

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO**

**FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS**

**ESCUELA PROFESIONAL DE AGRONOMIA**



COMPARATIVO DE LA DEMANDA HÍDRICA EN EL CULTIVO DE LECHUGA  
(*Lactuca sativa L.*) CON RIEGO POR GOTEO SUPERFICIAL Y SUB-SUPERFICIAL  
BAJO CONDICIONES DEL CENTRO AGRONÓMICO K'AYRA - CUSCO.

Tesis presentada por el Bachiller en  
Ciencias Agrarias **JULIO MANUEL  
CONCHA VARGAS** para optar al título  
profesional de INGENIERO AGRÓNOMO.

**Asesor:**

**Dr. Ing. Carlos Jesús Baca García.**

**K'AYRA - CUSCO - PERU**

**2017**

## DEDICATORIA

A mi familia, Mercedes Rupa Mayta, mis tíos Hugo y Yolanda por toda la paciencia, a mis primos.

A mis compañeros del código 2011 y a todos a quienes llegué a conocer en la carrera.

A todos los estudiantes e interesados en las ciencias agrarias quienes tengan a bien leer este trabajo.

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, de la cual me siento parte y trato de ser digno de ello.

A mi familia, que es está en todo momento, apoyándome.

A mi asesor, Ing. Dr. Carlos Jesús Baca García por haberme apoyado en el trabajo de investigación, por su visión y disposición, estoy muy agradecido por sus consejos y su amistad.

A los docentes nobles y buenos amigos por su paciencia y tiempo durante estos años.

Agradezco a todas la personas que llegue a conocer en K'ayra y que se hicieron mis amigos en los terrenos de cultivo, faenas, etc.

# INDICE.

	Página.
DEDICATORIA.....	i
AGRADECIMIENTOS .....	ii
INDICE. ....	iii
RESUMEN.....	viii
INTRODUCCIÓN.....	1
I. PROBLEMA OBJETO DE INVESTIGACIÓN.....	2
1.1. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA OBJETO DE INVESTIGACIÓN .....	2
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
1.2.1 Problema General.....	3
1.2.2 Problemas específicos.....	3
II. OBJETIVOS Y JUSTIFICACIÓN .....	4
2.1. OBJETIVO GENERAL .....	4
2.1.1. Objetivos específicos.....	4
2.2. JUSTIFICACIÓN .....	5
III. HIPÓTESIS .....	6
3.1. HIPÓTESIS GENERAL .....	6
3.1.1. Hipótesis específicas .....	6
IV. MARCO TEÓRICO .....	7
4.1. ANTECEDENTES DEL RIEGO LOCALIZADO .....	7
4.2. ASPECTOS IMPORTANTES SOBRE EL RIEGO LOCALIZADO.....	8
4.2.1. Zona de absorción de agua por las plantas .....	8
4.2.2. Absorción de agua durante el ciclo de cultivo .....	10
4.2.3. Periodo crítico de consumo de agua.....	11
4.2.4. Disponibilidad de agua en el suelo .....	11
4.3. ASPECTO AGRONÓMICO DEL RIEGO LOCALIZADO .....	14
4.3.1. Localización.....	14
4.3.2. El bulbo húmedo.....	15
4.3.3. Sistema Radicular.....	16
4.3.4. Goteros por planta .....	17
4.4. CARACTERÍSTICAS DEL RIEGO POR GOTEO.....	18
4.4.1. Modelos de mojado del suelo en el riego por goteo.....	18
4.4.2. Beneficios del riego por goteo.....	19
4.4.3. Problemas potenciales del riego por goteo.....	21
4.4.4. El Coeficiente de uniformidad para riego localizado (CU).....	23
4.5. EL AGUA EN EL SUELO.....	24
4.5.1. Infiltración .....	24
4.5.2. Problemas de infiltración.....	26
4.5.3. Pérdida de agua en el suelo .....	27
4.5.4. Régimen de Humedad.....	27

4.5.5.	La distribución del sistema radical .....	28
4.5.6.	Escurrimiento.....	29
4.5.7.	Percolación.....	29
<b>4.6.</b>	<b>MEDIDA DEL CONTENIDO HÍDRICO DEL SUELO .....</b>	<b>30</b>
4.6.1.	Medida directa del contenido hídrico del suelo. ....	30
4.6.2.	Mediciones indirectas del contenido hídrico del suelo.....	31
<b>4.7.</b>	<b>ESTUDIO DEL SUELO .....</b>	<b>33</b>
4.7.1.	Textura del suelo .....	33
4.7.2.	Estructura del suelo .....	34
4.7.3.	Aireación del suelo .....	35
4.7.4.	Densidad aparente .....	35
<b>4.8.</b>	<b>EVAPOTRANSPIRACION.....</b>	<b>36</b>
4.8.1.	Evaporación.....	36
4.8.2.	Transpiración.....	37
4.8.3.	Evapotranspiración.....	38
4.8.4.	Evapotranspiración de referencia ETo.....	39
4.8.5.	Evapotranspiración de cultivo ETc.....	40
4.8.6.	Determinación de la Evapotranspiración.....	41
<b>4.9.</b>	<b>GENERALIDADES DE AUTOMATIZACIÓN.....</b>	<b>42</b>
4.9.1.	Automática.....	42
4.9.2.	Automatización.....	42
4.9.3.	Concepto de control.....	42
4.9.4.	Concepto de sensores electrónicos.....	42
4.9.5.	Concepto de actuadores.....	43
4.9.6.	Elementos básicos de un sistema de control.....	43
4.9.7.	Sistema de control en lazo cerrado.....	43
<b>4.10.</b>	<b>SENSORES FDR, PARA LA MEDICIÓN DE AGUA EN EL SUELO.....</b>	<b>44</b>
4.10.1.	La teoría dieléctrica.....	44
4.10.2.	El modelo dieléctrico combinado.....	45
4.10.3.	El agua y las propiedades de otros materiales dieléctricos.....	45
4.10.4.	La capacitancia.....	45
4.10.5.	Funcionamiento del sensor FDR.....	46
<b>4.11.</b>	<b>CULTIVO DE LECHUGA .....</b>	<b>47</b>
4.11.1.	Generalidades .....	47
4.11.2.	Taxonomía de la Lechuga .....	47
4.11.3.	Descripción.....	48
4.11.4.	Fenología del cultivo.....	50
4.11.5.	Ciclo comercial .....	51
4.11.6.	El agua de riego y tolerancia de la lechuga a la salinidad .....	51
4.11.7.	Densidad de plantación.....	52
4.11.8.	Coeficiente de cultivo de la lechuga.....	52
4.11.9.	Agua fácilmente aprovechable para la lechuga.....	53
<b>V.</b>	<b>DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>54</b>
<b>5.1.</b>	<b>LUGAR DEL EXPERIMENTO .....</b>	<b>54</b>
5.1.1.	Ubicación política:.....	54
5.1.2.	Ubicación geográfica: .....	54
5.1.3.	Ubicación hidrográfica: .....	56

5.1.4. Ubicación ecológica:.....	56
<b>5.2. MATERIALES</b> .....	56
5.2.1. Material Genético.....	56
5.2.2. Material de campo.....	57
<b>5.3. METODOLOGÍA</b> .....	58
5.3.1. Procedimiento del funcionamiento del sistema de riego.....	59
5.3.2. El terreno experimental.....	61
5.3.3. Denominación de las parcelas.....	63
5.3.4. Análisis del bulbo húmedo.....	63
5.3.5. Diseño agronómico.....	66
5.3.6. Instalación del sistema de riego.....	73
5.3.7. Las mangueras de goteo.....	79
5.3.8. Determinación del coeficiente de uniformidad CU.....	80
5.3.9. El cultivo.....	83
5.3.10. Instalación de las plantas en el campo definitivo.....	84
5.3.11. Instalación de los sensores de Humedad.....	87
5.3.12. El controlador de riego.....	88
5.3.13. Detalles del riego controlado.....	95
5.3.14. Riegos efectuados.....	99
5.3.15. Manual del controlador de riego.....	105
5.3.16. Rendimiento del cultivo en gr/planta.....	116
<b>VI. RESULTADOS</b> .....	117
<b>6.1. Demanda de agua</b> .....	117
6.1.1. Diferencias porcentuales y discusión.....	118
<b>6.2. Resultados de la medición de la humedad volumétrica</b> .....	120
<b>6.3. Resultados del diámetro del bulbo de humedecimiento</b> .....	120
<b>6.4. Resultados de la determinación del coeficiente de uniformidad</b> .....	120
<b>6.5. Relación entre Rendimiento por planta y Demanda hídrica</b> .....	121
6.5.1. Rendimiento del cultivo por planta.....	121
6.5.2. Gramos de lechuga producida por litro de aguada demandada (g/L).....	122
<b>6.6. Costos de instalación del sistema de riego</b> .....	123
<b>CONCLUSIONES</b> .....	125
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	127
<b>ANEXOS</b> .....	131

## ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1: Vista de un Emisor de goteo. ....	7
Fotografía 2: Cinta de goteo y medición de la zona de humedecimiento.....	15
Fotografía 3: Humedecimiento de 20Hr, gotero cada 20cm .....	16
Fotografía 4: Humedecimiento circular con riego de 20Hr con goteros a cada 40cm.....	16
Fotografía 5: Estación Meteorológica Agrícola Principal de K'ayra (MAP 607).....	54
Fotografía 6: Vista de las tres parcelas en plena preparación del terreno. ....	61
Fotografía 7: Solarización de las parcelas, para controlar la enfermedades del suelo. ....	61
Fotografía 8: Estación Meteorológica Agrícola Principal MAP K'ayra.....	62
Fotografía 9: Perfil del bulbo de humedecimiento con riego sub-superficial. ....	64
Fotografía 10: El humedecimiento con el riego localizado superficial.....	65
Fotografía 11: Medición del diámetro del bulbo de humedecimiento.....	71
Fotografía 12: Especificaciones de la manguera de goteo utilizado. ....	73
Fotografía 13: Fuente de agua y tanque almacenador de agua. ....	74
Fotografía 14. Tanque de almacenamiento de agua de 600L .....	76
Fotografía 15. Sistema de presión constante y bombeo de agua.....	76
Fotografía 16: Cabezal de riego del sistema.....	77
Fotografía 17. Electroválvula de 1". ....	78
Fotografía 18. Ubicación de las electroválvulas para cada parcela. ....	78
Fotografía 19: Forma de conexión de las tres electroválvulas al controlador de riego.....	78
Fotografía 20. Mangueras de goteo antes de ser colocadas en la parcela.....	79
Fotografía 21. Mangueras de goteo dispuestas en la parcela. ....	79
Fotografía 22. Determinación del coeficiente de uniformidad.....	80
Fotografía 23. Las tres parcelas y los contenedores de agua de riego.....	81
Fotografía 24. Instalación de los bidones medidores agua de riego.....	82
Fotografía 25. Bidones utilizados para cada parcela.....	82
Fotografía 26. Pesado del contenido de agua de los bidones. ....	83
Fotografía 27. Sustrato desinfectado y bandeja de propagación.....	84
Fotografía 28. Siembra de semillas de lechuga en las bandejas de propagación .....	84
Fotografía 29: Crecimiento de las plántulas de lechuga en bandeja de propagación. ....	84
Fotografía 30: Plántulas recién trasplantadas cubiertas con malla rashell. ....	85
Fotografía 31: Vista de la parcela con riego sub-superficial (S1).....	85
Fotografía 32: Vista de la parcela con riego por goteo superficial (S2).....	85
Fotografía 33: Parcela S1, vista del riego localizado sub-superficial. ....	86
Fotografía 34: Parcela S2, vista del riego localizado superficial sin mulch .....	86
Fotografía 35: Parcela S3, vista del riego localizado superficial con mulch.....	86
Fotografía 36: Sensores de humedad utilizados. ....	87

Fotografía 37: Profundidad de instalación de los sensores de humedad.....	87
Fotografía 38: Conector de 3.5mm del sensor de humedad.....	88
Fotografía 39: Electroválvulas y sensores conectados al controlador de riego.....	88
Fotografía 40: Tarjeta principal del controlador de riego. ....	89
Fotografía 41: Pantallas LCD.....	90
Fotografía 42: Tarjetas auxiliares que componen el controlador de riego. ....	90
Fotografía 43: Tarjetas electrónicas adicionales utilizadas.....	91
Fotografía 44: Vista frontal del controlador de riego ensamblado.....	93
Fotografía 45: Vista inferior de los conectores del controlador de riego. ....	93
Fotografía 46: Controlador electrónico de riego instalado en el campo. ....	95
Fotografía 47. La memoria microSD .....	95
Fotografía 48. Registro de pesos unitarios de lechuga .....	116

## RESUMEN

El presente trabajo de tesis se realizó en los lisímetros de la estación Meteorológica Agrícola del Centro Agronómico K'ayra de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, con el objetivo de comparar la demanda de agua para el cultivo de lechuga (*Lactuca sativa L.*), utilizando riego por goteo sub-superficial y riego por goteo superficial. Se usó lisímetros para verificar que no haya percolación durante el riego. Para el riego por goteo sub-superficial la manguera se enterró a 8 cm de la superficie del suelo. Para el riego por goteo superficial se experimentó con dos casos, uno con las mangueras en la superficie del terreno de cultivo y el otro también pero al que además se le adecuó mulch plástico de 8 cm de ancho. Para determinar la diferencia en demanda de agua de cada caso, se irrigó con una estrategia de reposición de humedad utilizando sensores electrónicos de humedad volumétrica, electroválvulas y un controlador electrónico ensamblado para la tesis. El controlador de riego toma la información de la humedad del suelo proveniente de los sensores para que luego de cada riego las tres parcelas tengan una misma humedad establecida por el usuario, cada parcela se riega en función de la humedad que se perdió durante el día. Para determinar la cantidad de agua aplicada a cada planta, se pesa el volumen de agua aplicado por un emisor, al que se le adecuó un contenedor de riego a lo largo de toda la campaña. Los resultados de la comparación de la demanda hídrica, indican que el riego localizado sub-superficial, demandó 5.53L de agua, el riego localizado superficial sin mulch plástico demandó 6.67L, y el riego localizado por goteo superficial con mulch plástico demandó 6.22L. El riego por goteo superficial, demandó 20.08% más agua que el riego por goteo sub-superficial.

***El autor.***

## INTRODUCCIÓN

Denominamos riego por goteo superficial al riego por goteo convencional en el que se aplica el agua por sobre la superficie del terreno de cultivo. Una variante de este tipo de riego, es el riego por goteo sub-superficial el cual es mejor debido a que con esta forma de riego la aplicación del agua es por debajo de la superficie del suelo de cultivo a una profundidad que depende de la longitud de las raíces de la especie de cultivo, de este modo es menor la pérdida de agua principalmente por evaporación.

El riego por goteo sub-superficial no es nuevo, tuvo sus inicios en el sur de California en los Estados Unidos de América en los años setenta, los antecedentes en nuestro país no son difundidos, específicamente hablando de nuestra región Cusco, no se tiene experiencia conocida con este tipo de riego localizado sub-superficial. El objetivo de esta tesis de investigación, fue comparar la demanda de agua con dichos tipos de riego localizado, es decir, el riego por goteo superficial tradicional y el riego por goteo sub-superficial y los resultados fueron positivos desde el punto de vista del ahorro en el uso del agua para el cultivo de lechuga.

La automatización del riego fue útil para facilitar el trabajo, y así determinar las diferencias en el consumo de agua en las tres parcelas experimentales y debido a que el cultivo se trabajó en los lisímetros mencionados, se verificó un riego eficiente sin pérdida de agua por percolación, el cultivo instalado fue lechuga (*Lactuca sativa L.*) variedad crespa.

**El Autor.**

## I. PROBLEMA OBJETO DE INVESTIGACIÓN

### 1.1. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA OBJETO DE INVESTIGACIÓN

Cualquier mejora en el uso eficiente del agua en la agricultura representa un ahorro bastante significativo de este recurso hídrico, esto es debido a que del total del agua dulce utilizada del planeta, el 70% se usa en la actividad agrícola, el 20% en la industria y el 10% en usos domésticos, de acuerdo a la conferencia de Siembra y Cosecha de agua en la Sierra del Perú desarrollada por la IEPI – Cusco (Instituto de Estudios Profesionales de Ingeniería), de lo mencionado, se entiende la importancia del Ingeniero Agrónomo para buscar mejores maneras para optimizar el uso del agua en las actividades agrícolas. Además a esto se añade el cambio climático que estamos enfrentando, nos estamos quedando sin agua en nuestros glaciares andinos mientras la población humana va en aumento. Considerando al riego localizado por goteo como una alternativa importante en nuestro afán de optimizar el uso del agua en la actividad agrícola, es precisamente una mejora a este método de riego, el riego localizado sub-superficial cuyos resultados de demanda hídrica tienen que ser comparados con el riego localizado superficial bajo las condiciones climáticas de nuestra zona. Al Centro Agronómico K'ayra, le corresponde la clasificación climática de *Bosque Seco, Montano Bajo sub-Tropical* (bs – MBS). Esto es muy determinante ya que en un clima seco, es mucho más fuerte la pérdida de agua por evaporación debido al bajo porcentaje de humedad relativa del aire. Siendo el problema principal determinar la diferencia en el consumo de agua entre estos tipos de riego localizado planteados.

