Este coeficiente se tomó como referencia de estudios desarrollados, de la costa arequipeña.

Tabla 14: Coeficiente de cultivo.

PERIODO VEGETATIVO (Semanas)	Kc
1 -4	0.3
5 - 7	0.6
8 - 10	1.1
11 - 13	1.35
14 - 15	1.2
105 DÍAS	

FUENTE: AUTODEMA, 2015.

Bello y Pino (2000), señalan que, utilizando la tasa de riego predeterminada para el cultivo, se puede calcular directamente las dosis de agua a aplicar, pero dicho procedimiento no considera correcciones de volúmenes de agua para lavado de sales, por lo que fertirrigar, las dosis de agua deberán ser corregidas incrementándose genéricamente en un 10% por lavado de sales en aquellos riegos en los que se incluya la aplicación de fertilizantes.

a) Aplicación del riego parcial.

El riego parcial se aplicó en dos de los cuatro estados fenológicos de la papa, el primero en la etapa de crecimiento (II) y el segundo en la etapa de madurez (IV), en la Figura 11 se muestra las semanas después de la siembra en las que se aplicó el riego deficitario con secado parcial de raíces.

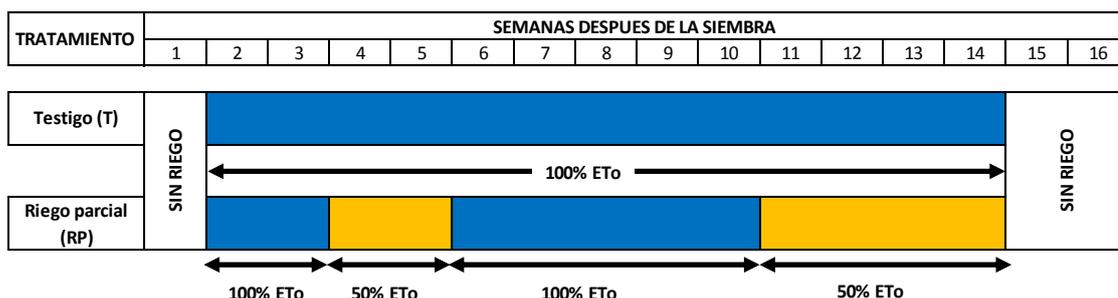


Figura 11: Tratamiento de riego.

FUENTE: Elaboración propia.

Según las disposiciones, en los tratamientos testigo (T-1 y T-2) las aplicaciones de las láminas de riego son al 100%, además el humedecimiento de la franja fue uniforme durante todas las aplicaciones de riego, se trabajó con un coeficiente de uniformidad CU superiores a 89%, por lo que se ve que el sistema riega o moja las parcelas experimentales de forma uniforme.

En los tratamientos que se aplicó RPD, se realizó restricción de agua durante dos etapas fenológicas del cultivo de papa. En la Figura 11 y 12, se muestran cómo se alterna el humedecimiento de la zona de raíces en cada planta, además cada línea de lateral cuenta con una válvula de paso. El inicio de la aplicación de RPD se da cuando se pasar agua solo por uno de los laterales, la línea “A” queda abierto mientras que la “B” permanece cerrado, en el riego siguiente se hizo la operación inversa, “A” queda cerrada y “B” abierta, de esta forma se humedece la zona de raíces de forma alternada.

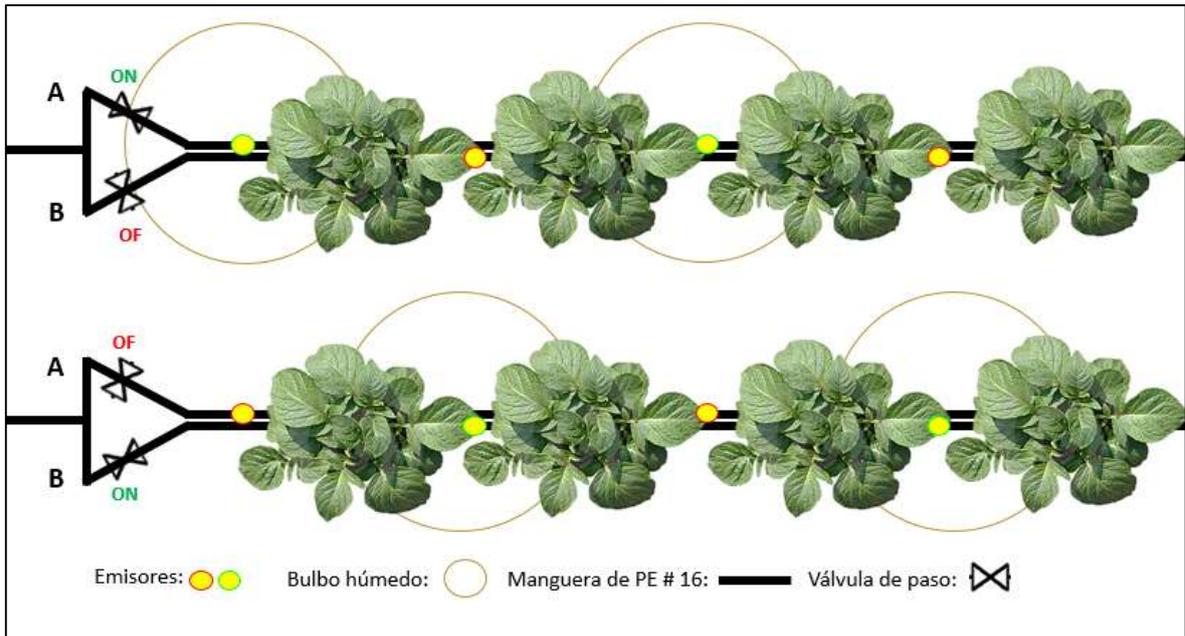


Figura 12: Vista en planta de la disposición lineal y la aplicación del riego deficitario con secado parcial de raíces.

FUENTE: Elaboración propia.

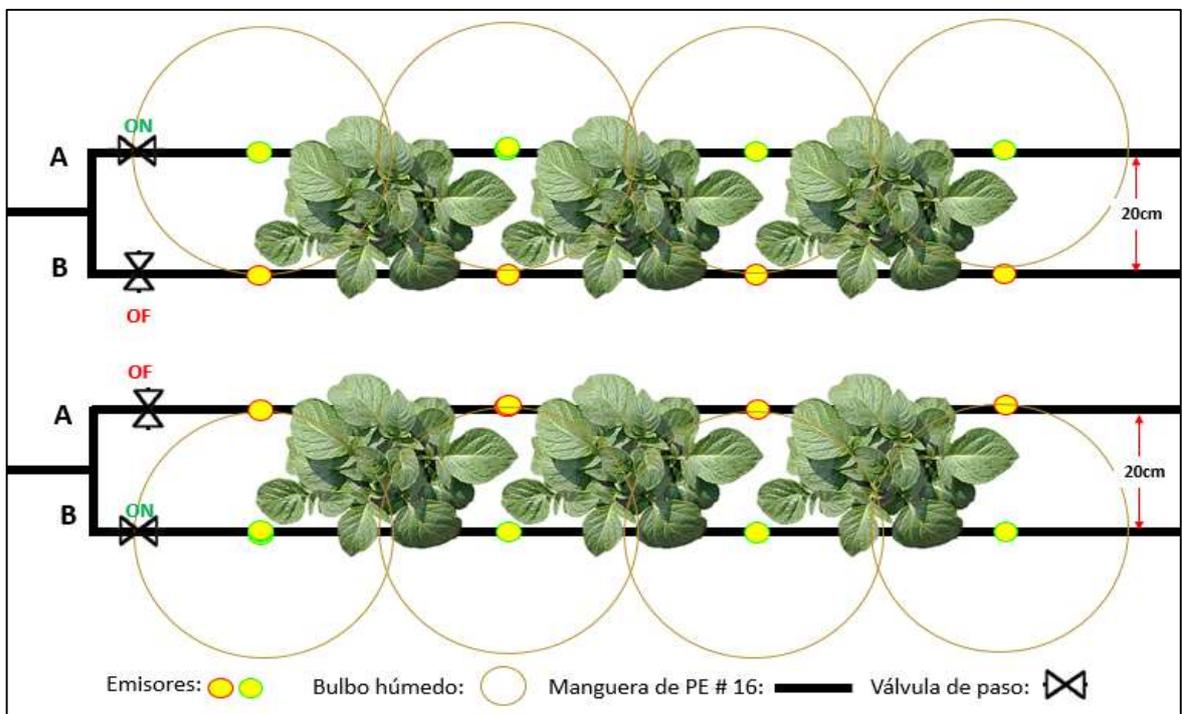


Figura 13: Vista en planta de la disposición en paralelo y la aplicación del riego deficitario con secado parcial de raíces.

FUENTE: Elaboración propia.

3.4 Evaluación de las variables en el cultivo

3.4.1 Durante el crecimiento y desarrollo

- **Porcentaje de emergencia de plantas:** Se determinó mediante el conteo del número de plantas emergidas a los 12 y 25 días después de la siembra.
- **Altura de plantas:** para evaluar el crecimiento en altura de las plantas se midieron en 8 oportunidades (dos veces por etapa fenológica), estas fueron elegidas al azar en cada parcela. La medida se tomó desde el cuello de la planta hasta la altura de la yema terminal del tallo principal.
- **Número de tallos principales por planta:** se determinó contando el número de tallos por planta. Las evaluaciones se realizaron antes y después del aporque, iniciándose el día 21.

3.4.2 Durante la cosecha

La cosecha se realizó de forma manual, se recogieron los tubérculos por cada planta, posteriormente fueron clasificados y pesados.

- **Rendimiento total:** se considera como la relación de dividir la producción total entre la superficie cosechada, expresada en Kg ha^{-1} . Se pesó la cantidad total de cada tratamiento.

$$\text{Rendimiento} = \text{Cantidad producida (t.)} / \text{superficie cosechada (ha)} * 1000$$

- **Rendimiento comercial:** se considera como la relación de dividir la producción clasificada entre la superficie cosechada, expresada en Kg ha^{-1} .

Se pesará la cantidad clasificada correspondiente a los calibres pertenecientes al nivel comercial (extra, primera y segunda).

$$\text{Rendimiento} = \text{Cantidad producida (t.)} / \text{superficie cosechada (ha)} * 1000$$

- **Número de tubérculos:** se aprovechó la clasificación por cada planta para contabilizar el número de tubérculos por calibre establecido (Tabla 15) y así tener la cantidad total de tubérculos. Para facilitar la clasificación se utilizó una estructura diseñada por el investigador.
- **Tamaño de tubérculos:** para la clasificación, se tomó como referencia la clasificación planteada por Sifuentes (2012), agrupadas en cinco categorías de acuerdo a su longitud o diámetro radial.

Tabla 15: Descripción de calibres o diámetros de tubérculos de papa.

Categoría	Diámetro longitudinal (cm)
Extra	> 9.0
Primera	7.5-9.0
Segunda	6.0 - 7.5
Tercera	4.5 - 6.0
"chancho o descarte"	< 4.5

FUENTE: Sifuentes, 2012.

3.4.3 Durante la post cosecha

- Porcentaje de materia seca:** Se tomó una cantidad representativa de tubérculos pesados en frescos (30 % del promedio de peso de tubérculos producidos por mata), se lavó con agua destilada, fueron cortados en tajadas y posteriormente llevados a estufa a 75 °C hasta que alcanzaron el peso constante. La calificación del porcentaje de materia seca se hizo según lo plantea Mendoza y Mosquera (2011)

Tabla 16: Escalas de contenido de materia seca de tubérculos.

Nivel	Materia seca (%)
Bajo	14-18
Promedio	19-23
Alto	24-27
Muy alto	>27

FUENTE: Mendoza y Mosquera (2011).

- b) **Evaluación de extracción y absorción de nutrientes del tubérculo:** se tomaron muestras al azar de tubérculos y hojas de los cuatro tratamientos. Posteriormente se llevó al Laboratorio de Análisis de Suelos y Plantas de la Universidad Nacional Agraria La Molina, ahí se hicieron los análisis elementos mayores y menores absorbidos por el tubérculo y extraídos por la planta.

3.5 Tratamiento estadístico

3.5.1 Diseño estadístico

El diseño estadístico empleado fue el de Diseño Factorial Completamente al Azar (D.F.C.A) para cuatro tratamientos con cinco repeticiones cada uno.

Este diseño estadístico se llevó acabo para estudiar los efectos producidos por dos factores

(Disposición de tipo de lateral y tipo de riego).

- **El modelo aditivo lineal**

Es el siguiente:

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \epsilon_{ijk}$$

Donde:

- Y_{ijk} : Valor de la variable respuesta en el i-ésimo nivel del factor 1, j-ésimo nivel del factor 2 y k-ésimo repetición.
- μ : Efecto de la media general de la variable respuesta.
- α_i : Efecto del i-ésimo nivel del factor 1.
- β_j : Efecto del j-ésimo nivel del factor 2.
- $(\alpha\beta)_{ij}$: Efecto de la interacción del i-ésimo nivel del factor 1 y j-ésimo nivel del factor 2.
- ϵ_{ijk} : Efecto del error experimental en el i-ésimo nivel factor 1, j-ésimo nivel del factor 2 y k-ésimo repetición.
- Para $i = 1, \dots, p, j = 1, \dots, q$ y $k = 1, \dots, r$.