## **1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

### **1.2.1 Problema General.**

¿Cuál es la diferencia en la demanda de agua mediante la aplicación del sistema del riego por goteo sub-superficial y el riego por goteo superficial en el cultivo de lechuga (*Lactuca sativa L.*), bajo las condiciones del centro agronómico K'ayra?

### **1.2.2 Problemas específicos.**

1. ¿Cómo determinar la humedad volumétrica del suelo, para una medición rápida y confiable?
2. ¿Cuál es el diámetro del bulbo de humedecimiento del riego localizado para el presente trabajo de tesis?
3. ¿Cómo es el coeficiente de uniformidad (CU) para el caudal de los emisores del sistema de riego utilizado en la presente tesis?
4. ¿Cuál es la relación, rendimiento por planta de lechuga y demanda de agua por planta de lechuga, para los casos planteados?

## II. OBJETIVOS Y JUSTIFICACIÓN

### 2.1. OBJETIVO GENERAL

Comparar de la demanda de agua en el cultivo de lechuga (*Lactuca sativa L.*) con riego por goteo superficial y sub-superficial bajo condiciones del centro Agronómico K'ayra, mediante la reposición de humedad del suelo utilizando un controlador electrónico de riego.

#### 2.1.1. Objetivos específicos

1. Medir la humedad volumétrica del suelo de manera instantánea y confiable utilizando sensores de humedad, cuyo principio de funcionamiento sea la medición de la constante dieléctrica del suelo.
2. Determinar el diámetro del bulbo de humedecimiento del suelo de manera experimental.
3. Determinar el Coeficiente de Uniformidad (CU) de caudal de los emisores de la manguera de riego utilizada.
4. Calcular la relación entre el rendimiento del cultivo por planta versus consumo de agua por planta de toda la campaña para los casos planteados.

## 2.2. JUSTIFICACIÓN

El presente trabajo de tesis se realizó porque se desea conocer de manera cuantitativa la diferencia en demanda de agua entre el riego por goteo superficial y el riego por goteo sub-superficial. En situaciones de escasez de agua en el que nos encontramos, esta información será de gran importancia.

Las justificaciones de cada objetivo específico son:

- Se usa sensores de humedad basados en la medición de la constante dieléctrica, porque este tipo de sensores son rápidos y exactos para la determinación de la humedad volumétrica del suelo, esta información permitirá conocer la cantidad de agua necesaria para el cultivo en el momento oportuno.
- La determinación del bulbo de humedecimiento de manera experimental es para garantizar el traslape de los bulbos requisito fundamental en el riego localizado.
- La evaluación del Coeficiente de Uniformidad (CU), es porque se necesita verificar que cada emisor de la manguera de goteo del sistema de riego arroja el mismo caudal de manera que todas las plantas reciban la misma cantidad de agua para un determinado tiempo de riego.
- El cálculo de la relación de rendimiento en gramos de lechuga por planta (g/planta), y la demanda de agua en litros por planta (L/planta), es porque se quiere comparar en cuál de los casos presentados se hace uso más eficiente del agua

### **III. HIPÓTESIS**

#### **3.1. HIPÓTESIS GENERAL**

La diferencia de la demanda hídrica mediante la aplicación del riego por goteo sub-superficial y el riego por goteo superficial, será a favor del riego por goteo sub-superficial, debido a que la aplicación del riego por debajo de la superficie del suelo hará que la pérdida principalmente por evaporación sea menor.

##### **3.1.1. Hipótesis específicas**

1. La humedad volumétrica del suelo puede ser determinada de manera rápida y en tiempo real, utilizando sensores electrónicos de humedad cuyo principio de operación sea la medición de la constante dieléctrica del suelo.
2. El diámetro del bulbo de humedecimiento del riego por goteo es suficiente como para garantizar el traslape de diámetros entre bulbos contiguos.
3. El coeficiente de uniformidad (CU) para el caudal de entrega de los emisores de la manguera de riego utilizada es adecuado de modo que la cantidad de agua aplicada a cada planta es la misma.
4. La relación rendimiento en gramos por planta y cantidad de agua demandada por planta, será más alta para el caso de riego por goteo sub-superficial debido a que ésta forma de riego hace uso más eficiente del agua.

## IV. MARCO TEÓRICO

### 4.1. ANTECEDENTES DEL RIEGO LOCALIZADO

**(Irrigation Direct, 2011).** Después de la segunda Guerra mundial, el uso del plástico se extendió por todo el mundo debido a su reducido costo, lo cual ayudó a generar innovación en la manufactura de sistemas de irrigación por goteo y sus componentes, en especial entró el auge el uso del polietileno (PE), y su uso se extendió a lo largo de los Estados Unidos de América y Europa.

Fotografía 1: Vista de un Emisor de goteo.



*Fuente:* (Irrigation Direct, 2011)

En Israel, Simcha Blass y Yeshayahu Blass fueron innovando en el área de diseño de los emisores o goteros. Ellos lograron crear un método para que el agua fluya a través de extensas y amplios ductos dentro del emisor. Estos “Laberintos” que llegaron a diseñar permitieron una reducción en la velocidad de salida del agua desde el emisor creándose una gota.

En 1959 Kibbutz Harzerim se hizo socio de Blass para formar una compañía que llamaron Netafim para un mayor desarrollo y prueba de este concepto.

Netafim seguidamente patentó el primer emisor de riego por goteo. Este desarrollo permitió que la tecnología del riego por goteo se expanda rápidamente a Australia, Norte América y Sudamérica en los 60s.

**(University of Arizona, 2001).** El riego sub-superficial también denominado riego subterráneo, tiene por nombre técnico SDI (Subsurface Drain Irrigation), es la irrigación de los terrenos de cultivo mediante las mangueras de polietileno enterradas los cuales cuentan con emisores embebidos distanciados regularmente. El riego sub-superficial se empezó a usar en los Estados Unidos, en Arizona desde hace unos 25 años. Sin embargo la adopción de esta técnica de riego fue lenta debido al alto costo inicial de instalación.

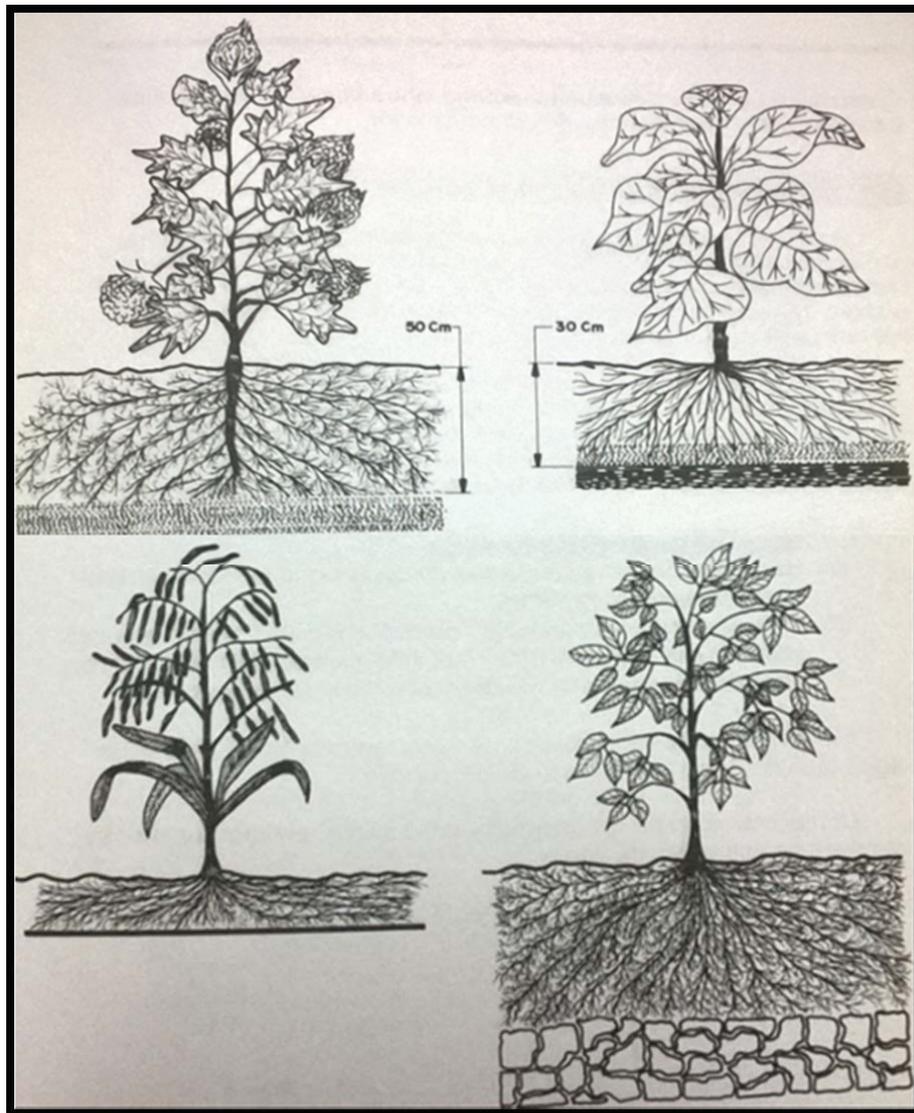
#### **4.2. ASPECTOS IMPORTANTES SOBRE EL RIEGO LOCALIZADO.**

##### **4.2.1. Zona de absorción de agua por las plantas**

**(Berlijn, 2006).** Las plantas absorben el agua por medio de su sistema radicular, por esto la zona de las raíces forma la principal zona de absorción. El desarrollo del sistema radicular tiene, por lo tanto gran influencia en la capacidad de absorción de agua y por consiguiente en el rendimiento del cultivo. Este desarrollo depende mucho de las condiciones del suelo. Por ejemplo: En un suelo con una estratificación arenosa en el subsuelo a una profundidad de 50 cm éste impide el desarrollo del sistema radicular a más de 50 cm debido a la falta de agua en la zona arenosa. En un suelo con nivel de agua freática a una profundidad de 30cm, donde el agua ha desplazado el aire del subsuelo, y por lo tanto, las raíces no se pueden desarrollar a mayor profundidad. En un suelo compacto, el desarrollo del sistema radicular es superficial y lento. En un suelo con una capa rocosa en el subsuelo, ésta capa

impide el desarrollo del sistema radicular. Bajo condiciones normales, las raíces absorbentes de la mayoría de los cultivos se concentran en la capa superior del suelo hasta una profundidad de aproximadamente 40cm, cerca de la base de la planta, cerca del 60% al 70% de las raíces se encuentra en esta zona. En esta parte del suelo, la extracción de agua es mayor.

Figura 1: Zona de mayor concentración de las raíces en diferentes suelos.



Fuente: (Berlijn, 2006)

#### 4.2.2. Absorción de agua durante el ciclo de cultivo

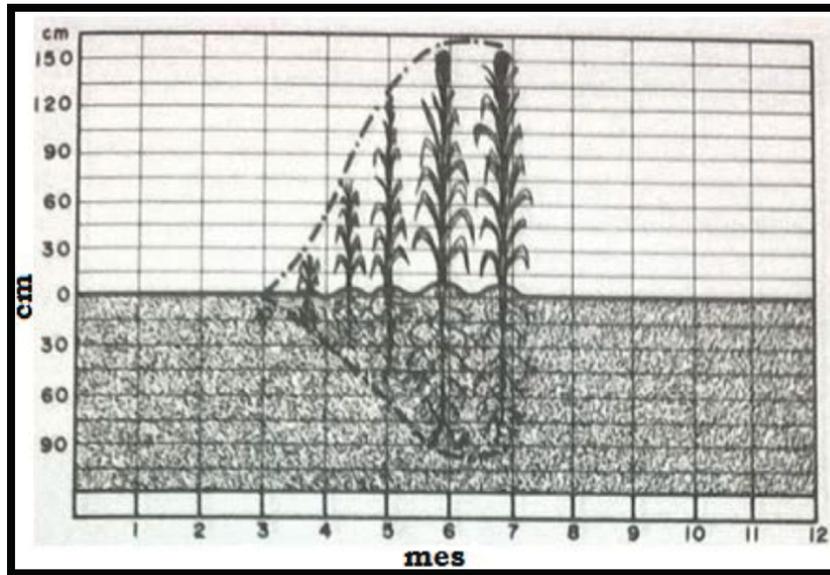
(Berlijn, 2006). Junto con el desarrollo, la planta aumenta su necesidad de agua. Al mismo tiempo, la planta trata de profundizar y extender su sistema radicular para aumentar su capacidad de absorción de agua. Un mayor número de hojas de la planta hace aumentar también la capacidad de transpiración de la misma. Como consecuencia, la demanda de agua aumenta gradualmente desde la germinación de la semilla hasta un máximo en el momento de la floración y formación de los granos. Esta demanda máxima puede seguir por algunas semanas en la mayoría de los cultivos. Una vez que los frutos se han formado, bajan rápidamente los requerimientos de agua. Por ejemplo en el caso del maíz, el ciclo de cultivo y los requerimientos de agua durante este ciclo se desarrollan como sigue: Durante el ciclo de cultivo de 4 a 5 meses, la parte aérea de la planta puede crecer hasta una altura aproximada de 1.60m. Al mismo tiempo, el sistema radicular se desarrolla hasta una profundidad de 95cm. La grafica de las necesidades de agua, sigue un patrón similar al crecimiento de la planta, durante el ciclo, la capacidad de absorción de agua de la planta aumenta gradualmente de 45mm en el primer mes, hasta 220mm aproximadamente al inicio del cuarto mes de crecimiento. La grafica de las necesidades de agua representa la cantidad de agua absorbida durante el ciclo de producción.

Cuadro 1: Variación de la absorción de agua de un cultivo durante su ciclo.

Mes	Agua absorbida (mm)
1°	45
2°	170
3°	220
4°	215
5°	90

Fuente: (Berlijn, 2006)

Figura 2: Cantidad de agua absorbida en diferentes etapas de desarrollo de la planta.



Fuente: (Berlijn, 2006)

#### 4.2.3. Periodo crítico de consumo de agua

(Berlijn, 2006). El agua consumida es igual al agua que la planta aprovecha en la transpiración, el agua de la precipitación interceptada por el follaje y el agua de evaporación. El periodo de consumo máximo de agua se conoce como el periodo crítico del ciclo de cultivo.

#### 4.2.4. Disponibilidad de agua en el suelo

(Palomino, 2007). La cantidad de agua disponible en el suelo a ser utilizada por las plantas, está comprendida entre el rango de humedad a capacidad de campo (CC) y el punto de marchitez permanente (PMP). Si se mantuviera la humedad del suelo a un nivel mayor que la capacidad de campo, existe el peligro de que la falta de aire en el suelo sea un factor limitante para el normal desarrollo de las plantas. Mientras que a niveles de humedad cercanos al punto de marchitez permanente, producirá daños irreversibles al cultivo a nivel fisiológico.

**(Bernardo, 1995).** La frecuencia del riego necesaria para un cultivo, en determinado clima, depende enormemente de la cantidad de agua que puede ser almacenada en el suelo, después de un riego. El agua disponible clásicamente definida como una característica estática representa la cantidad de agua que el suelo podría retener o almacenar entre la capacidad de campo (CC) y el punto de marchitez permanente (PMP). Siendo considerado disponible para las plantas.

**a. Capacidad de Campo (CC).**

**(Palomino, 2007)** Se define como la máxima capacidad de retención de agua de un suelo sin problemas de drenaje y que se alcanza según la textura del suelo entre 12 y 72 horas después de un riego pesado.

(Rodríguez, 2002). Se define como la cantidad de agua que el suelo retiene en contra de la fuerza de gravedad cuando se le deja drenar libremente. Asimismo, la tensión de humedad de un suelo que ha alcanzado la capacidad de campo suele estar comprendida entre 0.1 y 0.3 de atmosfera. En un suelo bien drenado, por lo general se llega a este punto aproximadamente 48 horas después del riego.

**(Pizarro, 1996).** Cuando el suelo está en capacidad de campo, los poros más pequeños retienen el agua contra la fuerza de la gravedad y los poros mayores están en buena parte ocupados por aire. Esta situación es muy favorable para el desarrollo de los cultivos, que encuentran en el suelo, agua abundante retenida con una energía que es fácilmente superada por la de succión de las raíces al mismo tiempo que el suelo está suficientemente aireado para permitir la respiración radicular.

### **b. Punto de marchitez permanente (PMP).**

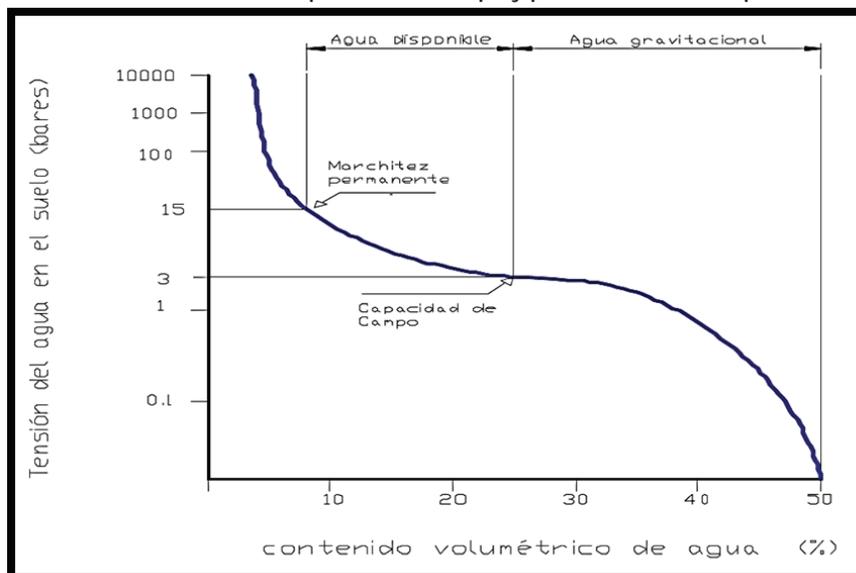
**(Palomino, 2007).** Es el punto en el cual la vegetación manifiesta síntomas de marchitamiento, caída de hojas, escaso desarrollo o fructificación, debido a un flujo retardado de agua del suelo hacia la planta.

**(Rodríguez, 2002).** El punto de marchitez permanente se puede definir como el límite más bajo de almacenamiento de agua del suelo para el crecimiento de las plantas, y está en función de las mismas plantas. El punto de marchitez permanente se encuentra entre 10 y 20 atmosferas; cuando el intervalo en cuanto a fuerza de tensión es grande, la diferencia de humedad es mínima.

**(Pizarro, 1996).** La película de agua que rodea a las partículas se hace cada vez más fina y a medida que el contenido de humedad disminuye, se hace más difícil la absorción de agua por las raíces, hasta que se alcanza un estado de punto marchitez que se caracteriza porque las plantas absorben el agua del suelo con mucha dificultad y experimentan marchitez irreversible.

**(Bernardo, 1995).** El agua disponible de un suelo puede ser fácilmente calculado desde que se conoce el contenido de humedad correspondiente a capacidad del suelo<sup>1</sup> y al punto de marchitez permanente, las propiedades físicas del suelo y las profundidades del suelo que se tendrá en cuenta. En el riego, esta profundidad se considera nada más que la profundidad efectiva del sistema radicular del cultivo.

Gráfico 1. Relación de la capacidad de campo y punto de marchitez permanente



Fuente: Ficha Técnica el agua y su interacción con el suelo. (Beláustegui, 2003)

### 4.3. ASPECTO AGRONÓMICO DEL RIEGO LOCALIZADO

(Palomino, 2007). El aspecto agronómico es muy importante porque tenemos que hacer una localización adecuada para la correcta aplicación del agua, teniendo en cuenta el bulbo húmedo, sistema radicular, régimen de humedad y salinidad.

#### 4.3.1. Localización.

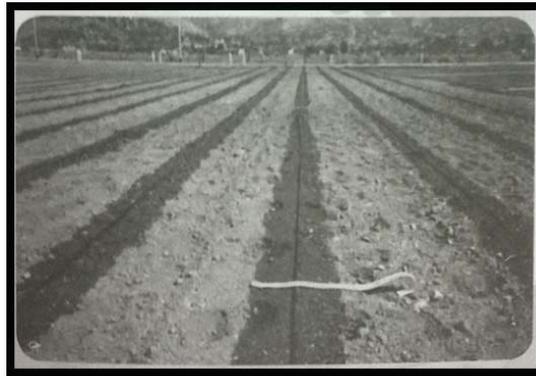
(Palomino, 2007). Se refiere a la aplicación del agua en una zona limitada del suelo. Con lo que se consigue concentrar las raíces y reducir los marcos de plantación hasta que la competencia entre las plantas lo permita, alta frecuencia de riego para mantener el suelo húmedo con baja tensión permanente para que la planta pueda absorber el agua con mayor facilidad. El verdadero ahorro de agua que sube la eficiencia del sistema de riego se da en la conducción en la que las pérdidas desaparecen y en la aplicación del agua

en la parcela donde con un buen manejo disminuye la escorrentía superficial y la percolación profunda resultando la eficiencia de riego mayor al 85%.

#### **4.3.2. El bulbo húmedo**

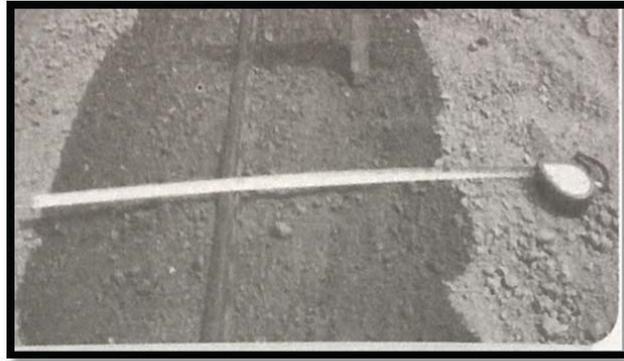
**(Palomino, 2007).** Cuando se inicia el riego, el agua se acumula cerca al gotero en la denominada zona de saturación. A medida que el suelo se humedece, la velocidad de infiltración disminuye. El agua se redistribuye horizontalmente en los poros vecinos de menor humedad debido al potencial mátrico y verticalmente debido al potencial gravimétrico. En esta zona de equilibrio el suelo se encuentra en capacidad de campo presentando las mejores condiciones para el desarrollo de la planta. Alrededor de la zona mencionada, está la zona seca en la que el movimiento del agua se detiene.

Fotografía 2: Cinta de goteo y medición de la zona de humedecimiento.



Fuente: (Palomino, 2007)

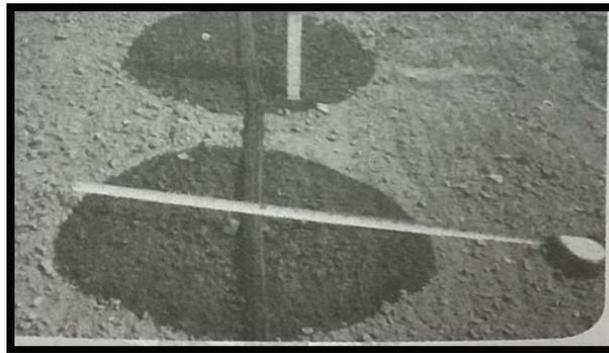
Fotografía 3: Humedecimiento de 20Hr, gotero cada 20cm



Fuente: (Palomino, 2007)

**(Palomino, 2007)**. La forma del bulbo es importante para precisar parámetros de diseño, como distancia entre emisores y número de emisores por planta.

Fotografía 4: Humedecimiento circular con riego de 20Hr con goteros a cada 40cm

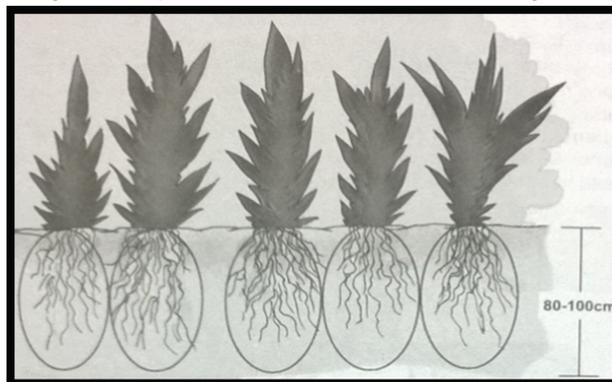


Fuente: Palomino 2007.

#### 4.3.3. Sistema Radicular

**(Palomino, 2007)**. Las raíces necesitan un volumen de suelo muy inferior a la que exploran las plantas en seco o con otros sistemas de riego. Este corresponde como mínimo de un 30 a 40% del área sombreada por el cultivo. Sin embargo algunos cultivos presentan ciertos problemas de anclaje e inestabilidad debido a la poca profundidad del suelo explorado. La absorción de agua y nutrientes ocurren en la zona radicular efectiva que según otros autores es de donde el cultivo extrae del 85 al 90% del volumen total de agua consumido.

Figura 3: Exploración del sistema radicular en general.



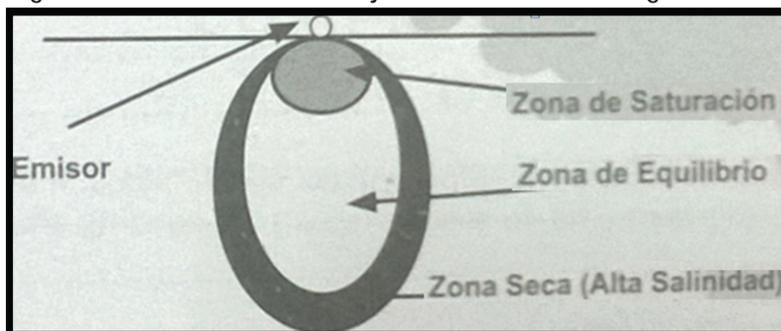
Fuente: (Palomino, 2007)

#### 4.3.4. Goteros por planta

##### a. Distribución de las sales

(Palomino, 2007). Debido a la localización, en riego por goteo, se tiene una distribución particular de las sales en el bulbo húmedo. La mayor concentración de sales está en la zona seca. Las raíces activas se encuentran localizadas en la zona de equilibrio y no llegan a explorar parte importante del suelo. Este doble efecto origina que la planta sea muy sensible y dependiente del sistema de riego.

Figura 4: Avance del Bulbo de mojado con el sistema de riego localizado.



Fuente: (Palomino, 2007)

**b. El emisor y el bulbo húmedo.**

**(Palomino, 2007).** Para mantener alejadas las sales, se recomienda aplicar agua adicional en cada riego, dependiendo de la tolerancia del cultivo a la salinidad, del tipo de suelo y la salinidad del agua de riego o efectuar lavados iniciales del suelo.

**4.4. CARACTERÍSTICAS DEL RIEGO POR GOTEO**

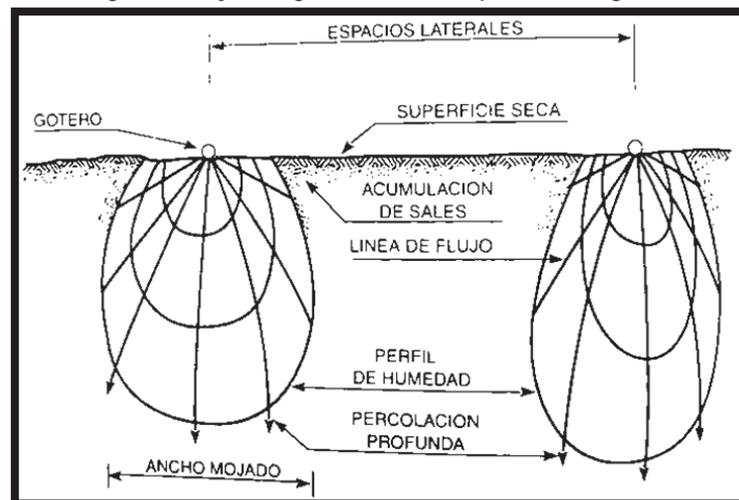
**(Gurovich, 1999).** El riego por goteo es un sistema que proporciona agua filtrada y fertilizantes directamente sobre el suelo al lado de la planta, este sistema elimina la eyección de erosión del agua y permite que el agua liberada a baja presión en el punto de emisión, moje el perfil del suelo en una forma predeterminada. El agua de riego es transportada a través de una extensa red de cañerías o tuberías plásticas hacia cada planta; la estructura que emite el agua fuera de la red hidráulica se denomina emisor o gotero. Los emisores disipan la presión que existe en la red de tuberías por medio de un orificio de diámetro pequeño por medio de un largo camino de recorrido (laberinto); de esta forma disminuye la presión del agua y permite descargar desde el sistema hacia el suelo solamente unos pocos litros por hora por cada emisor. Después de dejar el emisor, el agua es distribuida en el interior del perfil del suelo, de acuerdo con las gradientes de potencial. De esta manera el volumen del suelo que puede ser humedecido por cada punto emisor está limitado por las restricciones del movimiento horizontal y vertical del agua en el perfil del suelo.

**4.4.1. Modelos de mojado del suelo en el riego por goteo.**

**(Gurovich, 1999).** Un sistema típico de riego por goteo, moja solamente una porción de la superficie del suelo en un cultivo plantado en un espaciamiento

grande, como por ejemplo viñas o huertos frutales. Este mojado parcial tiene muchos beneficios y algunos problemas. Las diferencias del potencial del agua del suelo permiten el movimiento del agua desde el emisor a lo largo del perfil del suelo tal como indican las líneas presentadas en la siguiente figura 5 que representan zonas de igual contenido de humedad. En general, las raíces de las plantas tienden a concentrarse donde las condiciones de absorción de agua son las mejores o sea donde se encuentra un adecuado potencial del agua del suelo, con buena aireación y baja salinidad.

Figura 5: Flujo de agua en el suelo a partir de un gotero.



Fuente: (Gurovich, 1999)

#### 4.4.2. Beneficios del riego por goteo.

(Gurovich, 1999). El riego por goteo ofrece beneficios potenciales en el uso eficiente del agua, en la respuesta de las plantas, en el manejo del cultivo y en los rendimientos agronómicos de los cultivos. Estos beneficios no son exclusivos del sistema de riego por goteo, ya que otros sistemas de riego pueden producir beneficios similares; sin embargo, la combinación de ventajas analizadas a continuación son únicas para el riego por goteo.

**a. Uso eficiente del agua de riego**

**(Gurovich, 1999).** En el riego por goteo, las pérdidas directas por evaporación se llevan a un mínimo, no existe movimiento de gotas de agua a través del aire, no hay humedecimiento del follaje de las plantas y no hay evaporación desde la superficie del suelo, fuera de aquella mojada al lado del gotero o emisor; además el riego por goteo limita el crecimiento de las malezas y el consumo no beneficioso del agua. Un sistema de riego localizado bien diseñado y bien manejado no produce pérdidas por escurrimiento superficial. Por otra parte, se puede regar toda un área hasta los bordes, sin que queden zonas mojadas fuera del área plantada o zonas sin mojarse. También puede lograrse un ahorro de agua ya que es posible aplicar cargas de agua muy precisas durante cada riego.

**b. La respuesta de las plantas**

**(Gurovich, 1999).** La respuesta en desarrollo y rendimiento de los cultivos regados por goteo, generalmente es superior a los obtenidos con otros sistemas de riego. Esto ha sido demostrado en muchas instalaciones comerciales agrícolas y en muchos experimentos; esa respuesta es especialmente válida en hortalizas y huertos frutales.

**c. El ambiente de las raíces.**

**(Gurovich, 1999).** Un sistema de riego por goteo bien operado permite una aireación del suelo efectiva, una provisión de suficientes nutrientes y fertilizantes inyectados en el agua y una constante baja tensión del agua del suelo.

**d. Enfermedades y plagas.**

**(Gurovich, 1999).** Al minimizar el humedecimiento de la superficie del suelo y del follaje de la planta, el riego por goteo reduce la posibilidad de ataque de plagas y el desarrollo de enfermedades y problemas fungosos. Además mejora notablemente la eficiencia de las pulverizaciones para el control de enfermedades.

**e. Salinidad.**

**(Gurovich, 1999).** Cuando debe usarse agua salina para el riego, es muy conveniente utilizar sistemas de riego por goteo de alta frecuencia, para mantener continuamente un alto contenido de agua en el suelo; de esta manera la concentración de sales en el agua del suelo puede ser mantenida más baja que aquella que pueda producir daño a las plantas; en cultivos sensibles, puede producirse quemaduras de las hojas al concentrarse las sales sobre la parte aérea del cultivo cuando se utiliza un sistema de riego por aspersión; lo que no ocurre en un sistema de riego por goteo.

**f. Malezas.**

**(Gurovich, 1999).** En zonas áridas los huertos frutales regados por goteo se mantienen prácticamente libres de malezas, ya que éstas no crecen en la superficie del suelo que se mantiene seca entre surco y surco.

**4.4.3. Problemas potenciales del riego por goteo.**

**(Gurovich, 1999).** Está sujeto a tres problemas potenciales importantes; la oclusión de los emisores, los problemas de salinidad alrededor de las plantas y la no uniforme distribución de la humedad en el suelo.

**a. Sensibilidad a la oclusión de los goteros.**

**(Gurovich, 1999).** La oclusión del paso del agua en los emisores es el problema más serio que debe considerarse en el riego por goteo. Las causas más comunes son las partículas de arena y los crecimientos orgánicos; la filtración del agua de riego es la mejor defensa contra estos problemas, pues es bastante difícil y caro detectar y limpiar un emisor tapado. La oclusión paulatina de los goteros puede deberse a una deposición de precipitados de productos químicos o de arcilla y a un incremento en la cantidad de limo en los emisores; se generan así problemas de distribución heterogénea a lo largo de los laterales, lo que puede dañar muy severamente a un cultivo, si los emisores está tapados por un tiempo largo antes que sean descubiertos y reparados.

**b. Condiciones de salinidad del suelo.**

**(Gurovich, 1999).** Todas las aguas de riego contienen algunas sales disueltas; como la planta absorbe solamente el agua, una gran parte de la sal es dejada en el suelo. Lo mismo ocurre en el proceso de la evaporación. Estas sales son generalmente empujadas hacia los bordes de la masa de suelo humedecida durante la estación de crecimiento. Por medio de una aplicación mayor de agua que la cantidad consumida por las plantas, la mayor parte de las sales puede ser empujada o lavada fuera de las zonas de las raíces donde se acumule la sal, siendo las zonas más críticas de acumulación las que se producen alrededor de los bordes de la línea de la superficie mojada. Una lluvia ligera puede mover estas sales acumuladas dentro de la zona de intensa actividad de las raíces y dañar en forma severa a las plantas; para reducir este peligro al mínimo, el sistema de riego debe ser operado durante el periodo lluvioso, con el fin de llevar las sales hacia abajo en el perfil. En aquellas áreas en que la

precipitación sea menor de 250mm al año será necesario hacer aplicaciones suplementarias de agua a través de sistemas de aspersión o superficies, para eliminar los niveles críticos de acumulación de sales; esto es especialmente importante cuando se usa agua de riego salina.