3.5.2 Análisis estadístico

Para la Inferencia (la hipótesis de la muestra representa a la población) y obtener la diferencia estadística significativa de las fuentes de variabilidad, se realizó el análisis de varianza de los rendimiento total y comercial, número de tubérculos comercial y total, número de tallos, y tamaño de tubérculos, con un nivel de significación de 0.5.

Para el modelo de efectos fijos se analizó con las siguientes hipótesis en términos de los efectos de los niveles de los factores:

a) Prueba hipótesis de efectos principales.

- Para el efecto de interacción AB (Disposición de lateral x Tipo riego):

$$H_0: (\alpha\beta)_{ij} = 0, \forall i, j$$

$$H_1: (\alpha\beta)_{ij} \neq 0, \text{ para al menos algún } i, j$$

- Para el efecto de principal de A (Disposición de lateral):

$$H_0: \alpha_i = 0, \forall i$$

$$H_1: \alpha_i \neq 0, \text{ para al menos algún } i$$

- Para el efecto de principal de B (Tipo de riego):

$$H_0: \beta_j = 0, \forall j$$

$$H_1: \beta_j \neq 0, \text{ para al menos algún } j$$

Entonces para aceptar las hipótesis nulas planteadas se tuvo que analizar con el estadístico de prueba (p-value), donde este tiene que ser mayor al nivel de significación planteado. Además, para validar la inferencia o hipótesis se tuvo que verificar la normalidad de errores (si existe normalidad, hay homogeneidad), con la siguiente hipótesis:

H0: Existe Normalidad

H1: No Existe Normalidad

Finalmente, para cuantificar el grado de homogeneidad, se realizó con el Coeficiente de Variabilidad, el cual se calculó de la siguiente manera:

$$CV = \frac{\sqrt{CME}}{u}$$

Donde:

- CV: Coeficiente de Variabilidad.
- μ : Efecto de la media general de la variable respuesta.
- CME: Cuadrado Medio de los Errores.

Se utilizó el software libre R, para el análisis de varianza, prueba de normalidad, efectos de interacción de los factores, análisis de efectos simples y prueba de comparación de medias.

IV. RESULTADOS

4.1 Crecimiento y desarrollo

4.1.1 Porcentaje de emergencia

A los 12 días después de la siembra, el porcentaje promedio de emergencia fue de 95%, la segunda verificación se realizó a los 25 días posteriores a la siembra, notándose que se alcanzó el 100% de emergencia. No se presentó diferencias en la emergencia respecto a los tratamientos, ya que está más influenciada por las condiciones del tubérculo-semilla y las condiciones del suelo que con los factores en estudio.

4.1.2 Altura de plantas

En la Tabla 17 se muestra los promedios de alturas de planta tomadas en diferentes periodos vegetativos. Durante los primeros días después de la siembra el promedio de alturas no varió, posteriormente se presentó diferencia mínima entre los tratamientos que recibieron riego parcial deficitario (RPD) y los tratamientos que fueron regados en condiciones normales (100% ETo), Figura 14. La planta alcanzó su porte máximo a los 106 días presentando alturas máximas de 103, 91, 92 y 102 cm para T-1, RP1, RP2 y T-2 respectivamente.

Sierra (2002), indica que la papa es una especie de crecimiento rápido, aun cuando existen variedades de más lento desarrollo, determinando así el suministro de nutrientes en los primeros meses.

Tabla 17: Altura de planta de los cuatro tratamientos registrados durante el desarrollo de la planta.

TRATAMIENTO	Días después de la siembra									
	12	19	26	40	49	60	71	81	97	106
promedio (cm).....									
T-1	13	17	23	35	44	65	82	100	102	103
RP1	13	17	22	33	42	62	79	85	91	91
RP2	13	16	23	34	45	65	80	89	90	92
T-2	13	18	24	36	45	65	83	91	100	102

FUENTE: Elaboración propia.

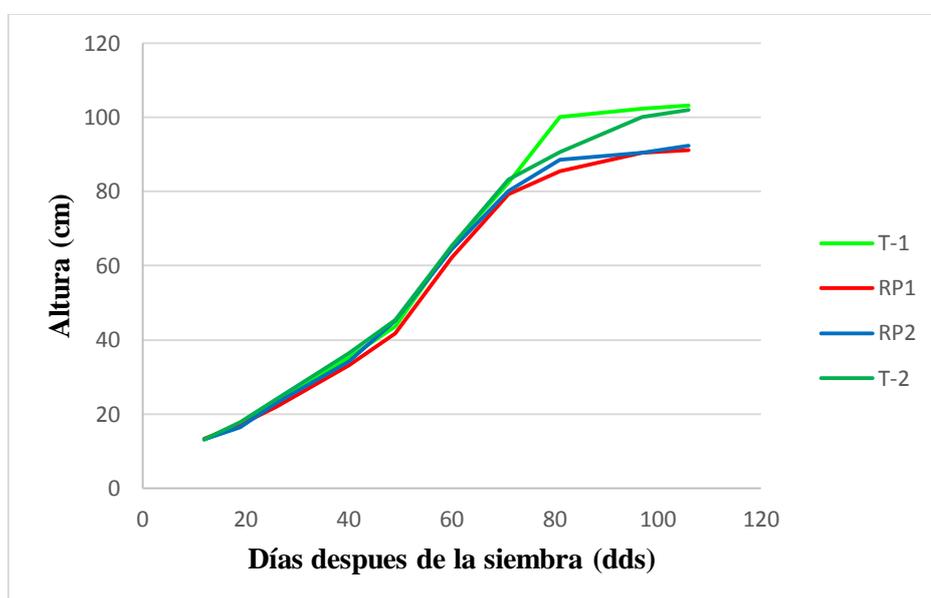


Figura 14: Variación de la altura de plantas con diferentes tratamientos en diez fechas de evaluación.

FUENTE: Elaboración propia.

Gutiérrez (2007), indica que las plantas de la variedad UNICA alcanzan una altura máxima de 120 cm. Sin embargo, en el presente experimento alcanzaron un porte máximo de 103cm en T-1.

4.1.3 Numero de tallos principales por planta

A los 30 días después de la siembra se realizó el conteo del número de tallos principales por planta (antes del aporque), finalmente se hizo el último conteo a los 106 días después de la siembra (Tabla 18). Se observa que el promedio de tallos fue disminuyendo respecto al conteo inicial, debido a que la planta alcanza la madurez y por consiguiente las hojas inferiores se amarillan y el follaje se tumba (Egúsquiza, 2014).

Tabla 18: Tallos por planta para cada tratamiento registrados a los 30 y 106 días después de la siembra.

TRATAMIENTO	Aporque (30 dds)	Cosecha (106 dds)
T-1	5.3	4.9
RP1	5.1	4.3
RP2	4.7	4.6
T-2	4.6	4.4
Promedio total	4.9	4.6

FUENTE: Elaboración propia.

4.2 Cosecha

4.2.1 Rendimiento total

En la Tabla 19, se muestra el rendimiento total obtenidos en los diferentes tratamientos expresados en tn/ha^{-1} , estos son el resultado del total de la producción considerando las cinco categorías planteadas en la clasificación (Tabla 15), se pesó solo tubérculos sanos.

Tabla 19: Rendimiento total de las plantas con diferentes tratamientos a los 110 días después de la siembra.

TRATAMIENTO	Rendimiento total tn/ ha
T-1	64
RP1	60
RP2	61
T-2	66

FUENTE: Elaboración propia.

En la Figura 15, se muestra los rendimientos totales estimados en t ha^{-1} . El mayor rendimiento se obtuvo con el tratamiento T-2 que produjo 3% más que el tratamiento T-1, mientras que los rendimientos más bajos se presentaron en los tratamientos RP1 y RP2, siendo este último superior en 1%.

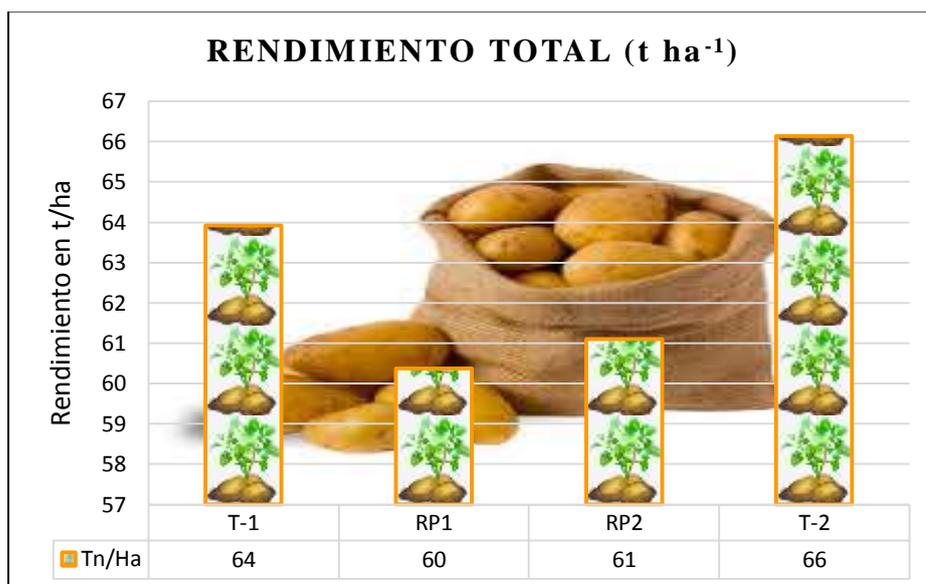


Figura 15: Rendimiento total para cada tratamiento en t ha^{-1} .

FUENTE: Elaboración propia.

4.2.2 Rendimiento comercial

La aplicación del riego deficitario es una técnica que permite el ahorro de agua, pero trae consigo una ligera reducción en el rendimiento comercial, en la disposición tipo 1 (T-1 y RP1) la reducción del rendimiento es del 7%, mientras que en el de tipo 2 (T-2 y RP2) es de 9%.

Tabla 20: Rendimiento comercial de las plantas con diferentes tratamientos a los 110 días después de la siembra.

TRATAMIENTO	Rendimiento comercial
	tn/ ha
T-1	55
RP1	51
RP2	54
T-2	60

FUENTE: Elaboración propia.

Tanto el tipo de disposición de laterales de riego y la aplicación del riego deficitario, influyeron directamente en el rendimiento. Como se muestra en la Figura 16, de los tratamientos que no recibieron riego deficitario, el que alcanza el mejor rendimiento, con fines comerciales, es el tratamiento de disposición de lateral tipo 2 (T-2), siendo superior en 8% al tratamiento de disposición de lateral tipo 1 (T-1).

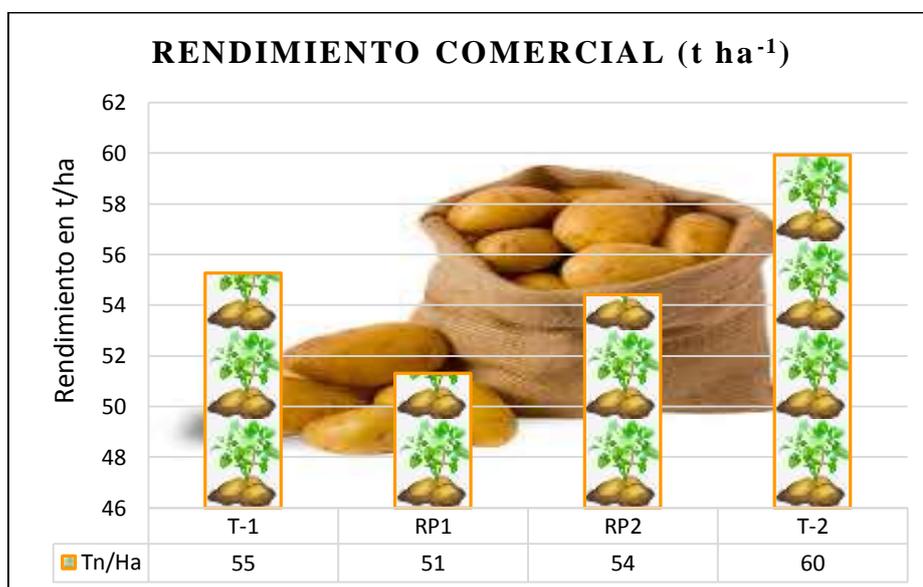


Figura 16: Rendimiento comercial para cada tratamiento, en t ha⁻¹.

FUENTE: Elaboración propia.