**c. Distribución de la humedad en el suelo.**

**(Gurovich, 1999).** El sistema de riego por goteo normalmente humedece solo una parte del volumen de suelo necesario para el crecimiento de las raíces; por lo tanto, el desarrollo del sistema radical de un cultivo está limitado al área de humedad alrededor de cada emisor. No está definido claramente cómo esto afecta a la planta y a los rendimientos; a pesar de que los cultivos pueden crecer en un perfil de suelo parcialmente mojado, para que exista un mínimo volumen de suelo necesario para un crecimiento óptimo; el tamaño de este volumen mojado es una función de la descarga de los emisores, de la distancia entre los emisores y del tipo de suelo. La distribución de la humedad debe ser una de las principales preocupaciones en el diseño de un sistema de riego por goteo, ya que es muy difícil hacer cambios más adelante.

**4.4.4. El Coeficiente de uniformidad para riego localizado (CU).**

**(Bohorquez & Ruiz, 2011).** El coeficiente de uniformidad muestra el grado de semejanza de la cantidad de agua que se aplica a cada punto de la parcela de riego. Si la uniformidad es baja existirá mayor riesgo de déficit de agua en algunas zonas del cultivo y de percolación profunda en otras.

(Merriam & Keller, 1978). El coeficiente de uniformidad se calcula dividiendo el promedio de la cuarta parte más baja de los caudales medidos entre el promedio del total de los caudales medidos.

$$CU_{25} = \frac{q_{25}}{q_{total}} \times 100\% \quad (\text{Merriam \& Keller, 1978})$$

$q_{med}$  : Caudal medio de todos los recipientes.

$q_{25}$  : Caudal medio de la cuarta parte de recipientes medidos.

Este resultado se lleva al porcentaje y se utiliza la siguiente tabla.

Tabla 1: Calificación del CU para riego localizado.

CUC	Clasificación
>95%	Excelente
85%-95%	Bueno
80%-85%	Aceptable
70%-80%	Pobre
<70%	Inaceptable

Fuente (Merriam & Keller, 1978):

## 4.5. EL AGUA EN EL SUELO.

### 4.5.1. Infiltración

**(Fuentes, 2003).** La infiltración es el proceso de entrada del agua en el suelo, desde la superficie del mismo. Cuando se aplica el agua en toda la superficie del suelo, el flujo se produce en sentido vertical; pero cuando se aplica solo en una parte de la superficie, el flujo se produce en sentidos vertical y horizontal.

La velocidad de infiltración es la cantidad de agua infiltrada por unidad de superficie y de tiempo. Se mide en mm de altura de agua por hora (1 mm de altura de agua equivale a 1 litro por m<sup>2</sup> de superficie.) Cuando el suelo está bastante seco, la velocidad de infiltración es alta, pero disminuye rápidamente a medida que las arcillas se expanden y taponan parcialmente los poros, hasta llegar a una situación en que se estabiliza a lo largo del tiempo. Éste valor constante se conoce como *velocidad de infiltración estabilizada*, que depende

fundamentalmente de la textura del suelo. De un modo general, los valores de la velocidad de infiltración estabilizada o tasa de infiltración son las siguientes.

Tabla 2: Comportamiento de la velocidad de infiltración.

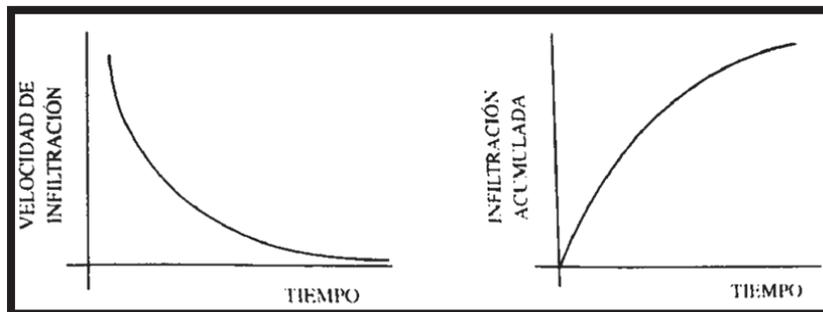
Suelo	Velocidad de infiltración mm/hora
Arcilloso	<5
Franco arcilloso	5-10
Franco	10-20
Franco arenoso	20-30
Arenoso	>30

Fuente: (Fuentes, 2003)

**(Fuentes, 2003).** Cuando la cantidad de agua aportada por la precipitación o el riego sobrepasa la velocidad de infiltración, el exceso de agua forma charcos en la superficie del suelo y si el suelo está en pendiente se produce escorrentía superficial.

**(Fuentes, 2003).** La infiltración acumulada es la cantidad de agua que se infiltra en la unidad de superficie de un suelo a lo largo de un tiempo determinado. Se mide en mm de altura de agua.

Gráfico 2: Curva de velocidad de infiltración e infiltración acumulada



Fuente: (Fuentes, 2003)

**(Cisneros, 2003).** La cantidad de agua que se infiltra en un suelo en una unidad de tiempo, bajo condiciones de campo, es máxima al comenzar la aplicación del agua en el suelo y disminuye conforme aumenta la cantidad de agua que ya ha entrado al suelo.

#### **4.5.2. Problemas de infiltración.**

**(Fuentes, 2003).** Cuando la velocidad de infiltración es baja (<3mm/hora) puede ocurrir que las plantas no dispongan de la cantidad de agua que requieren, aparte de originar otros problemas tales como la formación de costra superficial, falta de aireación, exceso de malas hierbas, podredumbre radical, etc. Al igual que ocurría con la salinidad se produce una reducción en el suministro de agua, aunque provocado por causas diferentes. Con una infiltración deficiente se reduce la cantidad de agua que penetra en la zona radical, mientras que con la salinidad se reduce la disponibilidad de agua que ya está contenida en la zona radical.

La velocidad de infiltración viene determinada por las características físicas y químicas del suelo, y nos estamos refiriendo a los problemas de infiltración causados en la química del suelo y provocados por el agua de riego, en donde intervienen tanto el contenido de sales como la proporción relativa del sodio con respecto al Ca y Mg. Una concentración alta de sales aumenta la velocidad de infiltración, mientras que una concentración baja de sales o una proporción alta de Na con respecto al Ca y Mg disminuye esa velocidad. Los iones de Ca y Mg son favorables para una buena estabilidad estructural del suelo, mientras el ion de Na es desfavorable. Cuando se riega con agua de mala calidad, se acumula el Na en los primeros centímetros del suelo, provocando la dispersión de los agregados en partículas más pequeñas, que obstruyen los poros del suelo. También se produce este efecto con un contenido bajo de Ca. En algunos casos las aguas con bajo contenido de sales disuelven las sales solubles del suelo, incluyendo al Ca, lo que provoca el mismo problema derivado de la escasez del Ca.

#### **4.5.3. Pérdida de agua en el suelo**

**(Fuentes, 2003).** La evapotranspiración comprende las pérdidas de agua ocasionadas por evaporación en el suelo y por transpiración de la planta. En el riego localizado, se moja una parte de la superficie del suelo; por tanto, las pérdidas por evaporación serán menores que en aquellos sistemas de riego donde se moja toda la superficie del suelo. En cambio la transpiración puede ser mayor en el riego localizado, debido a que el suelo seco se calienta más que el suelo húmedo y ello provoca un aumento de temperatura del follaje. En términos generales se puede decir que la evapotranspiración en el riego localizado es análoga a la de otros sistemas. Únicamente hay alguna ventaja a favor del riego localizado, en el caso de cultivo de árboles, cuando éstos aún son pequeños. El verdadero ahorro de agua, con relación a otros sistemas de riego, consiste en que se eliminan las pérdidas en las conducciones y las ocasionadas por la percolación profunda y escorrentía superficial. La transpiración se hace más difícil cuando la humedad del suelo desciende por debajo de ciertos límites. Por este motivo, cuando en los riegos por gravedad y por aspersión el intervalo de riego se prolonga más de lo debido se produce una disminución de la transpiración; pero esta disminución no se puede considerar como un ahorro de agua, puesto que al descender la transpiración disminuye la fotosíntesis y en consecuencia disminuye también la biomasa. En este supuesto, el riego de alta frecuencia supone un mejor aprovechamiento del agua y un mayor rendimiento del cultivo.

#### **4.5.4. Régimen de Humedad**

**(Fuentes, 2003).** Existe un nivel de agua en el suelo, llamado nivel mínimo, por encima del cual la planta se desarrolla satisfactoriamente. Cuando el agua del

suelo desciende por debajo del nivel mínimo, la planta tiene que hacer un esfuerzo mayor para absorber el agua, lo cual se traduce en una menor absorción y en consecuencia una menor transpiración y una disminución del rendimiento. El nivel mínimo depende sobre todo del tipo de cultivo y de su estado de desarrollo. A su vez, el nivel mínimo se caracteriza por una cantidad de agua existente en un suelo determinado pero de ninguna manera depende del tipo de riego utilizado. La respuesta de los cultivos al riego no depende por tanto del método de riego, sino del régimen de humedad del suelo que produce ese método.

#### **4.5.5. La distribución del sistema radical**

**(Fuentes, 2003).** Numerosas experiencias han puesto de manifiesto que las plantas pueden desarrollarse normalmente con un volumen de suelo inferior al que normalmente ocupan. Ello se debe a que el sistema radicular se desarrolla rápidamente en la zona húmeda disponible, por lo que no es raro que en la zona húmeda del riego localizado la concentración de raíces sea 3 a 4 veces mayor que en otros riegos no localizados. En términos generales se puede asegurar que los cultivos se pueden desarrollar normalmente cuando la zona húmeda ocupa el 30 a 40% del área sombreada por el cultivo. Hay mayor seguridad cuando el volumen mojado cubre más de ese porcentaje, pero la instalación de riego resulta más cara. Cabría la posibilidad de disminuir el marco de plantación para aprovechar el volumen de suelo no mojado, pero ello acarrearía problemas de falta de luz en el follaje, aparte de otras consideraciones de orden práctico, como puede ser el espacio necesario para el paso de las máquinas. Los cultivos arbóreos entran en producción muy pronto, debido al gran desarrollo que alcanza el sistema radical, por esto mismo no se debe labrar ya que fácilmente se deteriora el sistema radical.

#### **4.5.6. Escurrimiento**

**(Bernardo, 1995).** La pérdida de agua por escurrimiento es una estimación del porcentaje del total del agua aplicada en el riego que es perdido por escurrimiento, en el final del surco. La presencia del escurrimiento en el final de la parcela es inherente al propio método de riego por surco, excepto en surcos en nivel, los cuales son construidos dentro de bandejas, no habiendo, por tanto, escurrimiento.

#### **4.5.7. Percolación**

**(Villaroel Fuentes, 1981).** La percolación se debe al excesivo tiempo de riego, lo que produce una infiltración de agua más allá de la zona de raíces las mayores pérdidas se dan en suelos arenosos, siendo los factores generales que influyen en el fenómeno: superficie irregular del terreno, suelos delgados sobre un subsuelo de alta permeabilidad, descuidos en la atención del agua en el momento de regar, aplicación excesiva de agua y riegos nocturnos.

**(Cisneros, 2003).** Las pérdidas por lavado son proporcionales a las cantidades de agua que pasan a través del suelo. Los nutrientes de las plantas se pierden en cantidades mayores ningún cultivo en desarrollo absorbe los nutrientes.

**(Bernardo, 1995).** La pérdida de agua por percolación es una estimación del porcentaje del total de agua aplicada en el riego, que es considerada perdida por percolación. Su valor máximo aceptable depende de las condiciones locales del proyecto de riego, en áreas cuyo nivel freático está próximo a la superficie del suelo, las perdidas por percolación no deben pasar del 10%.

#### **4.6. MEDIDA DEL CONTENIDO HÍDRICO DEL SUELO**

**(Bernardo, 1995).** Es de vital importancia la determinación de la humedad del suelo para estudios de movimiento de agua en el suelo, disponibilidad de agua en el suelo, época y cantidad de agua aplicada en el riego y muchos otros problemas.

**(Cisneros, 2003).** Como ya se ha mencionado los diferentes suelos tienen distintas capacidades para la retención del agua. Cuando en el suelo existe abundante agua y no se drena, las raíces de las plantas pueden morir por la carencia del oxígeno. Por otra parte, si poca agua está presente el crecimiento de las plantas se detiene y finalmente sobreviene el marchitamiento. El contenido de humedad del suelo está muy ligado al tipo de textura del suelo y al contenido de materia orgánica: en suelos con alto contenido de arcilla y de materia orgánica aumenta la retención total del agua; aunque también origina grandes cantidades de agua estrechamente retenidas por adhesión.

##### **4.6.1. Medida directa del contenido hídrico del suelo.**

**(Martin de Santa Olalla & De Juan Valero, 1993).** El método más sencillo y simple de determinación del contenido hídrico de un suelo consiste en la toma de muestras del suelo al cual queremos determinar su humedad. El contenido de agua se suele expresar en forma gravimétrica o volumétrica, de acuerdo a las especificaciones. La cantidad de agua presente, se determina por desecación de la muestra en una estufa a 105°C hasta lograr un peso constante y la diferencia de las pesadas antes y después, nos ayuda a determinar el contenido de humedad en el suelo.

**(Bernardo, 1995).** Es un método directo, bastante preciso y consiste en retirar una muestra de suelo, de un área a una profundidad que se desea saber su humedad, colocándolas en un recipiente con registro y trasladarlas al laboratorio. Luego de pesar el recipiente con la muestra ( $M_1$ ) colocamos el recipiente abierto en un estufa a  $105^\circ - 110^\circ\text{C}$ . Después de 24 horas, como mínimo, se retira la muestra de la estufa, pesándolo nuevamente ( $M_2$ ). Siendo ( $M_3$ ) el peso recipiente, el porcentaje de humedad en peso será dada por la ecuación.

$$\% \text{ humedad} = \frac{M_1 - M_2}{M_2 - M_3} \times 100 \quad (1)$$

$$\% \text{ humedad} = \frac{\text{Peso del agua evaporada en la estufa}}{\text{Peso de la muestra seca a } 105^\circ \text{ C}} \times 100 \quad (2)$$

#### **4.6.2. Mediciones indirectas del contenido hídrico del suelo.**

##### **4.6.2.1. Dispersión de neutrones**

**(Martin de Santa Olalla & De Juan Valero, 1993).** Se basa en la dispersión de neutrones y al aparato que mide la humedad se le denomina sonda de neutrones. Este método está basado en el hecho comprobado de que los átomos de hidrógeno (H) son capaces de desacelerar y dispersar los neutrones rápidos que chocan con ellos, estando la medida de la velocidad de los neutrones lentos, directamente relacionada con los átomos de H existentes alrededor de la fuente emisora de neutrones rápidos y del detector para una velocidad de emisión constante.

#### **4.6.2.2. Métodos basados en la medida de la constante dieléctrica del suelo.**

**(Martín de Santa Olalla & De Juan Valero, 1993).** Un dieléctrico es una sustancia o material no conductora de electricidad, pero que cuando se sitúa entre dos superficies no permite un flujo neto de carga eléctrica, sino un desplazamiento de la carga. La constante dieléctrica del suelo es una medida de la capacidad de transmitir ondas o pulsos electromagnéticos y está influenciada por el volumen de agua, ya que el agua a las frecuencias de radio, tiene un valor dieléctrico de 80 (adimensional), mucho mayor que la de los minerales de suelo que están con valores entre 4 y 5, la materia orgánica 4 y el aire que es 1. Se considera básicamente dos categorías de sensores: Los sensores TDR (Time Domain Reflectometry) y los sensores FDR (Frequency Domain Reflectometry), también denominados de capacitancia.

#### **4.6.2.3. Tensiómetro.**

**(Martín de Santa Olalla, López Fuster, & Calera Belmonte, 2005).** Consiste en un tubo impermeable, el que en el extremo inferior dispone de una cápsula cerámica permeable y en la parte superior suele disponer de un pequeño receptáculo por donde se añade el agua y de un indicador de vacío o vacuómetro donde se realizan las lecturas de presión. El tensiómetro permite que la solución del suelo se equilibre con el agua que contiene en su interior a través de la cápsula de cerámica permeable en contacto con el suelo. La disminución del contenido de agua en el suelo provoca una cierta tensión que extrae el agua del tensiómetro. El indicador de vacío indica el potencial de la condición de equilibrio. Se requiere conocer la curva característica de humedad para estimar el contenido de agua en el suelo.

#### **4.6.2.4. Resistencia Eléctrica.**

**(Martín de Santa Olalla, López Fuster, & Calera Belmonte, 2005).** El sensor consiste en dos electrodos inmensos en un bloque de material poroso que se entierra en el suelo. Se basa en el equilibrio que se establece entre la resistencia eléctrica de un material poroso y el potencial del agua en el suelo.

#### **4.6.2.5. Disipación de calor.**

**(Martín de Santa Olalla, López Fuster, & Calera Belmonte, 2005).** El sensor consiste en un par de agujas de unos 30mm de largo separados 6mm entre ellas. Una de las agujas contiene una resistencia que produce un pulso de calor al calentar una resistencia lineal, mientras que la otra contiene termopares que miden el cambio de temperatura en función del tiempo.