4.2.3 Número de tubérculos comerciales y no comerciales

Con la finalidad de saber la influencia del riego deficitario en la cantidad de tubérculos comerciales y no comerciales por planta. Se consideró grupos de clasificación para identificar el efecto, siendo estas las siguientes:

- Tamaños comerciales: extra, primera, segunda.
- Tamaños pequeños: tercera y otros (<4.5cm)

De la Figura 16, se muestra que el tipo de disposición tiene una repercusión en el porcentaje de tubérculos de menor tamaño, RP1 y T-1 dieron como resultado mayor porcentaje de tubérculos pequeños, mientras que T-2 y RP2 presentan mayor porcentaje de tubérculos grandes.

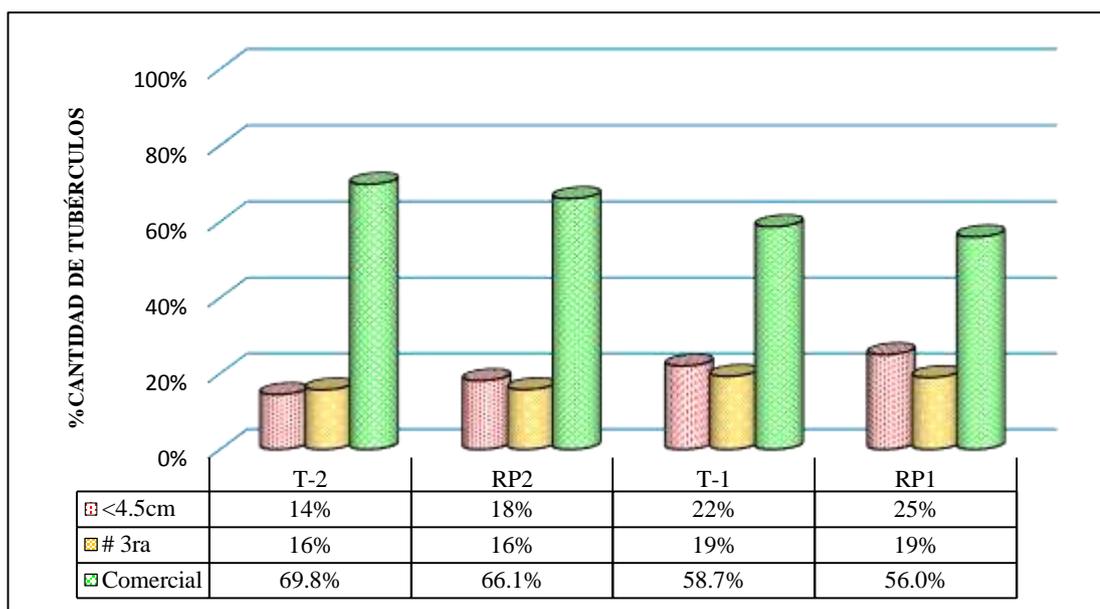


Figura 17: Distribución porcentual del número de tubérculos según su clasificación.

FUENTE: Elaboración propia.

A. Número de tubérculos comerciales

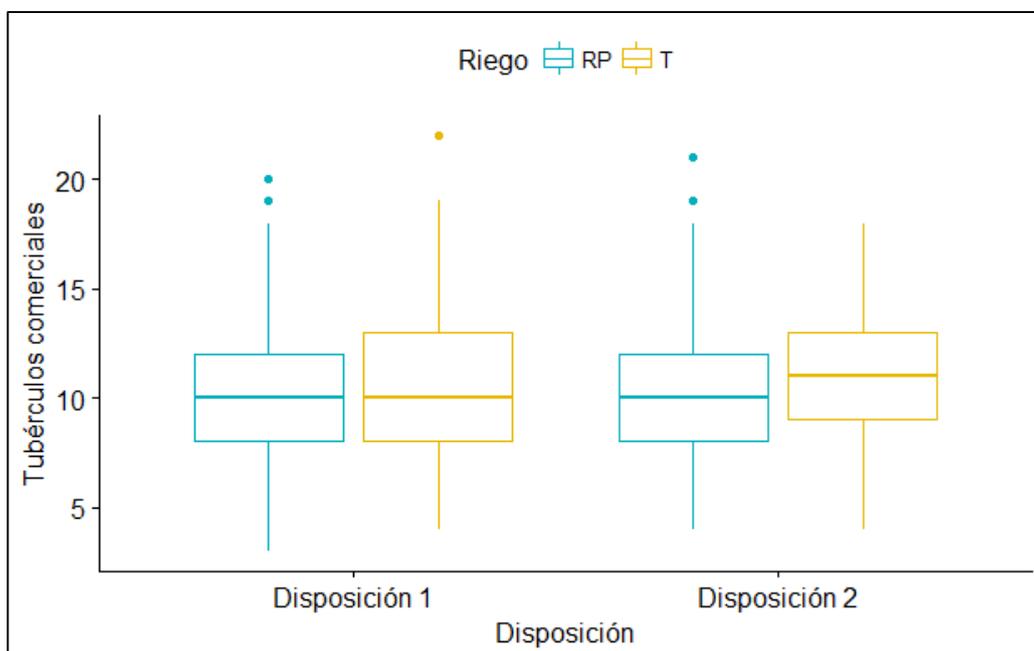


Figura 18: Diagrama de cajas de número de tubérculos comerciales por planta.

FUENTE: Elaboración propia.

La figura 18, muestra la distribución de los tubérculos comerciales por planta, se nota que la mejor producción de tubérculos comerciales se encuentra en el tipo de riego con 100% ETo, también se muestra que en algunas plantas se obtuvo mayor número de tubérculos a pesar de pertenecer a tratamientos que en general presentó menor número de tubérculos, esto se debe a la influencia del número de tallos tanto principales como secundarios.

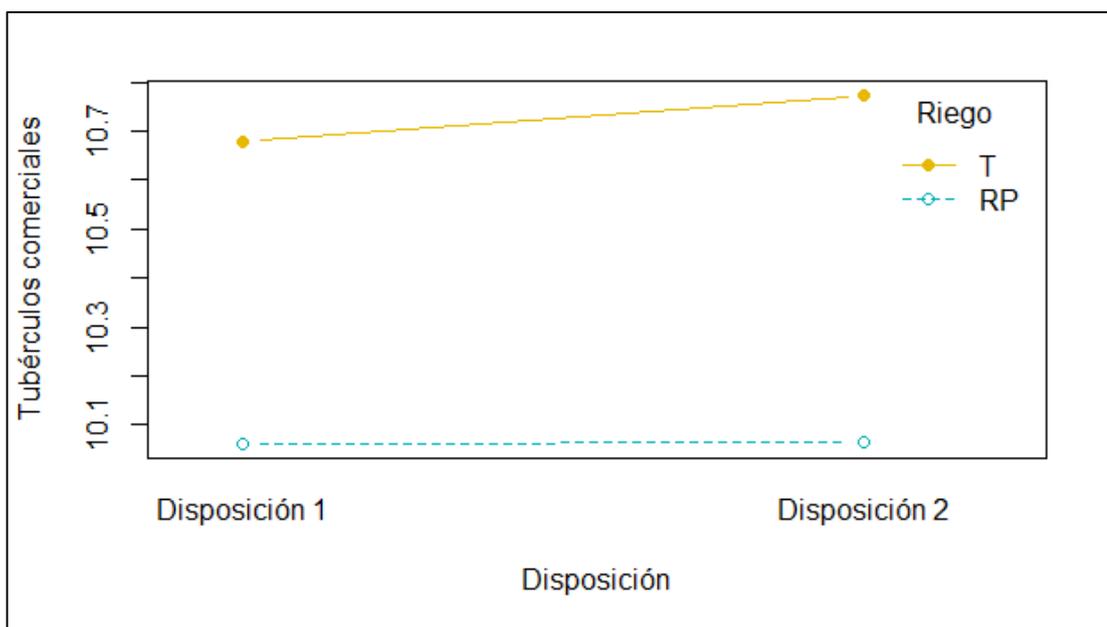


Figura 19: Interacción para respuesta.

FUENTE: Elaboración propia.

La Figura 19, muestra que no existe interacción entre los tratamientos, por lo que el análisis debe realizarse mediante efectos principales.

- **Análisis de Varianza (ANOVA)**

Tabla 21: Análisis de varianza del número de tubérculos comerciales por planta

Fv	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	Sig
Disposición	1	0.18	0.1807	0.2021	6.53E-01	
Riego	1	10.5	10.5015	11.7459	6.38E-04	***
Disposición:Riego	1	0.04	0.0406	0.0454	0.8313633	
Residuals	896	801.07	0.8941			

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

FUENTE: Elaboración propia.

El análisis de varianza indica que solamente el factor tipo de riego es significativo, por lo tanto, solo estos factores contribuyen a explicar el número tubérculos comerciales.

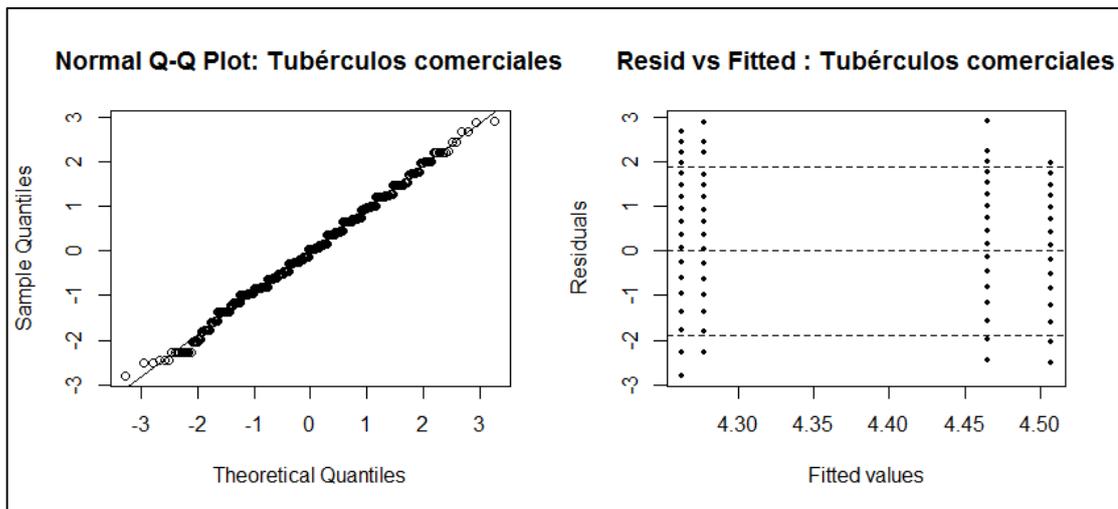


Figura 20: Normalidad de error de residuos estandarizados del número de tubérculos comerciales.

FUENTE: Elaboración propia.

De la figura 20, (Normal Q-Q Plot) da indicios de que los errores tienden a distribuirse normalmente (los puntos de los cuantiles están cerca de la diagonal), ya que el Valor p (0.029689) es mayor al nivel de significación (0.01) Anexo 11, por lo tanto no se rechaza la hipótesis, concluyendo que los errores se distribuyen normalmente.

La Figura20, (Resid vs Fitted) muestra que en la variable no existe un patrón o tendencia obvia en los puntos, es decir los valores ajustados frente a sus residuos parecen bastante aleatorios. En base a esto, se sospecha que no se tiene problemas de no homogeneidad, ya que los residuos parecen tener la misma varianza al ser constantes.

- **Prueba de homogeneidad de varianzas en los modelos**

H_0 : Existe homogeneidad de varianzas (varianzas constantes)

H_1 : No existe homogeneidad de varianzas (varianzas no constantes)

Tabla 22: Prueba de homogeneidad de varianza.

Non-constant Variance Score Test		
Variance formula: ~ Tubérculos comerciales		
Chisquare = 2.3309	Df = 1	p = 0.1268285

FUENTE: Elaboración propia.

Como el Pvalor es mayor que 0.05, por lo tanto, con un alfa de 0.05 no se rechaza H_0 , concluyendo que existe homogeneidad de varianzas. La prueba fue mediante el Test Score (Breush – Pagan).

- **Prueba de Duncan**

Tabla 23: Comparación de medias, según prueba de Duncan, número de tubérculos comerciales.

Pares	Transformación	Ranking
Disposición 2:T	4.507008	a
Disposición 1:T	4.465243	a
Disposición 2:RP	4.27754	b
Disposición 1:RP	4.262631	b

FUENTE: Elaboración propia.

La prueba de comparación media de Dunca mostró que no existe diferencia significativa entre los tratamientos y sus respectivos testigos (RP1y T-1, RP2 y T-2), pero sí se encuentra diferencia estadísticamente significativa entre las diferentes disposiciones de laterales de riego (T-1 y T-2, RP1 y RP2). Los tratamientos con mayor número de tubérculos comerciales fueron RP1 y T-1, con un promedio de 10.06 y 10.68 tubérculos por planta, mientras que RP2 y T-2 presentaron menor número de tubérculos por planta, siendo éste de 10.07 y 10.77 respectivamente.

B. Número de Tubérculos no comerciales

En la figura 21 se muestra la distribución del número de tubérculos no comerciales. Se puede apreciar que la disposición tipo 1 y en el tratamiento RP1 se obtuvo plantas con hasta 50 tubérculos pequeños, esto ocurrió debido al número excesivo de tallos que se presentó en algunas plantas del tratamiento (se encontraron hasta 12 tallos principales). El aumento del número de tallos, aumenta la cantidad de tubérculos por planta, disminuye el peso promedio por tubérculos (Gámez, 2017).

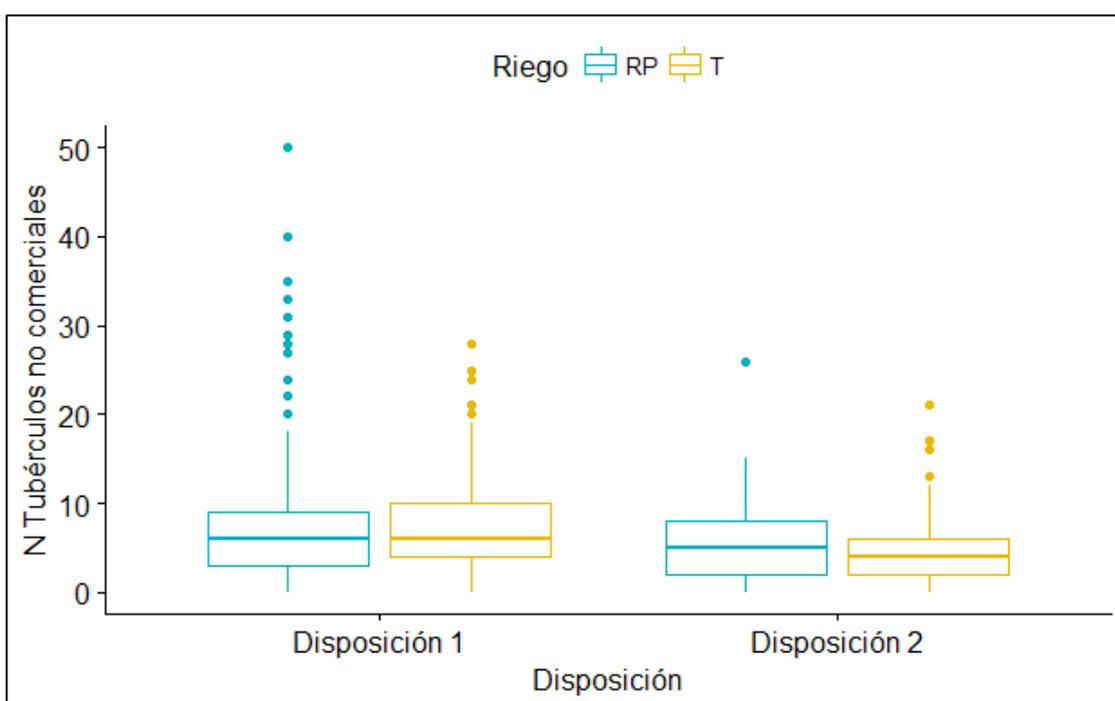


Figura 21: Diagrama de cajas de número de tubérculos no comerciales por planta.

FUENTE: Elaboración propia.

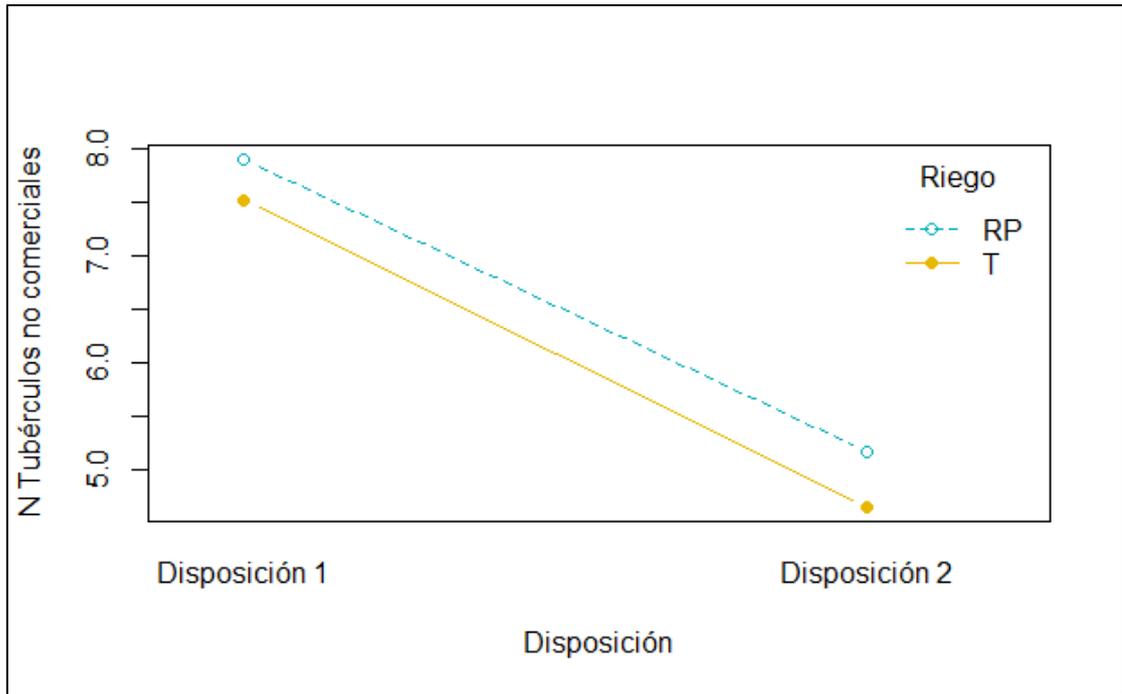


Figura 22: Interacción para respuesta.

FUENTE: Elaboración propia.

La Figura 22, muestra que no existe interacción entre los tratamientos, por lo que el análisis debe realizarse mediante efectos principales.

- **Análisis de Varianza (ANOVA)**

Tabla 24: Análisis de varianza del número de tubérculos no comerciales por planta.

Fv	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	Sig
Disposición	1	187.01	187.013	62.8254	6.69E-15	***
Riego	1	0.61	0.613	0.2058	6.50E-01	
Disposición:Riego	1	0.15	0.145	0.0488	0.8251	
Residuals	896	2667.14	2.977			

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

FUENTE: Elaboración propia.

El análisis de varianza indica que solamente el factor tipo de disposición es significativo, por lo tanto, solo estos factores contribuyen a explicar el número tubérculos no comerciales.

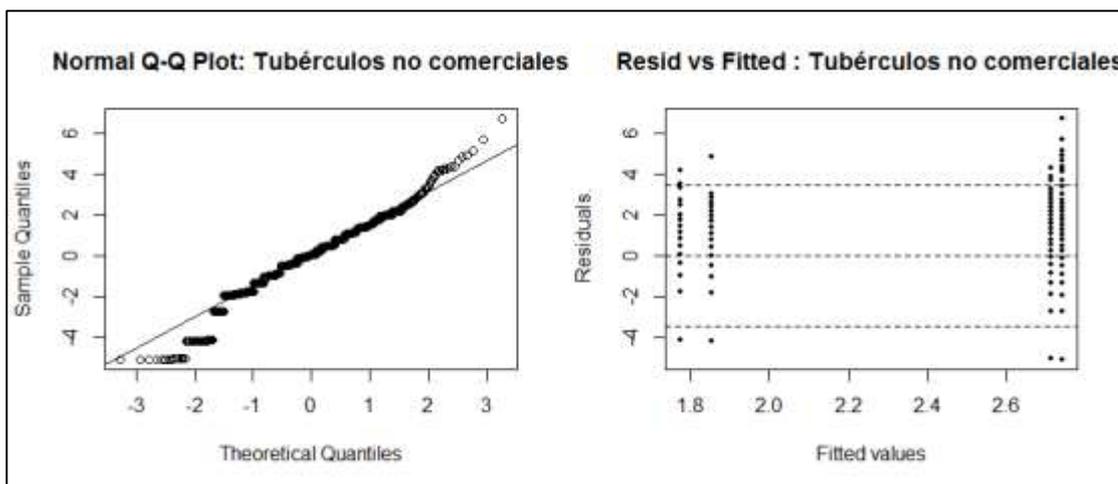


Figura 23: Normalidad de error de residuos estandarizados del número de tubérculos no comerciales.

FUENTE: Elaboración propia.

La figura 22, (Normal Q-Q Plot) da indicios de que los errores no tienden a distribuirse normalmente (algunos puntos de los cuantiles casi no están cerca de la diagonal), Como el Pvalor es menor que 0.01, por lo tanto con un alfa de 0.01 se rechaza H_0 , concluyendo que los errores no se distribuyen normalmente.

La Figura 22, (Resid vs Fitted) muestra que en la variable no existe un patrón o tendencia obvia en los puntos, es decir los valores ajustados frente a sus residuos parecen bastante aleatorios. En base a esto, se sospecha que no se tiene problemas de no homogeneidad ya que los residuos parecen tener la misma varianza al ser constantes.

- **Prueba de homogeneidad de varianzas en los modelos**

H_0 : Existe homogeneidad de varianzas (varianzas constantes)

H_1 : No existe homogeneidad de varianzas (varianzas no constantes)

Tabla 25: Prueba de homogeneidad de varianza.

Non-constant Variance Score Test		
Variance formula: ~ Tubérculos no comerciales		
Chisquare = 5.038547	Df = 1	p = 0.02478928

FUENTE: Elaboración propia.

Como el Pvalor es mayor que 0.01, por lo tanto, con un alfa de 0.01 no se rechaza H0, concluyendo que existe homogeneidad de varianzas. La prueba fue mediante el Test Score (Breush – Pagan).

- **Prueba de Duncan**

Tabla 26: Comparación de medias, según prueba de Duncan, número de tubérculos no comerciales.

Pares	Transformación	Ranking
Disposición 1:RP	2.740371	a
Disposición 1:T	2.713613	a
Disposición 2:RP	1.854105	b
Disposición 2:T	1.776508	b

FUENTE: Elaboración propia.

La prueba de comparación media de Duncan mostró que no existe diferencia significativa entre los tratamientos y sus respectivos testigos (RP1 y T-1, RP2 y T-2), pero sí se encuentra diferencia estadísticamente significativa entre las diferentes disposiciones de laterales de riego (T-1 y T-2, RP1 y RP2). Los tratamientos con mayor número de tubérculos no comerciales fueron RP1 y T-1, con un promedio de 7.52 y 7.90 tubérculos por planta, mientras que RP2 y T-2 presentaron menor número de tubérculos por planta, siendo éste de 5.17 y 4.66 respectivamente.

4.2.4 Tamaño de tubérculos

Con la finalidad de saber la influencia del riego deficitario en el calibre de los tubérculos, se realizó la clasificación manual por categorías tal como se muestra en la Figura 24.

De la clasificación antes mencionada se puede notar que existen efectos en el calibre de los tubérculos, por un lado, existe disminución a causa de la disposición de laterales (T-1 y T-2) y por otro la aplicación del riego deficitario con secado parcial de raíces (RP1 y RP2), además de provocar una disminución sustancial en los rendimientos.

La disposición de tipo 1 (RP1 y T-1), presentó mayor cantidad de tubérculos del calibre “extra”, en el calibre “primera” se observó coincidencia en los cuatro tratamientos, se presentó superioridad de la disposición de tipo 1 respecto a la disposición de tipo 2 en los calibres “segunda”, “tercera” y los menores de 4.5cm; se nota claramente que tanto la disposición y la aplicación de RPD han tenido repercusión en el calibre de los tubérculos.

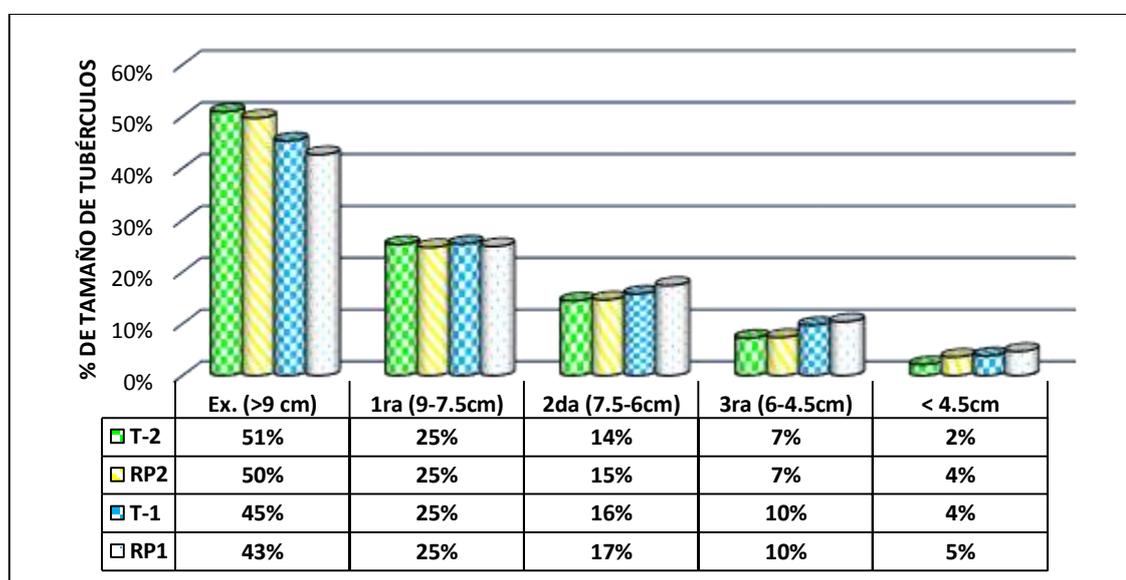


Figura 24: Tamaño de tubérculos según su clasificación.