### **4.7. ESTUDIO DEL SUELO**

#### **4.7.1. Textura del suelo**

**(Salamanca, 1984).** Está relacionada con el tamaño de las partículas minerales del suelo y se refiere al tamaño y proporción en que se encuentran la arena, limo y arcilla. Estas partículas se han denominado así según su tamaño. Aun cuando las propiedades físicas de un suelo están íntimamente relacionadas con su textura, no existe relación directa entre una y la otra. Mientras más pequeño es el diámetro de las partículas del suelo, mayor es la superficie de éstas por unidad de volumen y más pequeño el tamaño de los poros. Lo primero crea mayor resistencia al flujo de agua y lo segundo mayor capacidad para retenerla. Esto explica la poca permeabilidad y el alto poder de retención de los suelos arcillosos

en contraste con la alta permeabilidad y escasa retentividad de los suelos arenosos. Los suelos de textura fina permiten retardar relativamente el movimiento del agua y el aire. Los microporos dominantes se mantienen a menudo llenos de agua la aireación en el subsuelo es inadecuada para un satisfactorio desarrollo de las raíces y una deseable actividad microbiana.

**(Gavande, 1972).** La textura del suelo está relacionada con el tamaño de las partículas minerales. Específicamente se refiere a la proporción relativa de los tamaños de varios grupos de partículas de un suelo. Esta propiedad ayuda a determinar no solo la facilidad de abastecimiento de nutrientes, sino también de agua y aire, tan importante para la vida de las plantas.

Tabla 3: Clasificación de los suelos según su textura

<b>Textura</b>	<b>Arena (%)</b>	<b>Limo (%)</b>	<b>Arcilla (%)</b>	<b>Clase textural</b>
Textura gruesa	86-100	0-14	0-10	Arenoso
	70-86	0-30	0-15	Arenoso franco
Textura moderada mente gruesa	50-70	0-50	0-20	Franco arenoso
Textura media	23-52	28-50	0-27	Franco
	20-50	74-88	0-27	Franco limoso
	0-20	88-100	0-12	Limoso
Textura moderada mente fina	20-45	15-52	27-40	Franco arcilloso
	45-80	0-28	20-35	Franco arenoso arcilloso
	0-20	40-73	27-40	Franco limoso arcilloso
Textura fina	45-65	0-20	35-55	Arcilloso arenoso
	0-20	40-60	40-60	Arcilloso limoso
	0-45	0-40	40-100	Arcilloso

Fuente: (Cisneros, 2003)

#### 4.7.2. Estructura del suelo

**(Salamanca, 1984).** Hace referencia a la forma como se unen o agregan las partículas primarias en el suelo. La estructura tiene un efecto pronunciado sobre ciertas propiedades del suelo como la erosión, la porosidad, la permeabilidad, la

infiltración y la capacidad de retención de agua. Los suelos de textura fina, si son manejados en forma adecuada, adoptan una estructura granular, en la que cada grano funciona como una partícula independiente, favoreciéndose así las propiedades físicas indicadas y la labranza de dichos suelos. No solo se debe tener en cuenta las operaciones de laboreo de acuerdo con el estado de humedad del suelo, sino que se debe estimular la formación de gránulos, agregándole suficiente cantidad de materia orgánica. Otra práctica recomendada es la siembra de leguminosas, ya que con sus raíces mejoran las condiciones físicas de los suelos de textura pesada.

#### **4.7.3. Aireación del suelo**

**(Fuentes, 2003).** En riego por gravedad y por aspersion se suelen utilizar dosis grandes de riego. El suelo queda saturado de agua después del riego, por lo que pueden presentarse problemas de aireación en suelo muy arcillosos. En el riego localizado el suelo solo se satura en un volumen muy reducido próximo al emisor, con lo cual no se presentan dichos problemas de aireación.

#### **4.7.4. Densidad aparente**

**(Cisneros, 2003).** La densidad aparente de un suelo, se define como el cociente que resulta de dividir el peso de suelo seco entre el volumen total, incluyendo los poros. Usualmente se expresa en  $\text{gr}/\text{cm}^3$ .

$$Da = \frac{Pss}{Vt} \quad (3)$$

De donde:

Da	:	Densidad aparente ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )
Pss	:	Peso del suelo seco (gr)
Vt	:	Volumen total ( $\text{cm}^3$ )

Los valores de la densidad aparente varían en función de las propiedades de los suelos fundamentalmente con la textura y el contenido de materia orgánica. Sin embargo como valores medios se tiene los siguientes:

Tabla 4: Valores promedios de la densidad aparente

Arenoso	1.4 – 1.6 gr/cm <sup>3</sup>
Franco	1.3 – 1.4 gr/cm <sup>3</sup>
Arcilloso	1.1– 1.3 gr/cm <sup>3</sup>
Suelos orgánicos	0.7 – 1.1 gr/cm <sup>3</sup>

Fuente: (Cisneros, 2003)

**(Rodríguez, 2002).** La densidad aparente del suelo es la relación entre el peso del suelo seco en la estufa y el volumen ocupado por ese peso del suelo. El peso corresponde a la fase sólida (fracción mineral más la fracción orgánica), ya que el agua se eliminó en el secado en la estufa a 105°C. En el volumen total de suelo queda incluido el volumen de la parte sólida más el volumen de los poros del suelo.

#### **4.8. EVAPOTRANSPIRACION**

##### **4.8.1. Evaporación**

**(FAO, 2006).** La evaporación es el proceso por el cual el agua líquida se convierte en vapor de agua y se retira de la superficie evaporante. El agua se evapora de una variedad de superficies, tales como lagos, ríos, caminos, suelos y la vegetación mojada. Para cambiar el estado de las moléculas del agua de líquido a vapor se requiere energía. La radiación solar directa y en menor grado, la temperatura ambiente del aire, proporciona esta energía.

**(Saldarriaga, 1994).** Los dos factores principales que influyen en la evaporación desde una superficie abierta de agua son el suministro de energía para proveer el calor latente de vaporización y la habilidad para transportar el vapor fuera de la superficie de evaporación. La radiación solar es la principal fuente de energía calórica.

**(Santos, 2010).** El proceso de evaporación, por el cual el agua cambia de fase líquida a fase de vapor y pasa desde la superficie evaporante a la atmósfera, requiere grandes cantidades de energía, que es proporcionada fundamentalmente por la radiación solar y en menor medida, por el aire que circunda la superficie evaporante.

#### **4.8.2. Transpiración.**

**(FAO, 2006).** La transpiración consiste en la vaporización del agua líquida contenida en los tejidos de la planta y su posterior remoción hacia la atmósfera. Los cultivos pierden agua predominantemente a través de los estomas. Estos son pequeñas aberturas en la hoja de la planta a través de las cuales atraviesan los gases y el vapor de agua de la planta hacia la atmósfera. El agua, junto con algunos nutrientes, es absorbida por las raíces y transportada a través de la planta. La vaporización ocurre dentro de la hoja, en los espacios intercelulares, y el intercambio del vapor con la atmósfera es controlado por la abertura estomática. Casi toda el agua absorbida del suelo se pierde por transpiración y solamente una pequeña fracción se convierte en parte de los tejidos vegetales. La transpiración, igual que la evaporación directa, depende del aporte de energía, del gradiente de presión del vapor y de la velocidad del viento. Por lo tanto, la radiación, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y el viento también

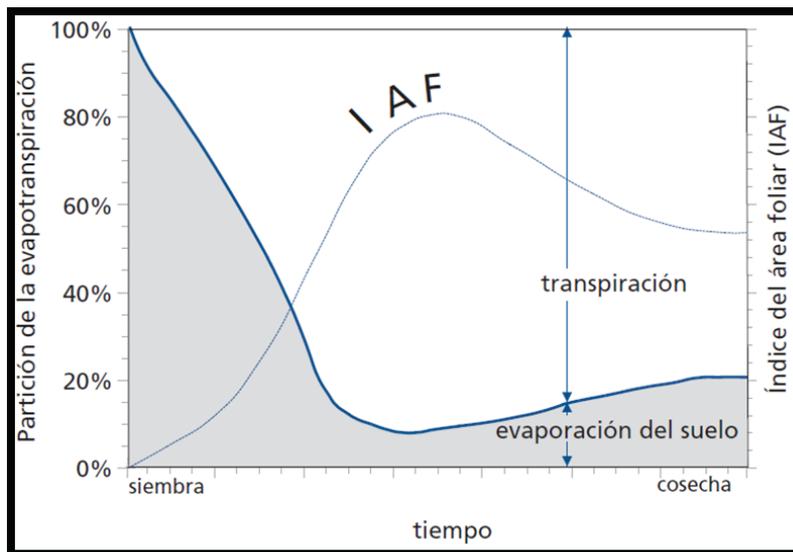
deben ser considerados en su determinación. El contenido de agua del suelo y la capacidad del suelo de conducir el agua a las raíces también determinan la tasa de transpiración, así como la salinidad del suelo y del agua de riego. La tasa de transpiración también es influenciada por las características del cultivo, el medio donde se produce y las prácticas de cultivo. Diversas clases de plantas pueden tener diversas tasas de transpiración. Por otra parte, no solamente el tipo de cultivo, sino también su estado de desarrollo, el medio donde se produce y su manejo, deben ser considerados al evaluar la transpiración.

#### **4.8.3. Evapotranspiración.**

**(FAO, 2006).** Se conoce como evapotranspiración (ET) la combinación de dos procesos separados por los que el agua se pierde a través de la superficie del suelo por evaporación y por otra parte mediante transpiración del cultivo. La evaporación y la transpiración ocurren simultáneamente y no hay una manera sencilla de distinguir entre estos dos procesos. Aparte de la disponibilidad de agua en los horizontes superficiales, la evaporación de un suelo cultivado es determinada principalmente por la fracción de radiación solar que llega a la superficie del suelo. Esta fracción disminuye a lo largo del ciclo del cultivo a medida que el dosel del cultivo proyecta más y más sombra sobre el suelo. En las primeras etapas del cultivo, el agua se pierde principalmente por evaporación directa del suelo, pero con el desarrollo del cultivo y finalmente cuando este cubre totalmente el suelo, la transpiración se convierte en el proceso principal. En la siguiente figura 6 se presenta la evapotranspiración dividida en sus dos componentes (evaporación y transpiración) en relación con el área foliar por unidad de superficie de suelo debajo de él. En el momento de la siembra, casi el

100% de la ET ocurre en forma de evaporación, mientras que cuando la cobertura vegetal es completa, más del de 90% de la ET ocurre como transpiración. La evapotranspiración se expresa normalmente en milímetros (mm) por unidad de tiempo. Esta unidad expresa la cantidad de agua perdida de una superficie cultivada en unidades de altura de agua. La unidad de tiempo puede ser una hora, día, 10 días, mes o incluso un completo período de cultivo o un año.

Figura 6: La variación de la evapotranspiración durante el periodo de crecimiento de un cultivo anual.



Fuente: (FAO, 2006)

#### 4.8.4. Evapotranspiración de referencia ETo.

(FAO, 2006). Es un parámetro relacionado con el clima que expresa el poder evaporante de la atmósfera. La tasa de evapotranspiración de una superficie de referencia, que ocurre sin restricciones de agua, se conoce como evapotranspiración del cultivo de referencia, y se denomina ETo. La superficie de referencia corresponde a un cultivo hipotético de pasto con características específicas. No se recomienda el uso de otras denominaciones como ET potencial, debido a las ambigüedades que se encuentran en su definición. El concepto de evapotranspiración de referencia se introdujo para estudiar la

*demanda de evapotranspiración de la atmósfera*, independientemente del tipo y desarrollo del cultivo, y de las prácticas de manejo. Debido a que hay una abundante disponibilidad de agua en la superficie de evapotranspiración de referencia, los factores del suelo no tienen ningún efecto sobre la evapotranspiración. El relacionar la evapotranspiración a una superficie específica permite contar con una referencia a la cual se puede relacionar la evapotranspiración de otras superficies. Además, se elimina la necesidad de definir un nivel de evapotranspiración para cada cultivo y periodo de crecimiento. Se pueden comparar valores medidos o estimados de  $ET_o$  en diferentes localidades o en diferentes épocas del año, debido a que se hace referencia a evapotranspiración bajo la misma superficie de referencia.

#### **4.8.5. Evapotranspiración de cultivo $ET_c$ .**

**(FAO, 2006).** La evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar se denomina  $ET_c$ , y se refiere a la evapotranspiración de cualquier cultivo cuando se encuentra exento de enfermedades, con buena fertilización y que se desarrolla en parcelas amplias, bajo óptimas condiciones de suelo y agua y que alcanza la máxima producción de acuerdo a las condiciones climáticas reinantes. La evapotranspiración del cultivo puede ser calculada a partir de datos climáticos e integrando directamente los factores de la resistencia del cultivo, el albedo y la resistencia del aire en el enfoque de Penman-Monteith.

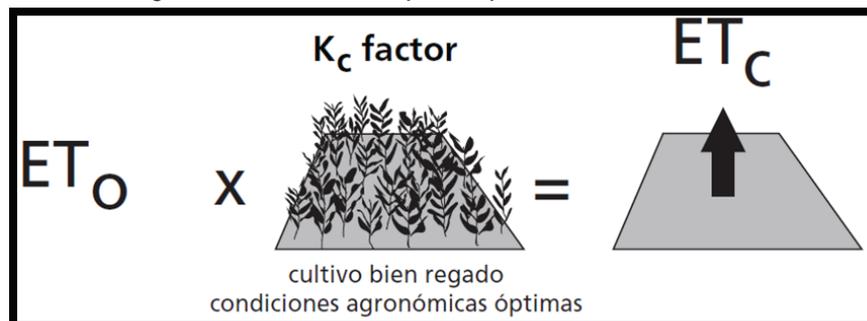
Debido a que todavía existe una considerable falta de información para los diferentes cultivos, el método de Penman-Monteith se utiliza solo para la estimación de la tasa de evapotranspiración del cultivo estándar de referencia ( $ET_o$ ). La relación  $ET_c/ET_o$  que puede ser determinada experimentalmente para

diferentes cultivos y es conocida como Coeficiente del Cultivo ( $K_c$ ), y se utiliza para relacionar  $ET_c$  a  $ET_o$  de manera que  $ET_c = K_c \times ET_o$ .

#### 4.8.6. Determinación de la Evapotranspiración.

(FAO, 2006). La evapotranspiración no es simple de medir. Para determinarla experimentalmente se requieren aparatos específicos y mediciones precisas de varios parámetros físicos o el balance del agua del suelo en lisímetros. Los métodos experimentales de campo, son en general caros, exigiendo precisión en las mediciones, y pueden ser completamente realizados y analizados apropiadamente sólo por personal de investigación suficientemente preparado. A pesar de que estos procedimientos no son apropiados para mediciones de rutina, siguen siendo importantes para la evaluación de las estimaciones de evapotranspiración obtenidas con otros métodos indirectos.

Figura 7: Fórmula del Evapotranspiración de Cultivo. ( $ET_c$ ).



Fuente: (FAO, 2006)

## **4.9. GENERALIDADES DE AUTOMATIZACIÓN**

### **4.9.1. Automática.**

**(García Fontes, 2013).** Ciencia que trata de sustituir en un proceso el operador humano por dispositivos mecánicos o electrónicos.

### **4.9.2. Automatización.**

**(Perez Porto, 2008).** Se denomina automatización al acto y la consecuencia de automatizar, es decir, que ciertas tareas se desarrollen por sí solas y sin la participación directa de un individuo. El concepto suele utilizarse en el ámbito de la industria con referencia al sistema que permite que una máquina desarrolle ciertos procesos o realice tareas sin intervención del ser humano. La automatización permite ahorrar tiempo y muchas veces, dinero.

### **4.9.3. Concepto de control.**

**(Canto, 2016).** Manipulación de las magnitudes de un sistema denominado *planta* a través de otro llamado *sistema de control*, sin la intervención del operador directamente sobre los elementos de salida o resultados.

### **4.9.4. Concepto de sensores electrónicos.**

**(Martinez Reyes, 2012).** Un sensor es un dispositivo electrónico capaz de detectar magnitudes físicas o químicas llamadas variables de instrumentación y transformarlas en variables eléctricas. Las variables de instrumentación pueden ser por ejemplo: Temperatura, distancia, aceleración, inclinación, presión, fuerza, *humedad*, pH, etc.

#### 4.9.5. Concepto de actuadores.

(Martinez Reyes, 2012). Un actuador es un dispositivo capaz de transformar energía eléctrica, hidráulica o de cualquier otro tipo en la activación de un proceso con la finalidad de generar un efecto sobre el proceso automatizado, éste recibe la orden de un controlador y en función a ella genera la orden para activar un elemento final de control como por ejemplo una válvula.

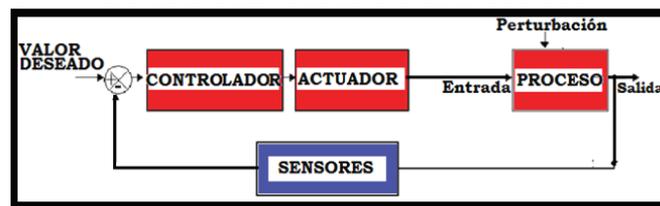
#### 4.9.6. Elementos básicos de un sistema de control.

(Canto, 2016). Un sistema de control, requiere de sensores que puedan medir las variables que se quiere controlar, también requiere de elementos actuadores que valiendo la redundancia, actúan sobre el proceso, para disminuir la diferencia entre lo que se desea y lo que se tiene.