FUENTE: Elaboración propia.

Tabla 27: Comparación de medias del rendimiento por calibres de tubérculos por planta del cultivo de papa, sometidos a cuatro tratamientos, según la prueba de Tukey a nivel de $p=0.05$.

TRATAMIENTO	Extra	1 era	2 da	3era	< 4.5cm
T-2	1.0100889 a	0.5030667 a	0.2871556 ab	0.1445778 b	0.04244444 b
RP2	0.9115556 ab	0.4541333 a	0.2688000 b	0.1355556 b	0.06595556 a
T-1	0.8694667 bc	0.4879556 a	0.3023556 ab	0.1866667 a	0.07395556 a
RP1	0.7723111 c	0.4519556 a	0.3157778 a	0.1881333 a	0.08511111 a
Significancia	significativo	NS	significativo	significativo	significativo

FUENTE: Elaboración propia.

Del análisis estadístico (Tabla 27) se obtiene que; en la clasificación tipo extra existe diferencia significativa, se logró mejores resultados en el tratamiento T-2 y resultados más bajos en RP1; para la clasificación primera (1 era), no se encontró significancia estadística entre los cuatro tratamientos obteniéndose resultados muy parecidos; para la clasificación segunda (2 da) se observó que hay diferencia significativa, siendo los tratamientos de mejor resultado T-1 y RP1, y los más bajos T-2 y RP2; para la clasificación tercera (3 era) se identificó diferencia estadística entre los tratamientos, los que presentaron valores más altos y con similitud fueron T-1 y RP1, mientras que los más bajos y similares fueron T-2 y RP2; para la clasificación de tubérculos menores a la longitud de 4.5 cm, se identificó diferencia estadística siendo la de menor valor el tratamiento T-2 y el resto presentó similitud entre sus medias.

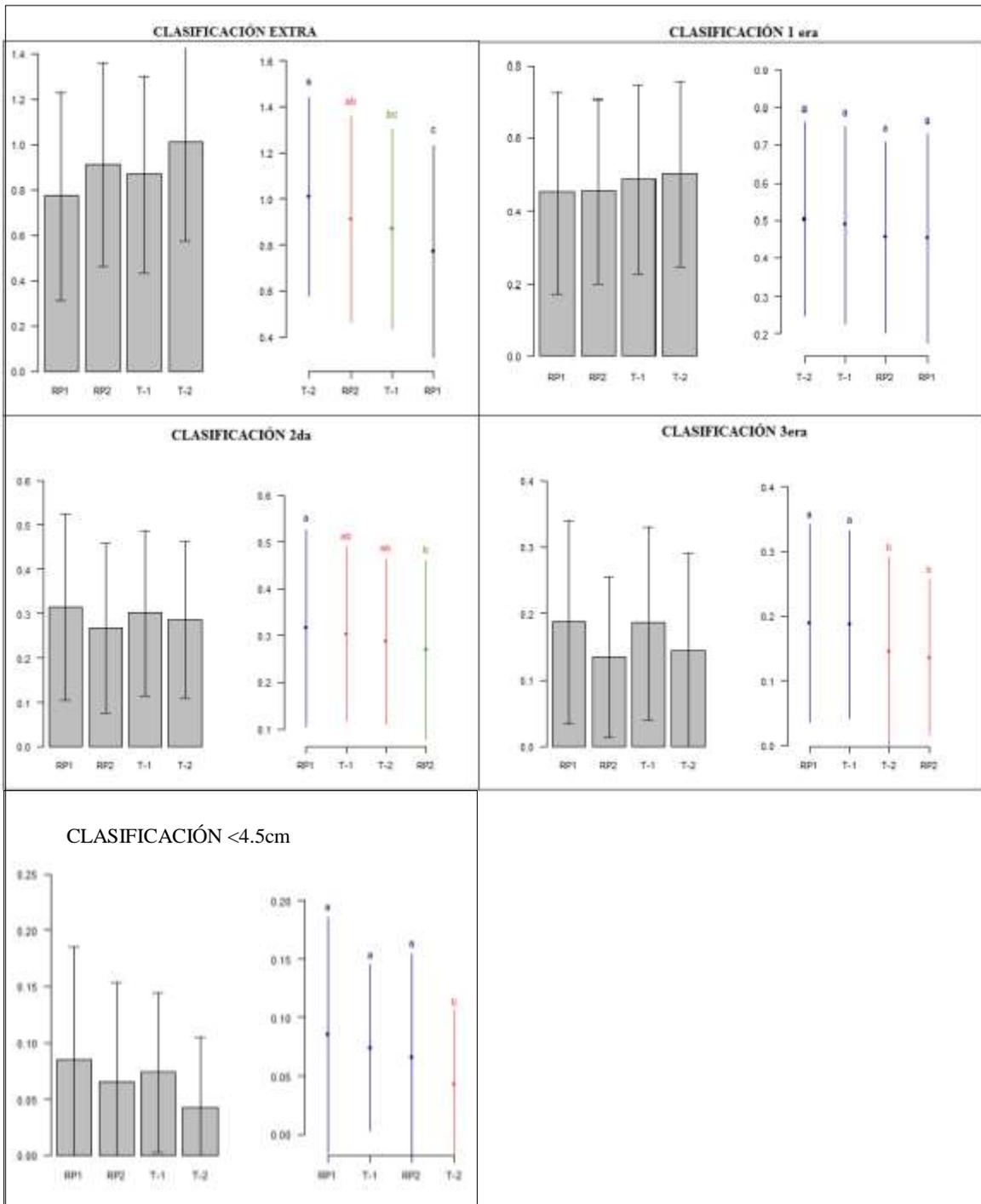


Figura 25: Grupos y desviación estándar para las clasificaciones.

FUENTE: Elaboración propia.

4.3 Post cosecha

4.3.1 Porcentaje de materia seca de tubérculos

De acuerdo a los resultados de materia seca, obtenidos por el laboratorio de Análisis de suelos, plantas, agua y fertilizantes de la facultad de agronomía, se observa que el tratamiento RP2 obtuvo mayor valor en peso seco de tubérculos, al contrario, el menor valor se encuentra en el tratamiento RP1, mientras que los testigos T-1 Y T-2 coincidieron en el porcentaje de materia seca. Según la clasificación planteada por Mendoza y Mosquera (2012), los cuatro tratamientos presentan contenido de materia seca dentro del rango promedio.

Tabla 28: Materia seca de tubérculos por tratamiento.

TRATAMIENTO	% MATERIA SECA
RP1	19.03
T-1	21.53
RP2	22.13
T-2	21.59

FUENTE: Elaboración propia.

4.3.2 Extracción y absorción de nutrientes por el cultivo

Los valores de extracción de nutrientes del cultivo de papa (follaje y tubérculo) para cada tratamiento se muestran en la Tabla 29. Los resultados corresponden al análisis de extracción de elementos mayores y menores (N, P, K, Ca, Mg, S)

De lo que se observan en la Figura 26y en la Tabla30se infiere que a los 110 días después de la siembra (Fin de la maduración- cosecha), la extracción de nitrógeno, fósforo, potasio, magnesio y azufre fue superior en los tubérculos que en el follaje a comparación del calcio que fue mayor en la parte aérea.

Tabla 29: Extracción de nutrientes de hojas y tubérculos para cada tratamiento.

TRATAMIENTOS	EXTRACCIÓN DE NUTRIENTES*						ANÁLISIS FOLIAR (hojas)					
	N	P	K	Ca	Mg	S	N	P	K	Ca	Mg	S
	-----kg/ha-----						-----kg/ha-----					
T-1	162.4	30.3	240.8	11.0	15.1	16.5	23.19	1.5	20.4	13.6	3.0	1.7
RP1	193.0	26.4	247.0	8.0	11.5	13.8	25.2	1.4	19.8	18.5	3.3	1.7
T-2	172.7	24.3	197.4	8.1	12.2	13.5	22.3	1.4	17.9	20.4	2.6	1.8
RP2	146.4	27.1	258.5	11.4	12.9	17.1	26.6	1.5	17.0	23.9	4.3	2.1

FUENTE: Elaboración propia.

* Hace referencia a la cantidad de nutrientes que se exporta solo en los órganos cosechados: en este caso los tubérculos

Tabla 30: Absorción de nutrientes para cada tratamiento.

TRATAMIENTOS	ABSORCIÓN DE NUTRIENTES **					
	N	P	K	Ca	Mg	S
	-----kg/ha-----					
T-1	185.6	31.7	261.2	24.6	18.2	18.2
RP1	218.2	27.8	266.8	26.5	14.7	15.5
T-2	181.8	25.8	215.4	28.5	14.8	15.3
RP2	185.1	28.6	275.5	35.3	17.2	19.2

FUENTE: Elaboración propia.

****Cantidad total** de nutrientes que el cultivo requiere absorber (considerando tubérculos y hojas) durante su ciclo de desarrollo para producir una determinada cantidad de rendimiento.

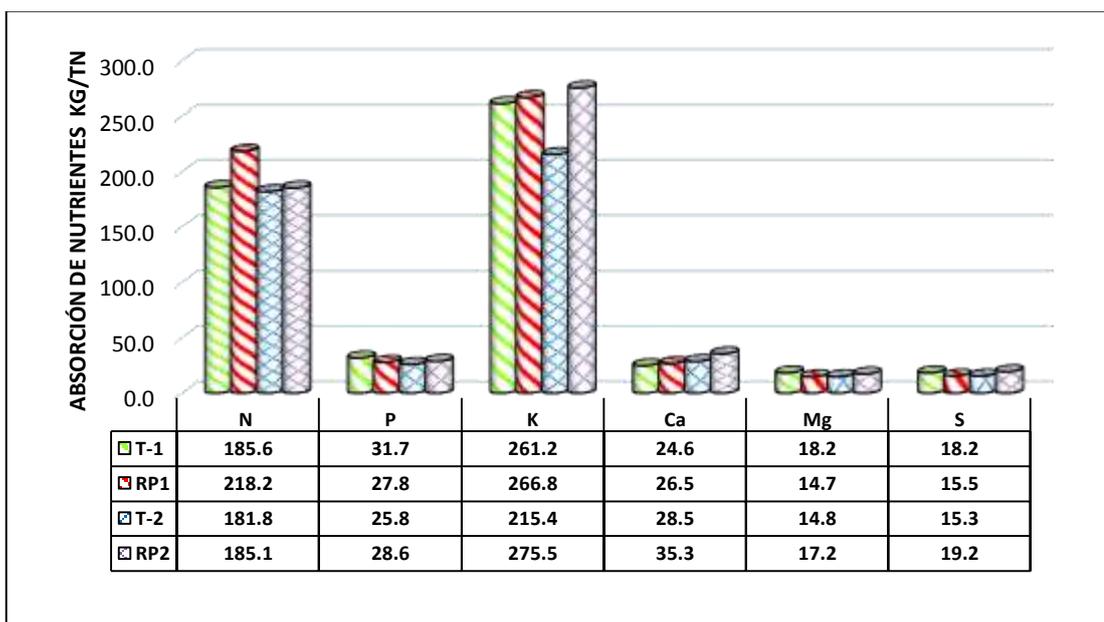


Figura 26: Total de nutrientes extraídos por hojas y tubérculos por tratamiento.

FUENTE: Elaboración propia.

4.3.3 Balance nutricional del suelo

Durante el desarrollo del estudio se realizó dos análisis del suelo: la primera antes de la siembra, realizada de manera general; la segunda posterior a la cosecha, en ésta última se tomó muestras por cada tratamiento.

De la Tabla 31, se logra evidenciar que en la disposición tipo 1, en ambos tipos de riego (RP1 y T-1), se incrementó la cantidad de potasio disponible en el suelo, lo mismo sucedió en los tratamientos RP2 y T-2 pero en menor medida. Otro elemento que tomó relevancia es el fósforo, este tuvo una disminución respecto al análisis inicial, se nota que la disposición de lateral de tipo 2 mayor gasto de fosforo respecto a la disposición de tipo 1.