#### 4.9.7. Sistema de control en lazo cerrado.

(Ogata, 2010). Los sistemas de control realimentados se denominan también sistemas de control en lazo cerrado. En la práctica, los términos control realimentado y control en lazo cerrado se usan indistintamente. En un sistema de control en lazo cerrado, se alimenta al controlador la señal de error de actuación, que es la diferencia entre la señal de entrada y la señal de realimentación con el fin de reducir el error y llevar la salida del sistema a un valor deseado. El término control en lazo cerrado siempre implica el uso de una acción de control realimentado para reducir el error del sistema.

Gráfico 3: Sistema de control de lazo cerrado.



Fuente: Elaboración propia

#### 4.10. SENSORES FDR, PARA LA MEDICIÓN DE AGUA EN EL SUELO.

(Martin de Santa Olalla & De Juan Valero, 1993). Denominados también sensores de capacitancia, la técnica basada en la capacitancia, determina la permisividad dieléctrica de un medio, al medir el tiempo de carga de un condensador que utiliza el medio como un dieléctrico. En el suelo, que actúa como dieléctrico, la permisividad eléctrica está directamente relacionada con el contenido de agua. Se hace pasar a través de los electrodos (generalmente dos) una señal eléctrica de alta frecuencia. Los productos FDR son actualmente la principal área de expansión en lo que se refiere a equipos de medida de agua en el suelo.

##### 4.10.1. La teoría dieléctrica.

(Rogrigo Villar, 2014). En un medio heterogéneo como es el suelo, la fracción de volumen de cualquier componente está relacionada con la permitividad dieléctrica, cambiando el volumen de cualquier componente cambia el dieléctrico. A causa de su elevada permitividad dieléctrica los cambios en el volumen de agua tienen un efecto muy significativo sobre el total de la permitividad dieléctrica.

Cuadro 2: Permitividad dieléctrica ( $\epsilon$ ) de diversos componentes.

Material	$\epsilon$
Aire	1
Suelos Minerales	3 - 7
Materia Orgánica	2 - 5
Hielo	5
Agua	80

Fuente: (Campbell, Decagon Brasil, 2014)

#### 4.10.2. El modelo dieléctrico combinado.

(Rogrigo Villar, 2014). La permitividad total de un suelo está formada por la permitividad individual de cada componente individual. Las fracciones de volumen  $V_x$  son factores que constituyen la unidad.

$$\epsilon_i^b = \epsilon_m^b V_m + \epsilon_a^b V_a + \epsilon_w^b \theta + \epsilon_{om}^b V_{om} + \epsilon_i^b V_i$$

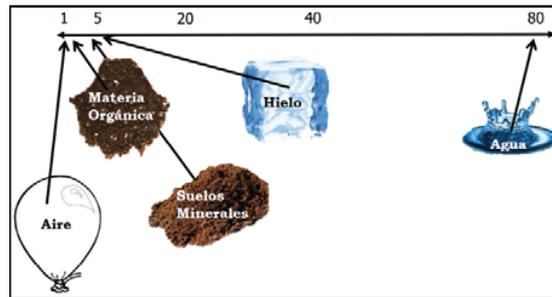
Donde:

- $\epsilon$  :Es la permitividad dieléctrica
- $b$  :Es una constante cuyo valor es próximo a 0.5. Y los subíndices.
- $m, a, om, i$  y  $w$  :Representan suelo mineral, aire, materia orgánica, hielo y agua.
- $V$  : Fracción de volumen que constituye la unidad.

#### 4.10.3. El agua y las propiedades de otros materiales dieléctricos.

(Campbell, 2014). Para el caso de la aplicación en sensores de humedad de suelo, se tiene el parámetro denominado constante dieléctrica, el cual es un valor que indica la capacidad de los materiales de almacenar carga eléctrica.

Figura 8: Constante dieléctrica de diferentes elementos en el suelo



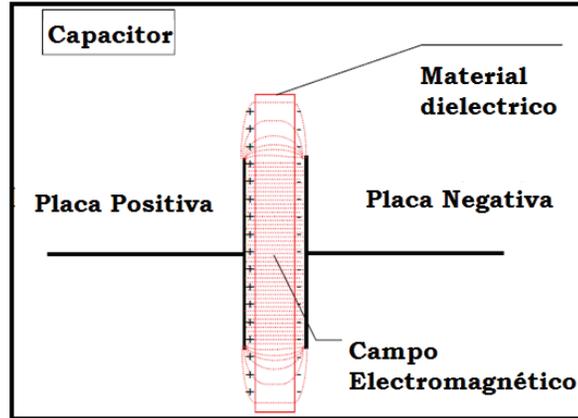
Fuente: (Campbell, Decagon Brasil, 2014)

#### 4.10.4. La capacitancia.

(Marciel Garcia, 2012). La capacitancia es la propiedad que tienen los cuerpos para mantener una carga eléctrica..

(Campbell, 2014). El valor de la capacitancia es proporcional a la permitividad dieléctrica total, también se le denomina capacitor, es representado en la siguiente figura 9.

Figura 9: Representación de un capacitor o condensador

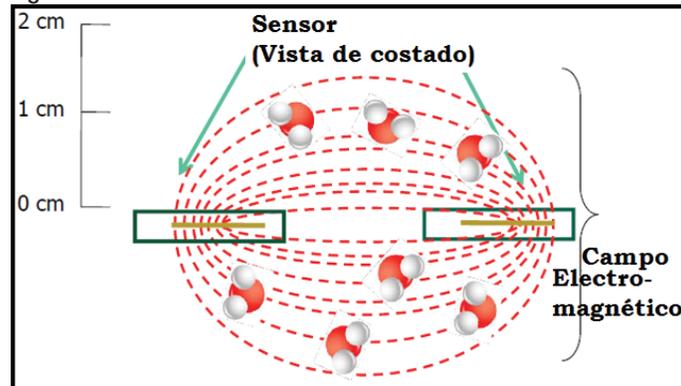


Fuente: (Campbell, 2014)

#### 4.10.5. Funcionamiento del sensor FDR.

(Campbell, 2014). En el suelo típicamente lo que cambia es el aire y el agua, el resto de componentes se mantiene constante.

Figura 10: Funcionamiento del sensor electrónico de humedad.



Fuente: (Campbell, Decagon Brasil, 2014)

La carga del capacitor está relacionada directamente al dieléctrico. Lo que hacen los sensores FDR es convertir el valor de la carga del capacitor a una salida de voltios. Dicha salida en voltios del sensor es calibrado al correspondiente valor de contenido de agua del suelo.

## 4.11. CULTIVO DE LECHUGA

### 4.11.1. Generalidades

(Halsuet & Miñambres, 2005). Por su diversidad de formas la lechuga es la hortaliza más abundante, disponible durante todo el año según las variedades. Todas las lechugas proceden de la especie silvestre *Lactuca serriola* que crece espontáneamente en prados, pendientes rocosas y terrenos baldíos desde Asia y norte de África hasta el norte de Europa. Los romanos ya la cultivaban, así como en el antiguo Egipto, hacia el 4500 a.C. Sin embargo, se piensa que, originariamente, la planta fue cultivada por sus semillas oleaginosas más que por sus hojas. Parece que fueron los romanos quienes introdujeron la lechuga en Gran Bretaña. A la lechuga se le reconocen virtudes soporíferas desde la antigüedad, puesto que HIPOCRATES (456 a.C.) ya la menciona. El amargor está asociado a la producción de látex, savia lechosa que presentan todas las variedades cultivadas cuando se suben a flor. El látex amargo fue con frecuencia utilizado como sustituto del opio o el láudano.

### 4.11.2. Taxonomía de la Lechuga

(Barrios, 2004). La lechuga tiene la siguiente descripción taxonómica:

Reino: Plantae  
División: Magnoliophyta  
Clase: Magnoliopsida  
Subclase: Asteridae  
Orden: Asterales  
Familia: Asteraceae  
Género: Lactuca  
Especie: *Lactuca sativa* L.

Fuente: (Barrios, 2004)

#### **4.11.3. Descripción**

**(Halsuet & Miñambres, 2005).** La lechuga es una planta anual que se consume en estado joven antes de subirse a flor. Desarrolla una roseta de hojas enteras, susceptibles según tipo de formar cogollo. Después del acogollado, el tallo experimenta un alargamiento y el ápice evoluciona en escapo floral.

##### **a. Semillas.**

**(Halsuet & Miñambres, 2005).** El número de semillas se estima entre 600 y 1.000 semillas por gramo. Se conservan de 3 a 4 años a 10°C y a una humedad relativa del 30%, mostrándose muy sensible a los excesos de humedad. Después de recolectada la semilla presenta incapacidad para germinar (latencia) durante 2 a 6 meses. En principio, para romper esta latencia, una puesta en frío con una higrometría elevada durante algunos días suele ser suficiente. Se considera que las mejores semillas son las de 2 años y que sube tanto más rápidamente a flor cuanto más rápida haya sido su germinación.

##### **b. Sistema radicular.**

**(Halsuet & Miñambres, 2005).** Su sistema radicular es pivotante (25-30 cm), espeso y cabelludo. La planta presenta látex blanco y según cultivares, antocianinas (pigmentos que dan coloración roja, violeta o azul a flores, frutos y raíces) cuya síntesis se ve favorecida por condiciones desfavorables de cultivo, principalmente por bajas temperaturas.

**c. Variedades.**

**(Halsuet & Miñambres, 2005).** Se distinguen 6 grupos de lechugas, a los cuales pueden corresponder aptitudes de cultivo particulares:

**a.- Lechugas que no forman cogollo:**

- 1.- ***Lechuga esparraguera o celtuce:*** La planta forma un tallo carnoso del que, después de cocido y pelado, se consume la médula.
- 2.- ***Lechuga de cortar:*** Desarrolla una roseta muy tupida de hojas libres. En otro tiempo se recolectaban las hojas sueltas, a manojos, para lo que se sembraba denso y se daban pases sucesivos; en la actualidad se trasplanta y es vendida como planta entera. Presenta poco peso y mal aspecto para su venta (marchitamiento por evaporación).

**b.- Lechugas que forman cogollo:**

**(Halsuet & Miñambres, 2005).** Las variedades que forman cogollo son:

- 1.- ***Lechuga romana:*** Dan un cogollo oblongo, voluminoso pero menos prieto que los siguientes tipos. Hay variedades de invierno y de verano.
- 2.- ***Lechuga batavia o rizada:*** Cogollo con tendencia a achatarse (hojas más anchas que largas), puede ser voluminoso.
- 3.- ***Lechuga lisa o mantecosa:*** Cogollo globoso de hojas más o menos blandas. Son las más extendidas al ser las que mejor se adaptan al clima oceánico.
- 4.- ***Lechuga crasa:*** Hojas espesas que forman un pequeño cogollo poco recubierto. Muy buen comportamiento al calor y resistente a la subida a flor.

#### 4.11.4. Fenología del cultivo

(Lopez Lopez, Magaña Lira, & Vasquez Romero, 2014). La fenología es:

Emergencia de hojas:	02 semanas.
Desarrollo de hojas:	Dura 12 semanas, es decir finaliza a las 14 semanas de su instalación definitiva en campo.
Elongación floral:	Dura 5 semanas, desde la semana 15 hasta la semana 19 después de su trasplante.
Floración:	Se da entre las semanas 20 y 21, después del trasplante es decir dura 02 semanas.
Maduración de semilla:	Dura 03 semanas, desde la semana 22 a la semana 24.
Semilla madura:	07 semanas, desde la semana 25 hasta la semana 31.

(FAO, 2006). La publicación de la serie de Riego y Drenaje de la FAO N° 24 incluye duraciones generales para las cuatro etapas de crecimiento de distintos cultivos, así como la duración total de la temporada de crecimiento de cada cultivo, para distintos tipos de clima y diferentes localidades. Esta información ha sido ampliada con otras fuentes y se sintetiza en el cuadro 3. En algunos casos, el momento de aparición de la vegetación así como el momento de la cobertura completa pueden ser estimados usando regresiones basadas en la acumulación de grados de temperatura o a través de modelos más sofisticados de crecimiento vegetal. Estos modelos deberán ser verificados y validados para cada área o para la variedad específica del cultivo, usando observaciones locales.

Cuadro 3: Duración de las etapas de crecimiento del cultivo para distintos periodos de siembra y regiones climáticas (días)

Cultivo	Inic.	Des.	Med	Final	Total	Fecha de Siembra	Región climática
Lechuga	25	35	30	10	100	Oct/Nov.	Región Árida

Fuente: (FAO, 2006)

#### **4.11.5. Ciclo comercial**

**(Rincón, 2005).** El ciclo de cultivo comercial de la lechuga comprende las tres primeras fases, la primera de ellas en semillero y las dos siguientes de cultivo en campo, finalizando con la recolección del cogollo de la planta que comprende la parte comercial. La duración del ciclo de cultivo y cada fase de crecimiento dependen fundamentalmente de las condiciones climáticas, siendo la temperatura media el factor del que depende directamente la duración del ciclo de cultivo, el desarrollo vegetativo y la producción, siendo determinantes el régimen de temperaturas y la radiación solar en las distintas fases, variando en ciclos de otoño e invierno entre 90 y 140 días después del trasplante, reduciéndose en plantaciones de primavera y verano entre 60 y 70 días.

#### **4.11.6. El agua de riego y tolerancia de la lechuga a la salinidad**

**(Rincón, 2005).** La calidad del agua de riego varía según cantidad y tipo de sales disueltas. El problema que presenta el agua salina es doble, el primero de carácter osmótico producido por la cantidad de sales que el agua lleva en disolución y el segundo de efecto tóxico producido por la presencia en exceso de iones tóxicos, principalmente cloruros (Cl<sup>-</sup>) y sodio (Na<sup>+</sup>). El efecto osmótico del agua de riego se minimiza aportando un exceso de agua en el riego para lixiviar (desplazar fuera de la zona radicular de la planta) las sales acumuladas en el intervalo entre riegos. El efecto tóxico no es posible eliminarlo salvo con tratamientos desalinizantes del agua o evitando regar con aguas que lleven en disolución más de 5 meq/L de cloruros y 5 meq/l de sodio. La lechuga es un cultivo considerado generalmente como moderadamente tolerante a la salinidad existiendo diferencias entre variedades. Como consecuencia de los resultados obtenidos, se puede indicar que la tolerancia de la lechuga a la

salinidad varía principalmente en función de dos factores: Fenología del cultivo. En las primeras fases vegetativas la planta de lechuga es más sensible a la salinidad del agua de riego que en fases vegetativas avanzadas. Climatología durante el ciclo de cultivo. En ciclos con temperaturas más frías, el cultivo presenta menor sensibilidad a la salinidad que en ciclos con temperaturas más cálidas.

#### **4.11.7. Densidad de plantación.**

**(Rincón, 2005).** La plantación comercial de la lechuga se realiza generalmente en líneas pareadas situadas en platabandas (bancas), con una densidad de plantación entre 60 000 y 70 000 plantas por ha. La distancia media entre líneas es de 1 m, 30-35 cm entre las filas de cada línea y 30-35 cm. de separación entre las plantas de cada fila. La colocación de las plantas en las dos filas de cada línea se realiza al tresbolillo.

#### **4.11.8. Coeficiente de cultivo de la lechuga.**

**(FAO, 2006).** Durante el período de crecimiento del cultivo, la variación del coeficiente del cultivo  $K_c$  expresa los cambios en la vegetación y en el grado de cobertura del suelo. Esta variación del coeficiente  $K_c$  a lo largo del crecimiento del cultivo está representada por la curva del coeficiente del cultivo. Para describir y construir la curva del coeficiente del cultivo se necesitan solamente tres valores de  $K_c$ , los correspondientes a la etapa inicial ( $K_c$  ini), la etapa de mediados de temporada ( $K_c$  med) y la etapa final ( $K_c$  fin). Que para el caso de la lechuga estos valores son:  $K_c$  inicial = 0.7,  $K_c$  medio= 1.00 y  $K_c$  final = 0.95.

#### 4.11.9. Agua fácilmente aprovechable para la lechuga.

(FAO, 2006). A pesar de que en teoría existe agua disponible hasta alcanzar el punto de marchitez permanente, la cantidad de agua extraída por el cultivo se reducirá significativamente antes de alcanzar el punto de marchitez permanente. Cuando el suelo contiene suficiente humedad, el mismo es capaz de suministrar el agua con suficiente velocidad para satisfacer la demanda atmosférica al cultivo, por lo que la extracción del agua será igual a la ETc. A medida que disminuya la cantidad de humedad en el suelo, el agua será retenida más fuertemente a la matriz del suelo y será más difícil de extraer. Cuando el contenido de humedad del suelo esté por debajo de cierto valor umbral, el agua del suelo no podrá ser transportada hacia las raíces con la velocidad suficiente para satisfacer la demanda transpiratoria y el cultivo comenzará a sufrir de estrés. La fracción de ADT que un cultivo puede extraer de la zona radicular sin experimentar estrés hídrico es denominada agua fácilmente aprovechable en el suelo:

Cuadro 4: Rangos de profundidad máxima efectiva de las raíces (Zr) y fracción de agotamiento de la humedad en el suelo (p) para condiciones sin estrés hídrico.

<b>Cultivo</b>	<b>Profundidad radicular máxima (m)</b>	<b>Fracción de agotamiento (p)</b>
Lechuga	0.3 - 0.5	1.00

Fuente: (FAO, 2006)

## V. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

### 5.1. LUGAR DEL EXPERIMENTO

El presente trabajo de tesis se realizó en las instalaciones de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, en la Facultad de Ciencias Agrarias del Centro Agronómico de K'ayra (Kilómetro 8.5 de la carretera principal Cusco – Arequipa), terreno ubicado dentro de las instalaciones de la estación meteorológica, específicamente en los tres lisímetros de la estación meteorológica, los cuales miden 4m<sup>2</sup> cada uno, con forma cuadrangular de 2m de lado.

Fotografía 5: Estación Meteorológica Agrícola Principal de K'ayra (MAP 607).



*Fuente: Elaboración propia.*

#### 5.1.1. Ubicación política:

El Centro agronómico de K'ayra se encuentra en el distrito de San Jerónimo, provincia Cusco, Región Cusco - Perú.

#### 5.1.2. Ubicación geográfica:

Altitud : 3219 m.  
Latitud : 13° 33' 31" SUR  
Longitud : 71° 52' 29" OESTE.

Figura 11: Croquis de ubicación en el departamento del Cusco.



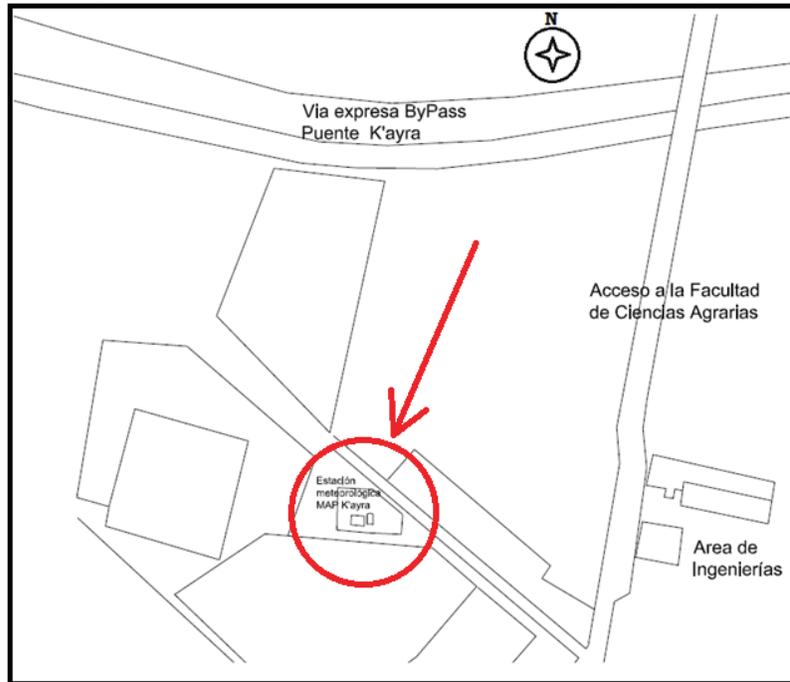
*Fuente: Elaboración propia*

Figura 12: Croquis de ubicación en la provincia del Cusco



Fuente: Perutoptours.com

Figura 13: Croquis de ubicación de la estación meteorológica agrícola principal K'ayra



Fuente: Elaboración propia

### 5.1.3. Ubicación hidrográfica:

Cuenca : Vilcanota  
Sub cuenca : Huatanay  
Microcuenca : Huanacaure

### 5.1.4. Ubicación ecológica:

El Centro Agronómico de K'ayra, según el diagrama bioclimático de Holdridge para la clasificación climática le corresponde:

*Bosque seco, montano bajo subtropical (bs – MBS).*

## 5.2. MATERIALES.

### 5.2.1. Material Genético.

- 100 g de Lechuga, (*Lactuca sativa L.*). Variedad Crespa.

### **5.2.2. Material de campo.**

#### **a.- Insumos:**

- Fertilizantes: Abono foliar, marca comercial Aminovigor
- Fungicida agrícola: Pentacloro Farmex
- Semillas de lechuga (*Lactuca sativa L.*), Var. Crespa.
- Tierra desinfectada, para almacigo.
- Suministro eléctrico, para la electrobomba y sistema electrónico.

#### **b.- Componentes del sistema de riego.**

- 01 Controlador de riego.
- 01 Tanque de 600L, para almacenar agua.
- 01 Válvula check de 1".
- 50 metros de manguera de 1"
- 30 metros de manguera 3/4".
- 01 Electrobomba centrífuga de 1/2HP.
- 01 Tanque pulmón de agua.
- 01 Presostato.
- 01 Manómetro de 0 a 6Bar.
- 01 Filtro de anillos de 1".
- 01 Regulador de Presión a 1 Bar de 1" de diámetro.
- 03 Electro-válvulas de 1".
- 100 m de manguera de goteo con emisores a 40cm de 1.1Litros por hora.
- 03 Sensores electrónicos dieléctricos de humedad de suelo.
- Recipientes para evaluar el coeficiente de uniformidad del sistema de riego localizado.
- 03 Válvulas manuales de apertura y cierre del agua.

### **c.- Herramientas:**

- Alicate de punta.
- Alicate de corte.
- Saca-bocado para polietileno de 16mm.
- Cinta métrica.
- Estacas.
- Pico, pala, rastrillo.

### **5.3. METODOLOGÍA**

La metodología utilizada en la presente tesis de investigación se basa en un diseño ***Explicativo, Cuasi-Experimental***, ya que se evalúa la influencia de tres modalidades de aplicación riego por goteo (sub-superficial, superficial con mulch de plástico y superficial sin mulch) en la demanda hídrica del cultivo de Lechuga. Y es cuasi-experimental porque no hay aleatorización en la asignación de los casos experimentados. A las parcelas se les dio los nombres de S1, S2 y S3, como se explica a continuación:

S1: Parcela con riego localizado sub-superficial

S2: Parcela con riego localizado superficial, sin mulch

S3: Parcela con riego localizado superficial, con mulch.

### **5.3.1. Procedimiento del funcionamiento del sistema de riego.**

1. El agua para riego se bombea desde un tanque de almacenamiento y para lograr la presión de requerida del sistema de riego que es de 1 Bar (1 Atm) de presión se utiliza una electrobomba de 0.37 Kilowatts (1/2HP) de potencia.
2. Para hacer las comparaciones, se instalan en tres parcelas, la primera parcela con el riego por goteo sub-superficial (S1) a 8 centímetros de profundidad, la segunda parcela con riego por goteo superficial (S2) y la tercera parcela se instala con riego por goteo superficial con cubierta o mulch de plástico azul de ocho centímetros de ancho (S3).
3. El uso de los lisímetros es fundamental para evitar la percolación, ya que drenan agua en caso de riego en exceso.
4. El diseño agronómico, se realiza con el fin de regar dentro de los rangos de humedad apropiados, es decir, entre los valores de humedad correspondientes al factor de agotamiento para la lechuga y la capacidad de campo del suelo.
5. El contenido de agua en el suelo se mide utilizando sensores electrónicos de humedad del tipo FDR (Reflectometría en el Dominio de la Frecuencia). Estos sensores permiten medir la humedad volumétrica en el rango de 0% a 57%, para lo cual la salida del sensor va desde 1.0 Voltio a 2.5Voltios respectivamente.

6. La ecuación que convierte los voltios que arroja el sensor a humedad volumétrica es la siguiente:

$$\Theta = 0.494 \times \text{Voltios} - 0.554. \text{ (Decagon, 2015)}$$

**Θ:** Humedad volumétrica del suelo multiplicar por 100% para llevar porcentaje.

**Voltios:** Voltaje que arroja el sensor como salida en voltios.

7. El controlador electrónico de riego toma las señales de los sensores las, éstos valores los compara con la humedad deseada definida por el usuario, en caso de que la humedad en las parcelas sea inferior a la humedad deseada a través de electroválvulas riega las parcelas hasta lograr la humedad deseada que es la misma humedad para las tres parcelas. Es decir, el principio de riego del controlador de riego consiste en reponer la humedad del cultivo que se pierde durante el día en cada una de las tres parcelas.
8. El agua irrigada durante toda la campaña se almacena en recipientes de agua conectados a un emisor final para cada parcela. Al ser el coeficiente de uniformidad de los emisores de la manguera de goteo mayor al 97%, es decir, uniforme, significa que cada planta recibe la misma cantidad de agua.
9. Al final de la campaña se pesa el total del agua de riego (que están en los recipientes) y se determina el consumo de agua de cada parcela.
10. Finalmente, se realizan las comparaciones correspondientes.

### 5.3.2. El terreno experimental.

Con la finalidad de que las tres parcelas contengan el mismo tipo de sustrato o tierra, se realizó el mezclado de tierra de las tres parcelas entre sí y luego se volvieron a distribuir en las parcelas.

Fotografía 6: Vista de las tres parcelas en plena preparación del terreno.



*Fuente: Elaboración propia.*

Seguidamente para contrarrestar las enfermedades ocasionadas por hongos del suelo se procedió a solarizar (someter a insolación con plástico negro) las tres parcelas.

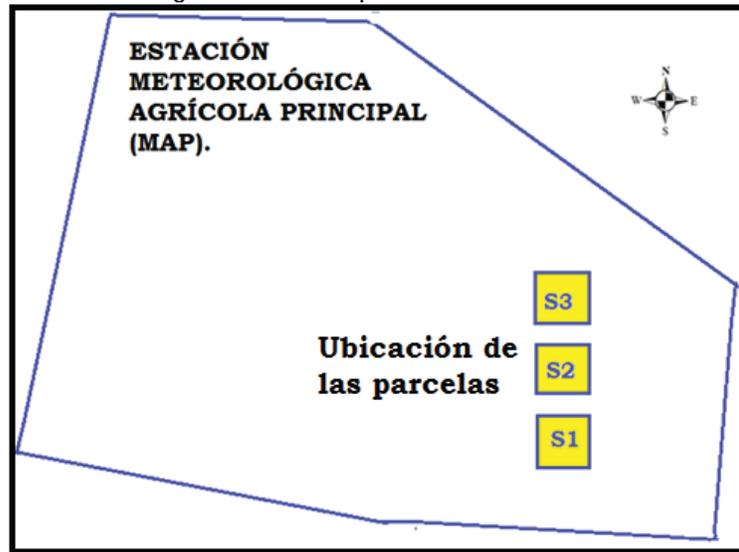
Fotografía 7: Solarización de las parcelas, para controlar la enfermedades del suelo.



*Fuente: Elaboración propia.*

### 5.3.2.1. Croquis de ubicación de las parcelas.

Figura 14: Vista de planta de los lisímetros



Fuente: Elaboración propia

### 5.3.2.2. Estación Meteorológica Agrícola Principal (MAP)

Fotografía 8: Estación Meteorológica Agrícola Principal MAP K'ayra.



Fuente: Elaboración propia

### 5.3.2.3. De las características del suelo.

Los análisis de fertilidad, caracterización y otros se realizaron en el laboratorio de suelos de la facultad de Ciencias Agrarias.

#### ANALISIS DE FERTILIDAD

N°	CLAVE	mmhos/cm C.E.	pH	% M. ORG.	% N. TOTAL	ppm P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	ppm K <sub>2</sub> O
01	Parcela.	0.40	7.50	2.93	0.15	53.5	28

#### ANALISIS DE CARACTERIZACIÓN

N°	CLAVE	meq/100 C.I.C.	% ARENA.	% LIMO	% ARCILLA	CLASE TEXTURAL
01	Parcela.	18.54	45	52	3	FRANCO-LIMOSO

#### OTROS ANALISIS

N°	CLAVE	%	%	g/cc	g/cc	%	%
01	Parcela.	H.E. 29.19	C.C. 27.86	Da 1.47	Dr 2.53	PMP 6.86	POROSIDAD 41.89

*Fuente: Laboratorio de suelos de la Facultad de Ciencias Agrarias.*

### 5.3.3. Denominación de las parcelas.

Para comparar demandas hídricas de las tres parcelas con los tipos de riego por goteo planteado, la primera con riego por goteo sub-superficial (S1), la segunda con riego por goteo superficial convencional (S2) y la tercera que es también riego por goteo superficial pero con la diferencia de que se utiliza un mulch de plástico (S3).

### 5.3.4. Análisis del bulbo húmedo.

Se regó durante 25 minutos, y se tomó medidas del bulbo de humedecimiento, con un distanciamiento entre emisores de 40cm y los resultados obtenidos se muestran a continuación para cada caso.

**5.3.4.1. Para el riego localizado sub-superficial (S1).**

Para el riego con la manguera por debajo de 15 centímetros de la superficie del suelo.

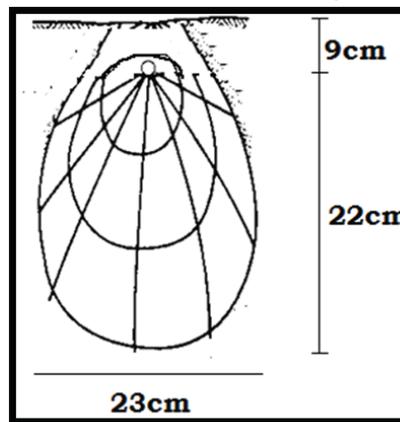
Tiempo de riego:	25min
Tipo de instalación de la manguera:	sub-superficial
Profundidad alcanzada del bulbo en cm:	22cm
Humedecimiento por capilaridad alcanzada:	09cm
Traslape de bulbos húmedos:	NO
Separación entre emisores:	40cm.

Fotografía 9: Perfil del bulbo de humedecimiento con riego sub-superficial.



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 4: Gráfica del bulbo de humedecimiento para riego sub-superficial.



Fuente: Elaboración propia.

**5.3.4.2. Para el riego Localizado superficial**

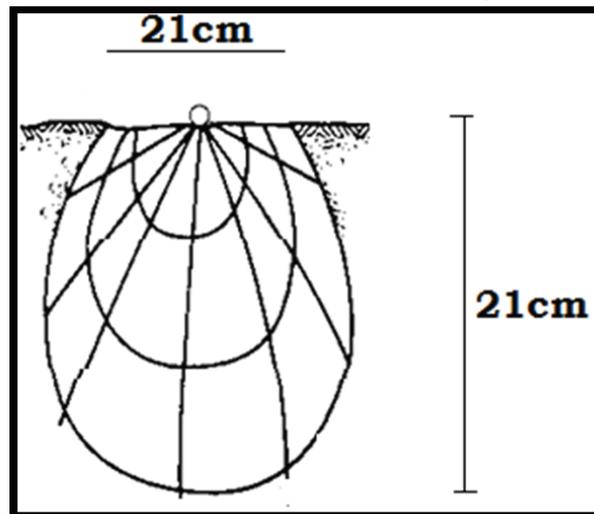
Tiempo de riego:	25min
Tipo de instalación de la manguera:	sub-superficial
Profundidad alcanzada en cm:	21cm
Traslape de bulbos húmedos:	NO
Separación entre emisores:	40cm

Fotografía 10: El humedecimiento con el riego localizado superficial.



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 5: Gráfica del bulbo de humedecimiento para riego localizado superficial.



Fuente: Elaboración propia

### 5.3.5. Diseño agronómico.

Cuadro 5: Parámetros del cultivo y del suelo.

<b>Datos del Cultivo:</b> <b><i>Lactuca sativa L.</i></b>  dl =0.30m dp =0.20m fs =30%	<b>Datos del suelo:</b> CCps =27.86% PMPps =6.86 % Da =1.47 g/cm <sup>3</sup>	<b>De donde:</b> $\theta_{cc}\% = CCps \times Da = 40.95\%$ $\theta_{cc}=0.40$  $\theta_{pmp}\% = PMPps \times Da = 10.08\%$ $\theta_{pmp}=0.10$
---	--	---

Fuente: Elaboración propia

#### Donde:

- dl : Distancia entre líneas o laterales de riego.  
dp : Distancia entre plantas.  
CCps : Capacidad de campo del suelo en base a peso seco.  
PMPps : Punto de marchitez permanente en base a peso seco.  
Da : Densidad aparente del terreno de cultivo.

#### Además:

- zr : Profundidad de la zona radicular en cm.  
fs : Factor de secamiento característico del cultivo.  
Pea : Peso específico aparente del suelo o Densidad aparente (g/cm<sup>3</sup>).  
 $\theta\%$  : Humedad volumétrica instantánea, es decir en tiempo real (%).  
 $\theta_{fs}\%$  : Porcentaje de humedad volumétrica, correspondiente al fs (%).  
 $\theta_{cc}\%$  : Porcentaje de humedad volumétrica correspondiente al CC (%).  
 $\theta_{pmp}\%$  : Porcentaje de humedad volumétrica correspondiente a PMP (%).  
Voltios : Es la señal en voltios que arroja el sensor y que corresponde a la humedad volumétrica del suelo (V).  
Voltios<sub>cc</sub> : Es la señal en voltios que arroja el sensor y que corresponde a la humedad volumétrica del suelo a capacidad de campo.  
Voltios<sub>pmp</sub> : Es la señal en voltios que arroja el sensor y que corresponde a la humedad volumétrica del suelo cuando está a punto de marchitez permanente.  
qe : Caudal del emisor de la manguera de goteo (L/h).

## 1. El sensor de humedad volumétrica ( $\theta$ )

El sensor de humedad volumétrica, es del tipo FDR (Frequency Domain Reflectometry), es decir, de reflectometría en el dominio de la frecuencia, es un sensor que como se indica en el marco teórico, basa su funcionamiento en la medición de la constante dieléctrica del medio en este caso del suelo para medir el contenido de agua del suelo.