Tabla 31: Balance de nutrientes en el suelo

	TRATAMIENTOS	P2O5	K2O	CaO	MgO
		----- kg/ha -----			
INICIAL	T-1	232.9	590.3	6915	554.9
	RP1				
	T-2				
	RP2				
FINAL	T-1	223.0	746.4	4644.7	530.4
	RP1	217.0	951.3	4576.5	485.6
	T-2	203.3	663.5	5110.3	501.9
	RP2	199.5	663.5	5138.7	571.3
BALACE	T-1	-9.9	156.1	-2270.3	-24.5
	RP1	-15.9	361.0	-2338.5	-69.3
	T-2	-29.6	73.2	-1804.7	-53.0
	RP2	-33.4	73.2	-1776.3	16.4

FUENTE: Elaboración propia.

4.4 Otros resultados

4.4.1 Aporte hídrico durante la campaña

Los riegos aplicados fueron de manera simultánea para cada uno de los tratamientos. Se muestra en la Tabla 32 que se realizaron 23 riegos uniformes para cada tratamiento durante la fase no experimental y 14 riegos diferenciados correspondientes a cada tratamiento en la fase experimental con láminas de 100% y 50%. En total se aplicaron 37 riegos por tratamiento durante la campaña, con una frecuencia de riego de 1 día.

Tabla 32: Número de riegos por tratamiento.

Riego/Tratamiento	RP1	T-1	RP2	T-2
Nº Riegos al 100% lámina	23	37	23	37
Nº Riegos al 50% de lámina	14	0	14	0
TOTAL	37	37	37	37

FUENTE: Elaboración propia.

De la Tabla 33 se aprecia las fechas de los riegos y los volúmenes correspondientes a cada tratamiento durante la campaña, además se muestra los periodos de aplicación del

riego deficitario. El riego deficitario con secado parcial de raíces (RPD) se realizó en dos etapas siendo la primera a partir del día 20 después de la siembra (03/07/2017) hasta el día 29 después de la siembra (12/07/2017), éste primer periodo de aplicación coincidió con el estado fenológico de crecimiento. La segunda aplicación se realizó entre los 67 y 94 días después de la siembra (de 28 de agosto al 15 de octubre del 2017), coincidiendo con la etapa fenológica de maduración.

La aplicación del riego deficitario se desarrolló en dos etapas fenológicas del cultivo de papa, crecimiento y maduración, en estas etapas los tratamientos RP1 y RP2 recibieron el 50% del ETo. Finalmente se aprecia que la cantidad de agua aplicado a los tratamientos testigos T-1 y T-2 ($1615 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) en comparación a los tratamientos RP1 y RP2 ($1290 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) existe un ahorro de agua del 20%

Tabla 33: Fecha y volumen de agua aplicado en cada tratamiento.

DIA DESPUES DE LA SIEMBRA	Nº DE RIEGO	FECHA DE APLICACIÓN	VOLUMEN DE AGUA POR TRATAMIENTO (m3/ha2)			
			RP1	T-1	RP2	T-2
10	1	23/06/2017	27.3	27.3	27.3	27.3
13	2	26/06/2017	20.4	20.4	20.4	20.4
15	3	28/06/2017	20.4	20.4	20.4	20.4
18	4	01/07/2017	20.4	20.4	20.4	20.4
20	5	03/07/2017	6.8	13.6	6.8	13.6
22	6	05/07/2017	6.8	13.6	6.8	13.6
24	7	07/07/2017	6.8	13.6	6.8	13.6
27	8	10/07/2017	10.2	20.4	10.2	20.4
29	9	12/07/2017	13.6	27.3	13.6	27.3
32	10	15/07/2017	30.0	30.0	30.0	30.0
34	11	17/07/2017	68.1	68.1	68.1	68.1
37	12	20/07/2017	30.0	30.0	30.0	30.0
39	13	22/07/2017	31.3	31.3	31.3	31.3
41	14	24/07/2017	34.1	34.1	34.1	34.1
43	15	26/07/2017	27.3	27.3	27.3	27.3
45	16	28/07/2017	45.0	45.0	45.0	45.0
49	17	01/08/2017	75.0	75.0	75.0	75.0
51	18	03/08/2017	60.0	60.0	60.0	60.0
53	19	05/08/2017	13.6	13.6	13.6	13.6
55	20	07/08/2017	13.6	13.6	13.6	13.6
57	21	09/08/2017	64.1	64.1	64.1	64.1
59	22	11/08/2017	13.6	13.6	13.6	13.6
62	23	14/08/2017	79.1	79.1	79.1	79.1
64	24	16/08/2017	66.8	66.8	66.8	66.8
66	25	18/08/2017	13.6	13.6	13.6	13.6
69	26	21/08/2017	76.3	76.3	76.3	76.3
71	27	23/08/2017	72.2	72.2	72.2	72.2
74	28	26/08/2017	64.1	64.1	64.1	64.1
76	29	28/08/2017	40.9	81.8	40.9	81.8
79	30	31/08/2017	31.3	62.7	31.3	62.7
81	31	02/09/2017	22.5	45.0	22.5	45.0
83	32	04/09/2017	27.3	54.5	27.3	54.5
85	33	06/09/2017	57.9	115.9	57.9	115.9
87	34	08/09/2017	15.0	30.0	15.0	30.0
90	35	11/09/2017	27.9	55.9	27.9	55.9
92	36	13/09/2017	24.5	49.1	24.5	49.1
94	37	15/09/2017	32.7	65.4	32.7	65.4
TOTAL			1290.7	1615.1	1290.7	1615.1

FUENTE: Elaboración propia.

V. CONCLUSIONES

- La aplicación del riego por goteo complementado con fertirrigación, permitió incrementar significativamente el rendimiento, tanto en condiciones de riego con 100% de ETo y en la aplicación de riego parcial deficitario RPD. Con esta tecnología se logró un incremento de aproximadamente 33% en el rendimiento comercial, siendo 40 t ha⁻¹ el rendimiento promedio obtenido por Sanchez (2012) y Nuñez (2016) con la variedad UNICA en la misma zona de estudio, mientras que en la presente investigación se logró obtener rendimientos totales superiores a 60 tha⁻¹ y superiores a 50 t ha⁻¹ en rendimiento comercial.
- La aplicación de la dosis fertirrigada (115kg N ha⁻¹, 234kg P₂O₅ ha⁻¹, 196 kg K₂O kg ha⁻¹, 59.6kg CaO ha⁻¹, 32.4kg MgO ha⁻¹ y 26.3kgS ha⁻¹), planteada en el presente trabajo, mediante riego por goteo, alcanzó el rendimiento estimado en los tratamientos T-1 y T-2 con 60 tha⁻¹ y 62 tha⁻¹ respectivamente, mientras que por el efecto de aplicación de riego deficitario con secado parcial de raíces, se alcanzó los 54 t ha⁻¹ y 55 tha⁻¹ para los tratamientos RP1 y RP2 respectivamente.
- El riego deficitario con secado parcial de raíces, aplicado en dos etapas fenológicas (Crecimiento y madurez), redujo de forma notable el tamaño de los tubérculos, notándose significancia estadística en el número de tubérculos comerciales, mientras que el efecto significativo en tubérculos no comerciales se dio por el tipo de disposición de laterales de riego.
- Las extracciones de nutrientes por el cultivo de papa en los distintos tratamientos tienen similitud entre ellos. En la disposición tipo 2 se nota que el tratamiento RP2 extrajo mayor cantidad de nutrientes respecto a su testigo T-2, mientras que en la disposición de tipo 1, el tratamiento RP1 solo es superior en nitrógeno, potasio y calcio.

VI. RECOMENDACIONES

- Ubicar adecuadamente los laterales de riego, en los surcos, ya que los goteros deben ubicarse con precisión entre plantas adyacentes, de esta forma se logrará realizar la correcta aplicación del RPD.
- Se sugiere sembrar en surcos aporcados y realizados de manera mecanizada con la finalidad de no mover las mangueras de riego y así mantener la ubicación de los emisores en los lugares establecidos.
- La adopción de la tecnología riego por goteo y fertirrigación en el cultivo de papa, representa trabajo técnico y permanente, se recomienda desarrollar buena transferencia de la tecnología para su adopción correcta de parte de los agricultores
- Para la disposición de laterales de riego en paralelo se sugiere trabajar con emisores autocompensados de bajos caudales y con espaciamentos menores, con la finalidad de lograr caudales homogéneos y que al trabajar con caudales bajos se logra un gran volumen de tierra mojada que facilita el desarrollo radicular, pero sin peligro de encharcamiento.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1.- Alexandratos, N; Bruinsma, J. 2012. World agriculture towards 2030/2050: The 2012 Revision. ESA Working Paper. N°. 12-03, FAO, Roma, Italia. 160 p. Disponible en:http://www.fao.org/fileadmin/templates/esa/Global_perspectives/world_ag_2030_50_2012_rev.pdf
- 2.- ANA (Autoridad Nacional del Agua). 2000? Condiciones agroclimáticas del cultivo de la papa. Cartilla N° 10. Lima, Perú. 2 p. Disponible en:
http://www.ana.gob.pe/sites/default/files/normatividad/files/condiciones_agroclimaticas_papa_0_2.pdf
- 3.- AUTODEMA (Autoridad Autónoma de Majes). 2015. Aplicación de un riego eficiente en un sistema de riego por goteo. Gobierno Regional de Arequipa. Arequipa, Perú. 16p.
- 4.- Bello, M; Pino, M. 2000. Cálculo básico para fertirrigar. Boletín INIA N° 26. Centro Regional de Investigación Kampenaika. Punta Arena, Chile. 30 p. Disponible en:
<http://biblioteca.inia.cl/medios/biblioteca/boletines/NR25633.pdf>
- 5.- Calvache, U. 2002. Fertirriego en Ecuador, presente y futuro. X congreso ecuatoriano de ciencias del suelo. Universidad Central de Ecuador. Quito, Ecuador. 9 p. Disponible en:https://www.researchgate.net/publication/301766196_FERTIRRIEGO_EN_EL_ECUADOR
- 6.- Campos Blanco, CR. 2014. Efecto de la fertilización en el rendimiento y características biométricas del cultivo de papa variedad Huayro en la comunidad de Aramachay (Valle del Mantaro). Tesis Ing. Agr. Lima, Perú, UNALM. 89 p.
- 7.- Cañamero, M; Laguna, T. 2012. Innovación tecnológica en riego por goteo. CONCYTEC. Lima, Perú. p. 138-139.

- 8.- CREA (Centro Regional de Estudios del Agua). 2005. Fertirriego. Hoja Informativa N° 12. Universidad Castilla- La Mancha. España. 8 p. Disponible en:
<http://crea.uclm.es/siar/publicaciones/files/HOJA11.pdf>
- 9.- Egúsqiza Bayona, RP. 2014. La papa en el Perú. 2014. Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú. 200 p.
- 10.- Gámez Borrás, Y. 2017. Efecto del número de tallos en el crecimiento y rendimiento de la papa (*Solanum tuberosum L.*) cultivar Royal. Tesis Ing. Agro.Universidad Central Marta Abreu de Las Villas. Santa Clara, Cuba. 40 p. Disponible en:
<http://dspace.uclv.edu.cu/bitstream/handle/123456789/7985/Yenisey%20G%C3%A1mez%20Borr%C3%A1s.pdf>
- 11.- García, F; Correndo, A. 2016. Cálculo de requerimientos nutricionales. Planilla de cálculo para estimar la absorción y extracción de nutrientes. (IPNI) Programa Latinoamérica Cono Sur. Buenos Aires, Argentina. Disponible en:
[https://www.fertilizar.org.ar/subida/CalculosNutricionales/CALC_REQ%20v2013%20\(Excel%202003\).xls](https://www.fertilizar.org.ar/subida/CalculosNutricionales/CALC_REQ%20v2013%20(Excel%202003).xls)
- 12.- Gutiérrez, J; Espinoza, M. 2007. UNICA: variedad peruana para mercado fresco y papa frita con tolerancia y resistencia para condiciones climáticas adversas. Revista Latinoamericana de la Papa. Mar del Plata, Argentina. 14(1): 41-51. Consultado 02 de agosto del 2017. Disponible en: <http://papaslatinas.org/index.php/rev-alap>
- 13.- Holzapfel, E; López, C; Joublan, J; Matta, R. 2001. Efecto del agua y fertirrigación en el desarrollo y producción de naranjos cv. Thompson. Agricultura Técnica. 61(1): 51-60. Consultado 15 de junio del 2017. Disponible en:
<https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?>
- 14.- Kafkafi, U; Tarchitzky, J. 2012. Fertirrigación: una herramienta para una eficiente fertilización y manejo del agua. Melgar, R (trad). Asociación Internacional de la

Industria de Fertilizantes (IFA) Instituto Internacional de la Potasa (IIP), París, Francia. 80 p. Disponible en:

https://www.ipipotash.org/udocs/391-2012_ifa_ipi_fertirrigacion.pdf

15.- Medina Jiménez, F. 2003. Fertirrigación de la papa a partir de la extracción de la cosecha. Granja: revista de divulgación agropecuaria. (10): 22-25. Gran Canaria, España.

Disponible en:

<http://anuariosatlanticos.casadecolon.com/index.php/GRANJA/article/view/9725/9402>

16.- Mendoza, H; Mosquera, V. 2011. Selección de variedades de papa. Metodología para evaluación de material genético avanzado. Proyecto UNALM-INCAGRO-CIP. Lima, Perú. 72 p.

17.- MINAGRI (Ministerio de Agricultura y Riego). 2017. Papa: características de la producción nacional y de la comercialización en Lima Metropolitana. Lima, Perú. 13 p. Disponible en:

<http://www.minagri.gob.pe/portal/analisis-economico/analisis-2017>

18.- National Plant Food Institute. 1995. Manual de fertilizantes. Ed. Limusa. 9a reimp. Ciudad de México, México. 285 p.

19.- Núñez Vargas, P. 2016. Fuentes y dosis de fertilización potásica en el crecimiento, tuberización y calidad de fritura de la papa (*Solanum tuberosum L.*) variedad UNICA. Tesis Ing. Agr. Lima, Perú, UNALM. 95 p.

20.- Octavio, V; Pérez, P. 2003. Evaluación de diferentes niveles de fertilizantes NPK en la producción de minitubérculos de papa (*Solanum tuberosum L.*) en semillero, para la producción comercial, proveniente de semilla sexual, variedad Atzimba. Tesis Ing. Agr. Managua, Nicaragua, UNA. 47 p. Disponible en:

<http://repositorio.una.edu.ni/2004/>

- 21.- Ramos, C. 1991. Caracterización y selección de papas cultivables en el Perú para elaboración de hojuelas (*chips*) y tiras (*French fries potatoes*) fritas. Tesis Ing. Ind. Alim. Lima, Perú, UNALM. p. 10-12.
- 22.- Rojas, G; Posadas, A; Quiroz, R; Holle, M; Málaga, M. 2007. Secado parcial de raíces: una promisoriosa técnica de riego en papa (*Solanum tuberosum L.*). Centro Internacional de la Papa. Lima, Perú. Zonas Áridas. 11(1): 206-218. Disponible en: <http://revistas.lamolina.edu.pe/index.php/rza/article/view/216>
- 23.- Rojo Libuy, W. 2006. Guía de manejo: nutrición vegetal de especialidad papa. CropKit. SQMF. Santiago, Chile. 88 p. Disponible en: http://www.sqm-vitas.com/Portals/0/pdf/cropKits/SQM-Crop_Kit_Potato_L-ES.pdf
- 24.- Rottenberg, O. 2017. Nutrición de papa. Evento de papa Haifa. 2007. Ciudad de México, México. 131 p.
- 25.- Sánchez Blanco MJ; Torrecillas, A. 1995. Riego deficitario controlado, fundamentos y aplicaciones. Mundi Prensa. Madrid, España. 66 p.
- 26.- Sánchez, M; Meza, R. 2014. Evaluación del rendimiento del cultivo de papa bajo la aplicación del riego deficitario (PRD) utilizando cintas de riego. Anales Científicos.76 (1): 22-28
- 27.- Sánchez, J. 2000. Fertirrigación: Principios, factores, aplicaciones. Seminario de Fertirrigación: Apukai-Comex. Lima, Perú. 27 p. Disponible en: <http://www.fertilizando.com/articulos/FertirrigacionPrincipiosFactoresAplicaciones.pdf>
- 28.- Santos, T; Lopes, C; Rodrigues, M; De Souza, C; Da Silva, J; Maroco, J; Pereira, J; Chaves, M. 2007. Effects of deficit irrigation strategies on cluster microclimate for improving fruit composition field-grown grapevines. Scientia Horticulturae, Sao Paulo, Brasil. 112 p.

- 29.- Sierra, C; Santos, R; Kalazih, J. 2002. Fertilización del cultivo de la papa en la zona sur de Chile. Instituto de Investigación Agropecuaria (INIA). Santiago, Chile. 41 p.
- 30.- Sifuentes, F. 2012. Crecimiento, producción y calidad de papa para fritura var. UNICA. Tesis Ing. Agr. Lima, Perú, UNALM. pp. 9-12
- 31.- SMATR (Fertilizer Management). 2017. Las Mejores prácticas de fertirrigación (En línea, sitio web). Consultado 12 de junio del 2017. Disponible en <https://www.smart-fertilizer.com/es/articles/fertigation-practice>
- 32.- WWAP (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos). 2015. Agua para un mundo sostenible: datos y cifras.15 p. Perusa, Italia, UNESCO. Informe de las Naciones Unidas sobre los recursos hídricos en el mundo 2015.

VIII. ANEXOS

ANEXO N° 1: REGISTRO METEOROLGICOS PROMEDIO MENSUAL (2017)

MES	HORAS DE SOL	TEMPERATURA C°		HUMEDAD RELATIVA (%)	VELOCIDAD DE VIENTO (m/s)	PP (mm)
		MAX	MIN			
Junio	6.03	19.94	15.98	88.48	1.56	0.00
Julio	5.90	19.21	15.44	88.12	1.56	0.00
Agosto	6.70	18.47	14.33	90.85	1.55	0.02
Septiembre	8.53	18.32	14.08	91.95	1.64	0.03

Fuente: Estación meteorológica del departamento de recursos hídricos. UNALM

ANEXO N° 4: RIEGO PREVIO A LA PREPARACIÓN DEL TERRENO



Riego presurizado por aspersión

FUENTE: Elaboración propia.



Terreno saturado luego de 5 horas de riego

FUENTE: Elaboración propia.

ANEXO N° 5: REGISTRO DE LA PREPARACIÓN DEL TERRENO



Laboreo mecanizado del suelo

FUENTE: Elaboración propia.



Proceso de nivelación del terreno

FUENTE: Elaboración propia.

ANEXO N° 6: PRUEBA DE BULBO HUMEDO



Prueba de bulbo húmedo
FUNETE: Elaboración propia.



Franja humedecida con excelente traslape
FUENTE: Elaboración propia.

ANEXO N° 7: MÓDULO DE INYECCIÓN DE FERTILIZANTES

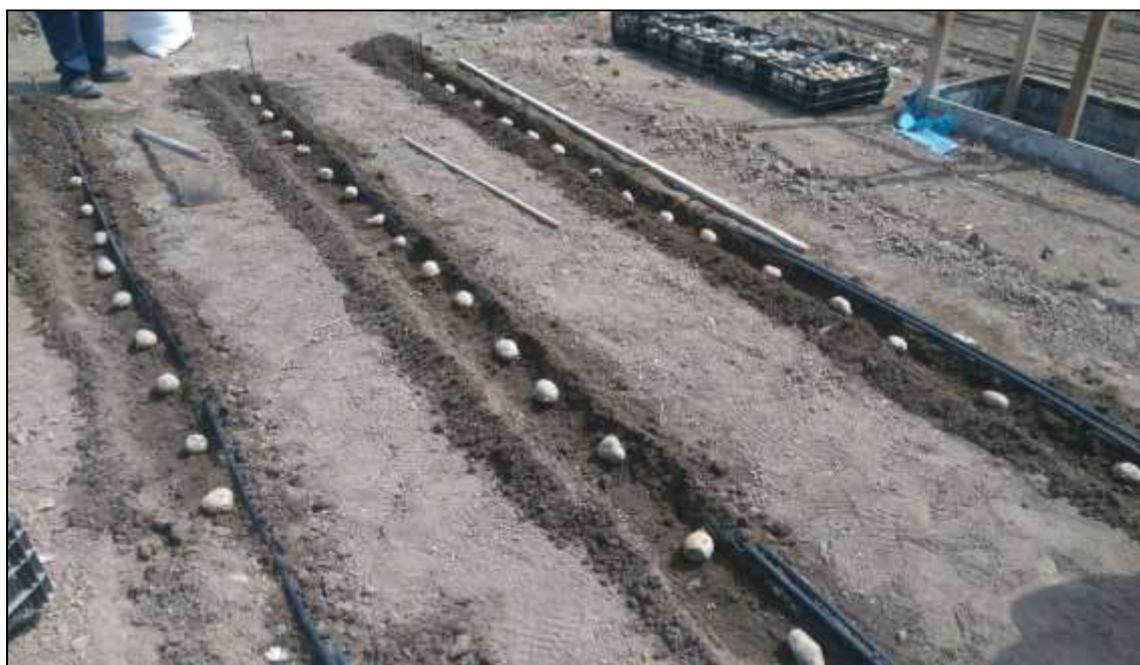


Zona de inyección de fertilizantes mediante el inyector tipo venturi
FUENTE: Elaboración propia.

ANEXO N° 8: LABORES CULTURALES DESARROLLADAS



Instalación de laterales de riego.
FUENTE: Elaboración propia.



Siembra del tubérculo con una separación de 0.3m entre cada una.
FUENTE: Elaboración propia.



Semi aporque desarrollado a los 18 días después de la siembra
FUENTE: Elaboración propia.



Aporque desarrollado a los 30 días después de la siembra
FUENTE: Elaboración propia.



Control integrado de plagas y aplicación de abonos foliares

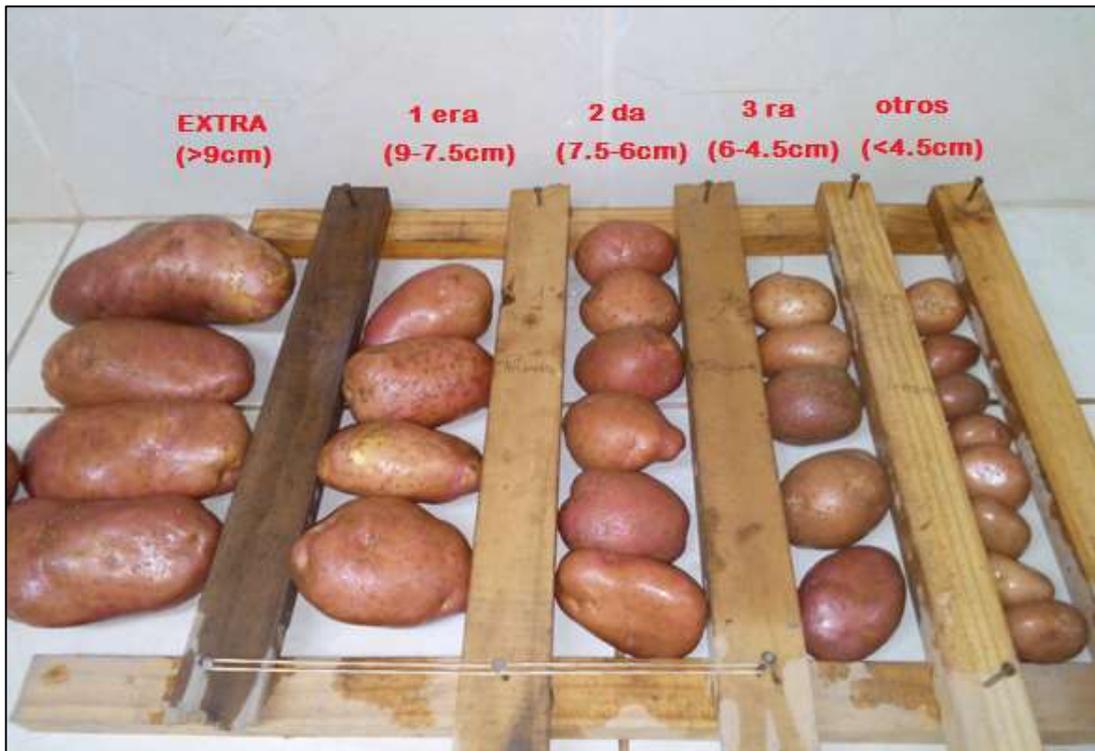
FUENTE: Elaboración propia.



Cosecha manual realizada el día 110 después de la siembra.

FUENTE: Elaboración propia.

ANEXO N° 9: REGISTRO DE LA COSECHA Y CLASIFICACIÓN POR CALIBRE



Clasificador según los calibres correspondientes.

FUENTE: Elaboración propia.



Clasificación de los tubérculos según los calibres.

FUENTE: Elaboración propia.

ANEXO N° 10: ANÁLISIS FÍSICO QUÍMICO DEL SUELO – FINAL

ANÁLISIS DE SUELO - CARACTERIZACIÓN

SOLICITANTE : PIERO ABRAHAN NATIVIDAD TORIBIO
 PROCEDENCIA : La Molina
 RESP. ANALISIS : Ing. Elizabeth Monterrey Porras
 FECHA DE ANALISIS : La Molina, 30 de Octubre de 2017

Número de muestra		CE dS / m Relación 1:1	Análisis Mecánico				pH Relación 1:1	M.O. %	P ppm	K ppm	CaCO ₃ %	Cationes Cambiables					
Lab.	Campo		Arena %	Limo %	Arcilla %	Textura						CIC meq/l	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Al ⁺⁺⁺ +H ⁺
13224	RP-1	1.09	56.70	22.78	18.52	Franco arenoso	7.83	1.71	48.78	390.00	0.92	10.00	8.08	1.19	0.15	0.59	-

FUENTE: Laboratorio de Agua, Suelo, Medio Ambiente y Fertirriego – FIA, UNALM

ANÁLISIS DE SUELO - CARACTERIZACIÓN

SOLICITANTE : PIERO ABRAHAN NATIVIDAD TORIBIO
PROCEDENCIA : La Molina
RESP. ANÁLISIS : Ing. Elizabeth Monterrey Porras
FECHA DE ANÁLISIS : La Molina, 30 de Octubre de 2017

Número de muestra	Lab.	Campo	CE ds / m Relación 1:1	Análisis Mecánico				pH Relación 1:1	M.O. %	P ppm	K ppm	CaCO ₃ %	Cationes Cambiables					
				Arena %	Limo %	Arcilla %	Textura						Clor total	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Al ³⁺ +H ⁺
13226		RP-2	0.89	52.70	32.78	14.52	Franco arenoso	7.93	1.74	42.99	272.00	0.54	10.99	9.05	1.40	0.07	0.41	-

FUENTE: Laboratorio de Agua, Suelo, Medio Ambiente y Fertirriego – FIA, UNALM

ANÁLISIS DE SUELO - CARACTERIZACIÓN

SOLICITANTE : PIERO ABRAHAN NATIVIDAD TORIBIO

PROCEDENCIA : La Molina

RESP. ANÁLISIS : Ing. Elizabeth Monterrey Porras

FECHA DE ANÁLISIS : La Molina, 30 de Octubre de 2017

Número de muestra		CE ds / m Relación 1:1	Análisis Mecánico				pH Relación 1:1	M.O. %	P ppm	K ppm	CaCO ₃ %	Cationes Cambiables					
Lab.	Campo		Arena %	Limo %	Arcilla %	Textura						CIC total	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Al ⁺⁺⁺ +H ⁺
13223	T-1	1.13	55.70	26.38	16.92	Franco arenoso	7.81	1.69	48.16	306.00	1.00	10.16	8.18	1.30	0.11	0.57	-

FUENTE: Laboratorio de Agua, Suelo, Medio Ambiente y Fertirriego – FIA, UNALM

ANÁLISIS DE SUELO - CARACTERIZACIÓN

SOLICITANTE : PIERO ABRAHAN NATIVIDAD TORIBIO
PROCEDENCIA : La Molina
RESP. ANALISIS : Ing. Elizabeth Monterrey Porras
FECHA DE ANALISIS : La Molina, 30 de Octubre de 2017

Número de muestra		CE ds / m Relación 1:1	Análisis Mecánico				pH Relación 1:1	M.O. %	P ppm	K ppm	CaCO ₃ %	Cationes Cambiables					
Lab.	Campo		Arena %	Limo %	Arcilla %	Textura						CIC total	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Al ³⁺ -H ⁺
13225	T-2	0.98	57.70	24.18	18.12	Franco arenoso	7.87	1.81	43.82	272.00	1.08	10.84	9.00	1.23	0.11	0.50	-

FUENTE: Laboratorio de Agua, Suelo, Medio Ambiente y Fertirriego – FIA, UNALM

ANEXO N° 11: ANÁLISIS FACTORIAL PARA NÚMERO DE TUBÉRCULOS COMERCIALES

Modelo Aditivo Lineal

$$Y_{ijk} = \underbrace{\mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij}}_{\mu_{ij}} + \varepsilon_{ijk}; i = 1, \dots, p [p = 2]; j = 1, \dots, q [q = 3]; k = 1, \dots, r_{ij} [r_{ij} = r = 4]$$

Y_{ijk} = El número de tubérculos comerciables en la disposición i , el tipo de riego j y la repetición k .

μ = Es el efecto del número de tubérculos comerciales medio general.

α_i = Es el efecto la disposición i .

β_j = Es el efecto del riego j .

$(\alpha\beta)_{ij}$ = Es el efecto de la interacción la disposición i con el riego j .

μ_{ij} = Es el efecto de la media de la combinación (tratamiento) ij .

ε_{ijk} = Es el efecto del error experimental obtenido en la disposición i , riego j y repetición k .

- **Prueba hipótesis de Efectos Principales.**

Para el efecto principal de A (Disposición):

$$H_0 : \alpha_i = 0, \forall i$$

$$H_1 : \alpha_i \neq 0, \text{ para al menos algún } i$$

Para el efecto principal de B (Riegos):

$$H_0 : \beta_j = 0, \forall j$$

$$H_1 : \beta_j \neq 0, \text{ para al menos algún } j$$

Para el efecto de la interacción AB (Disposición:Riego):

$$H_0 : (\alpha\beta)_{ij} = 0, \forall i, j$$

$$H_1 : (\alpha\beta)_{ij} \neq 0, \text{ para al menos algún } i, j$$

Pruebas de normalidad en los errores de los modelos

H₀: Los errores se distribuyen normalmente

H₁: Los errores no se distribuyen normalmente

Shapiro-Wilk normality test

Variable: Tubérculos comerciales
W = 0.9955, p-value = 0.029689

FUENTE: Software libre R

- **Prueba de Duncan**

Pares	difference	pvalue	signif.
Disposición 1:RP - Disposición 1:T	-0.202612	0.0233	*
Disposición 1:RP - Disposición 2:RP	-0.014909	0.8763	
Disposición 1:RP - Disposición 2:T	-0.244377	0.0107	*
Disposición 1:T - Disposición 2:RP	0.1877031	0.0355	*
Disposición 1:T - Disposición 2:T	-0.041765	0.6625	
Disposición 2:RP - Disposición 2:T	-0.229468	0.0102	*

FUENTE: Software libre R

ANEXO N° 12: ANÁLISIS FACTORIAL PARA NÚMERO DE TUBÉRCULOS NO COMERCIALES

- **Modelo Aditivo Lineal**

$$Y_{ijk} = \underbrace{\mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij}}_{\mu_{ij}} + \varepsilon_{ijk}; i = 1, \dots, p [p = 2]; j = 1, \dots, q [q = 3]; k = 1, \dots, r_{ij} [r_{ij} = r = 4]$$

Y_{ijk} = El número de tubérculos no comerciales en la disposición i , el tipo de riego j y la repetición k .

μ = Es el efecto del número de tubérculos no comerciales medio general.

α_i = Es el efecto la disposición i .

β_j = Es el efecto del riego j .

$(\alpha\beta)_{ij}$ = Es el efecto de la interacción la disposición i con el riego j .

μ_{ij} = Es el efecto de la media de la combinación (tratamiento) ij .

ε_{ijk} = Es el efecto del error experimental obtenido en la disposición i , riego j y repetición k .

- **Prueba hipótesis de Efectos Principales.**

Para el efecto principal de A (Disposición):

$$H_0 : \alpha_i = 0, \forall i$$

$$H_1 : \alpha_i \neq 0, \text{ para al menos algún } i$$

Para el efecto principal de B (Riegos):

$$H_0 : \beta_j = 0, \forall j$$

$$H_1 : \beta_j \neq 0, \text{ para al menos algún } j$$

Para el efecto de la interacción AB (Disposición:Riego):

$$H_0 : (\alpha\beta)_{ij} = 0, \forall i, j$$

$$H_1 : (\alpha\beta)_{ij} \neq 0, \text{ para al menos algún } i, j$$

Pruebas de normalidad en los errores de los modelos

H₀: Los errores se distribuyen normalmente

H₁: Los errores no se distribuyen normalmente

Shapiro-Wilk normality test

Variable: Tubérculos no comerciales

W = 0.97321, p-value = 8.256e-12

FUENTE: Software libre R

- **Prueba de Duncan**

Pares	difference	pvalue	signif.
Disposición 1:RP - Disposición 1:T	0.0267581	0.8694	
Disposición 1:RP - Disposición 2:RP	0.8862664	0.0000	***
Disposición 1:RP - Disposición 2:T	0.963863	0.0000	***
Disposición 1:T - Disposición 2:RP	0.8595083	0.0000	***
Disposición 1:T - Disposición 2:T	0.9371049	0.0000	***
Disposición 2:RP - Disposición 2:T	0.0775966	0.6335	

FUENTE: Software libre R

ANEXO N° 13: PRUEBA DE COMPARACIÓN DE MEDIAS TUKEY, PARA LOS CALIBRES DE TUBÉRCULOS

- VARIABLE EXTRA.

COMPARISON	DIFFERENCE	PVALUE	SIGNIF.	LCL	UCL
RP1 - RP2	-0.13924444	0.0049	**	-0.24659480	-0.031894088
RP1 - T-1	-0.09715556	0.0922	.	-0.20450591	0.010194801
RP1 - T-2	-0.23777778	0.0000	***	-0.34512813	-0.130427422
RP2 - T-1	0.04208889	0.7441		-0.06526147	0.149439245
RP2 - T-2	-0.09853333	0.0852	.	-0.20588369	0.008817023
T-1 - T-2	-0.14062222	0.0043	**	-0.24797258	-0.033271866

FUENTE: Software libre R

\$GROUPS	RENDIMIENTO	GROUPS
T-2	1.0100889	a
T-1	0.9115556	ab
RP2	0.8694667	bc
RP1	0.7723111	c

FUENTE: Software libre R

- VARIABLE 1 era

COMPARISON	DIFFERENCE	PVALUE	SIGNIF.	LCL	UCL
RP1 - RP2	-0.002177778	0.9998		-0.06568163	0.06132608
RP1 - T-1	-0.036000000	0.4628		-0.09950386	0.02750386
RP1 - T-2	-0.051111111	0.1632		-0.11461497	0.01239275
RP2 - T-1	-0.033822222	0.5180		-0.09732608	0.02968163
RP2 - T-2	-0.048933333	0.1950		-0.11243719	0.01457052
T-1 - T-2	-0.015111111	0.9281		-0.07861497	0.04839275

FUENTE: Software libre R

\$GROUPS	RENDIMIENTO	GROUPS
T-2	0.5030667	a
T-1	0.4879556	a
RP2	0.4541333	a
RP1	0.4519556	a

FUENTE: Software libre R

- VARIABLE 2 era

COMPARISON	DIFFERENCE	PVALUE	SIGNIF.	LCL	UCL
RP1 - RP2	0.04697778	0.0459	*	0.0005749685	0.09338059
RP1 - T-1	0.01342222	0.8790		-0.0329805871	0.05982503
RP1 - T-2	0.02862222	0.3862		-0.0177805871	0.07502503
RP2 - T-1	-0.03355556	0.2456		-0.0799583649	0.01284725
RP2 - T-2	-0.01835556	0.7389		-0.0647583649	0.02804725
T-1 - T-2	0.01520000	0.8338		-0.0312028093	0.06160281

FUENTE: Software libre R

\$GROUPS	RENDIMIENTO	GROUPS
RP1	0.3157778	a
T-1	0.3023556	ab
T-2	0.2871556	ab
RP2	0.2688000	b

FUENTE: Software libre R

- VARIABLE 3 era

COMPARISON	DIFFERENCE	PVALUE	SIGNIF.	LCL	UCL
RP1 - RP2	0.052577778	0.0005	***	0.018136401	0.087019150
RP1 - T-1	0.001466667	0.9995		-0.032974710	0.03590804
RP1 - T-2	0.043555556	0.0065	**	0.009114179	0.07799693
RP2 - T-1	-0.051111111	0.0008	***	-0.085552488	-0.01666973
RP2 - T-2	-0.009022222	0.9068		-0.043463599	0.02541915
T-1 - T-2	0.042088889	0.0093	**	0.007647512	0.07653027

FUENTE: Software libre R

\$GROUPS	RENDIMIENTO	GROUPS
RP1	0.1881333	a
T-1	0.1866667	a
T-2	0.1445778	b
RP2	0.1355556	b

FUENTE: Software libre R

- VARIABLE < 4.5cm

COMPARISON	DIFFERENCE	PVALUE	SIGNIF.	LCL	UCL
RP1 - RP2	0.01915556	0.0649	.	-0.0007811015	0.03909221
RP1 - T-1	0.01115556	0.4745		-0.0087811015	0.03109221
RP1 - T-2	0.04266667	0.0000	***	0.0227300096	0.06260332
RP2 - T-1	-0.0080000	0.7302		-0.0279366571	0.01193666
RP2 - T-2	0.02351111	0.0132	*	0.0035744540	0.04344777
T-1 - T-2	0.03151111	0.0003	***	0.0115744540	0.05144777

FUENTE: Software libre R

\$GROUPS	RENDIMIENTO	GROUPS
RP	0.08511111	a
T-1	0.07395556	a
RP2	0.06595556	a
T-2	0.04244444	b

FUENTE: Software libre R