El rango de medición de humedad volumétrica es de 0% a 57%.

La señal de salida que entrega el sensor es en voltios (V), en donde:

Para  $\theta=0\%$   $V=1.0$  voltios.

Para  $\theta=57\%$   $V=2.5$  voltios.

Siendo la ecuación del sensor proporcionada por el fabricante:

$$\Theta = 0.494 \times \text{Voltios} - 0.554 \quad (4)$$

(Decagon, 2015)

$\Theta$ : Es la humedad volumétrica del suelo (en tiempo real).

Voltios: Es el voltaje que arroja el sensor correspondiente a la humedad volumétrica del suelo.

## 2. El agua disponible AD% [% ó mm/10cm]

Su valor en % coincide con los mm de agua por cada 10cm de suelo, entonces es el máximo nivel de humedad disponible por la planta con que se debe regar el suelo. El factor 100 convierte el % a fracción decimal.

$$AD\% = \theta_{cc}\% - \theta_{pmp}\% \quad (5)$$

(Puppo, 2015)

$$AD\% = 40.95\% - 10.08\%$$

$$AD\% = 30.87\%$$

### 3. Lámina de agua disponible a la profundidad de la zona radicular efectiva LDzr [mm/zr]

Su valor viene determinado por el agua disponible del suelo a la profundidad de la zona radicular efectiva que en este caso es 20cm (Lechuga).

$$LDzr = AD\% \cdot \frac{zr}{10} \quad (6)$$

(Puppo, 2015)

LDzr=61.74mm@20cm (Lámina de agua a 20 cm de profundidad de suelo)

### 4. Lámina fácilmente aprovechable LAzr [mm/zr]:

Conocido también como lámina neta de riego, es la cantidad de agua que un suelo debe de tener como mínimo para que el cultivo en este caso lechuga, no realice esfuerzos en la absorción del agua de modo que su rendimiento no se vea afectado. Es decir, depende del factor de secamiento (fs), conocido también como porcentaje de agotamiento, y su valor es propio de cada especie de cultivo en el caso de la lechuga y según la FAO es 30% ó 0.3.

$$LAzr = LDzr \cdot fs \quad (7)$$

(Puppo, 2015)

$$LAzr=61.74 \times 0.30$$

$$LAzr=18.522\text{mm/zr}$$

Este valor indica que a partir de la humedad volumétrica a Capacidad de Campo, como máximo se puede descender el contenido de agua en 18.522mm, para que el cultivo no sufra ningún tipo de estrés hídrico que pueda afectar su rendimiento.

### 5. Humedad volumétrica correspondiente al factor de secamiento $\theta_{fs}\%$ [%, mm/10cm]:

Es el porcentaje de humedad volumétrica del suelo a partir del cual se tiene que irrigar ya que por debajo de dicho valor de humedad en el terreno, la planta comienza a entrar en estrés hídrico lo cual afecta su rendimiento.

$$\theta_{fs}\% = \theta_{cc}\% - fs \times AD\% \quad (8)$$

(Puppo, 2015)

$$\theta_{fs} = 40.95\% - 0.3 \times 30.87\%$$

$$\theta_{fs}\% = 31.69\%$$

$$\theta_{fs} = 0.31$$

### 6. Equivalente numérico de $\theta_{fs}\%$ en el controlador de riego $S_{fs}$ .

Es el número entero equivalente al porcentaje de humedad volumétrica a factor de secamiento, es decir 31.69% es lo mismo que 361 dentro del controlador.

La ecuación del sensor:

$$\theta_{fs} = 0.494 * \text{Voltios} - 0.554 \quad (9)$$

(Decagon, 2015)

Despejando Voltios.

$$\text{Voltios} = \left( \frac{\theta_{fs} + 0.554}{0.494} \right)$$

$$\text{Voltios} = \left( \frac{0.31 + 0.554}{0.494} \right)$$

$$\text{Voltios} = 1.763 \quad (10)$$

$$S_{fs} = \frac{1023 \times \text{Volt}}{5} \quad (11)$$

$$S_{fs} = 361$$

Es simplemente una equivalencia, 31.69% equivale a 361 (en el controlador), no se debe permitir que la humedad esté por debajo de este valor.

### 7. Equivalente numérico de $\theta_{cc}\%$ en el controlador de riego $S_{cc}$ :

El procedimiento es el mismo que en anterior, estamos calculando el valor que equivale en el controlador cuando el suelo está a Capacidad de Campo ( $\theta_{cc}\% = 40.95\%$ )

$$\theta_{cc} = \frac{\theta_{cc}\%}{100} \quad (12)$$

(Puppo, 2015)

$$\text{Voltios}_{cc} = \left( \frac{\theta_{cc} + 0.554}{0.4944} \right)$$

$$\text{Voltios}_{cc} = 1.950$$

$$S_{cc} = \frac{1023 \times \text{Voltios}_{cc}}{5}$$

$$S_{cc} = 399$$

Es decir, 399 (en el controlador) equivale a 40.95% de humedad volumétrica. Y como este valor corresponde a la capacidad de campo, significa que ya no se debe regar más, ya que estaríamos excediendo el límite máximo de humedad.

### 8. Equivalente de numérico $\theta_{pmp}\%$ en el controlador de riego $S_{pmp}$

$$\theta_{pmp} = \frac{\theta_{pmp}\%}{100} \quad (13)$$

(Puppo, 2015)

$$\text{Voltios}_{pmp} = \left( \frac{\theta_{pmp} + 0.554}{0.494} \right)$$

$$\text{Voltios}_{pmp} = 1.326$$

$$S_{pmp} = \frac{1023 \times \text{Voltios}_{pmp}}{5}$$

$$S_{pmp} = 271$$

La humedad volumétrica igual a 10.08%, correspondiente a la humedad de punto de marchitez permanente y su equivalente numérico (en el controlador) es 271. Nunca jamás la humedad del suelo debe llegar a este valor ya que es el valor límite inferior de humedad volumétrica.

### 9. El diámetro del bulbo de humedecimiento $db$ [m].

El tiempo de riego para el presente trabajo de tesis, no es un tiempo fijo, sino más bien dependiente de la humedad instantánea del terreno de cultivo, para medir el diámetro del bulbo, se necesitó irrigar un tiempo estimado, para lo cual se procedió a cronometrar el tiempo promedio que un riego toma, para llegar al valor de humedad deseado, el cual resulto en un aproximado de 10 minutos, este valor de tiempo se obtuvo de manera experimental. De este modo medir el radio del bulbo, se procedió a regar durante diez minutos y pasado este tiempo, se procedió a medir el diámetro del bulbo de humedecimiento.

Fotografía 11: Medición del diámetro del bulbo de humedecimiento..



*Fuente: Elaboración propia.*

### 10. Resumen de resultados del diseño agronómico.

Parámetro	Símbolo	Fórmula	Resultado	Unidades
Humedad volumétrica del suelo a CC.	$\theta_{cc}\%$	$\theta_{cc}\% = Da * CCps\%$	40.95	%
Humedad volumétrica del suelo a PMP	$\theta_{pmp}\%$	$\theta_{pmp}\% = Da * PMPps\%$	10.08	%
Agua disponible o agua útil.	AD%	$AD\% = \theta_{cc}\% - \theta_{pmp}\%$	30.87	% ó mm/10cm
Humedad volumétrica a factor de secamiento.	$\theta_{fs}$	$\theta_{fs}\% = \theta_{cc}\% - fs \times AD\%$	31.693	%, mm/10cm
Ecuación del sensor para Humedad del suelo	$\theta$	$\theta = 0.494 * Voltios - 0.554$ $\theta\% = \theta * 100$	Humedad instantánea	%
Voltaje que arroja el sensor con suelo a CC.	<i>Voltios_cc</i>	$Voltios_{cc} = \left( \frac{\theta_{cc} + 0.554}{0.494} \right)$	1.950	Voltios
Voltaje que arroja el sensor con suelo a PMP.	<i>Voltios_pmp</i>	$Voltios_{pmp} = \left( \frac{\theta_{pmp} + 0.554}{0.494} \right)$	1.326	Voltios
Voltaje que arroja el sensor con el suelo a factor de secamiento.	<i>Voltios_fs</i>	$Voltios_{fs} = \left( \frac{\theta_{fs} + 0.554}{0.494} \right)$	1.763	Voltios
Equivalente numérico de $\theta_{fs}\%$ en el controlador de riego S_fs:	<i>S_fs</i>	$S_{fs} = \frac{1023 * Voltios_{fs}}{5}$	361	Adimensional
Equivalente de $\theta_{cc}\%$ en el controlador de riego S_cc:	<i>S_cc</i>	$S_{cc} = \frac{1023 * Voltios_{cc}}{5}$	399	Adimensional
Equivalente de $\theta_{pmp}\%$ en el controlador de riego S_pmp:	<i>S_pmp</i>	$S_{pmp} = \frac{1023 * Voltios_{pmp}}{5}$	271	Adimensional
Diámetro del bulbo	<i>db</i>	Por medición.	0.16	m

Fuente: *Elaboración propia.*

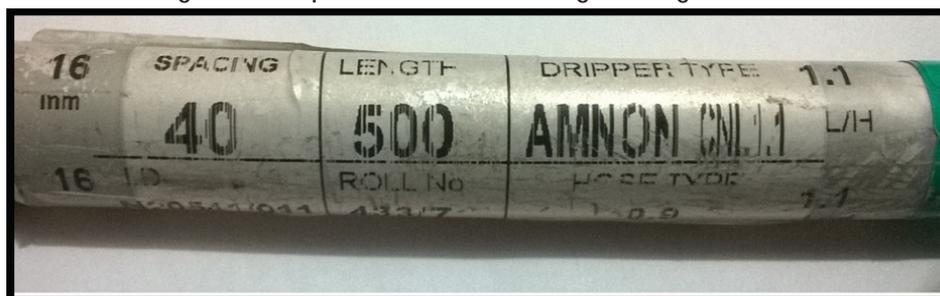
**Explicación:** Significa que de acuerdo a las características del suelo resultado de su análisis, que el controlador electrónico de riego puede ser programado para trabajar entre los valores desde 361 hasta 399 (30.87% hasta 40.95%). Configurar por encima de 399 (40.95%), significará que el suelo está saturado. Configurar el controlador de riego con un valor por debajo de 361 (31.69%), hará que la planta se sobre-esfuerce para aprovechar el agua de riego. Y si el controlador indica un valor de 271 (10.08%), significa que la humedad volumétrica del suelo está a Punto de Marchitez Permanente.

### 5.3.6. Instalación del sistema de riego.

#### 1. Presión del sistema.

La presión de trabajo del sistema se mide en Bar, y está determinada por las características de catálogo de la manguera de goteo, el cual indica 1Bar de presión de operación.

Fotografía 12: Especificaciones de la manguera de goteo utilizado.



*Fuente:* Elaboración propia.

En la imagen se muestra las especificaciones generales de la manguera de goteo que a continuación se detalla.

#### 2. Manguera de goteo:

De la hoja de datos de la manguera de goteo, tenemos:

Marca	= <b>NanDanJain.</b>
Modelo	= AMNON CNL 1.1
Espaciamiento de emisores	=0.40m
Caudal de emisor	=1.1L/h
Diámetro de manguera	=16mm
Presión de trabajo	= 1Bar.
Presión de apertura de emisores	=1Bar
Presión de cierre de emisores	=0.2Bar

(NaanDanJain, 2012)

### 3. Fuente de agua.

La fuente de agua se muestra en la siguiente imagen, el cual es un caño con un caudal aproximado de 0.3L/s con una presión de 0.3Bar. El caudal es suficiente para el tamaño del terreno experimental de los lisímetros, pero no así la presión que se tiene de 0.3Bar.

Fotografía 13: Fuente de agua y tanque almacenador de agua.



*Fuente: Elaboración propia.*

### 4. Tanque de agua

Cálculo del volumen mínimo del tanque de agua.

Es necesario asegurar que el tanque nunca quede vacío pues ello podría malograr la electrobomba ya que solamente funciona con agua.

Para lo que el tanque tiene una válvula de boya que garantiza el llenado del tanque constantemente. Para hacer este cálculo, se tiene que diseñar bajo el escenario más exigente posible. El cual se describe a continuación:

- Que los tres lisímetros son irrigados al mismo tiempo.
- Que los tres lisímetros se riegan todo el tiempo.

Bajo estas condiciones el caudal de oferta ( $Q_o$ ) tiene que ser mayor al caudal de demanda ( $Q_d$ ).

$$Q_o > Q_d$$

$$Q_o \text{ (Caudal de oferta)} > Q_d \text{ (Caudal de demanda)}$$

**a. El caudal de oferta  $Q_o$ :**

$$t = 10 \text{ segundos (medido con cronómetro)}$$

$$\text{Volumen} = 3 \text{ Litros (medido con peso de recipiente)}$$

De donde:

$$Q_o = 3/10 \text{ L/s}$$

$$Q_o = 0.3 \text{ L/s}$$

$$Q_o = 0.3 \text{ L} / (1/3600) \text{ L/h}$$

$$Q_o = 1080 \text{ L/h}$$

**b. El caudal de demanda  $Q_d$ :**

Para lo cual consideramos todos los emisores de los tres lisímetros:

$q_e = 1.1 \text{ L/h}$  Este es el caudal de 01 emisor.

El número total de emisores es=

$$= 3 \times (\text{Número de emisores en un lisímetro})$$

$$= 3 \times (\text{Área de 01 lisímetro} / \text{distanciamientos})$$

$$= 3 \times (4 \text{ m}^2 / (0.3 \times 0.2))$$

$$= 3 \times 67 \text{ emisores}$$

$$= 201 \text{ emisores en las tres parcelas}$$

Pero cada parcela tiene 01 emisor adicional conectado a un medidor volumétrico de agua, por lo que en total se tiene:

Número total de emisores = 201 + 3

$$= 204 \text{ emisores.}$$

Si cada emisor tiene un caudal de 1.1 L/h

El caudal de demanda de todo el sistema es=

$$= \text{Número total de emisores} \times \text{caudal de un emisor} (q_e)$$

$$= 204 \times 1.1 \text{ L/h}$$

$$= 224.4 \text{ L/h.}$$

$$Q_d = 224.4 \text{ L/h}$$

**Por consiguiente:**  $Q_o > Q_d$

$$1080 \text{ L/h} > 225 \text{ L/h}$$

Es decir, el agua de la fuente hídrica es suficiente para regar constantemente los tres lisímetros simultáneamente de modo que el tanque nunca se vaciará.

Fotografía 14. Tanque de almacenamiento de agua de 600L



*Fuente: Elaboración propia*

## **5. El sistema de bombeo y presión de agua automático**

El sistema de bombeo, tiene la clara función de garantizar la presión de trabajo del sistema de riego el cual es presurizado y está en el rango de 1.0 – 4.0 Bar. En la imagen se aprecia la electrobomba empleada de 0.5Hp de potencia y que es del tipo centrífuga ya que no se requiere mucho caudal de agua, sino presión. También se aprecia en la imagen un tanque pulmón, el cual tiene la función de atenuar los cambios bruscos de presión que harían que el presostato active de manera intermitente la electrobomba la cual se activa de manera automática al descender la presión por debajo de los 1.5 Bar.

Fotografía 15. Sistema de presión constante y bombeo de agua



Fuente: Elaboración propia.

Características técnicas (de placa) del sistema de bombeo.

Potencia del motor	=0.5Hp
Marca	=Pedrollo (Italiano)
Tensión de operación	= 220Vac
Tipo de electrobomba	=Centrifuga
Rango del Manómetro	=0-6Bar
Rango del Presostato	=1-6Bar

#### **6. Modo de funcionamiento del sistema de bombeo:**

Cuando la presión cae por debajo de 1.5 Bar, el presostato hace contacto para que la electrobomba se conecte a 220Vac. De modo que la presión aumenta hasta que llega a 4.5Bar, momento en el que se desconecta eléctricamente, garantizando así una presión de trabajo dentro del rango exigido por el sistema de riego, es decir, 1.0Bar.

#### **7. Cabezal de riego**

Consiste en una llave principal de 1", un filtro de anillos de 1", un regulador de presión a 1Bar de 1" y un conector de 1".

Fotografía 16: Cabezal de riego del sistema.



Fuente: Elaboración propia.

La conducción se hizo con manguera de 1 pulgada, para reducir pérdida de carga, en la misma parcela, se utilizaron mangueras de goteo de 16mm.

## 8. Las electroválvulas

Son válvulas que se activan de manera eléctrica, las cuales en el presente trabajo de investigación, se activan por el sistema controlador automático de riego.

Fotografía 17. Electroválvula de 1".



Fuente: Elaboración propia

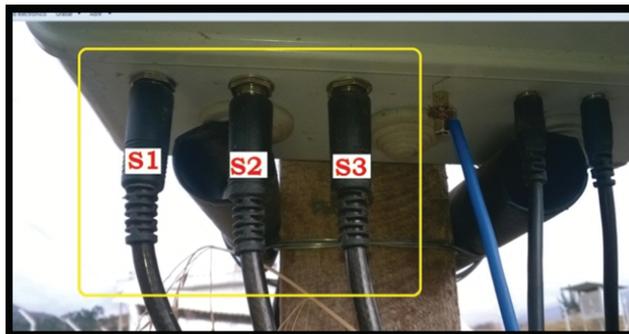
Fotografía 18. Ubicación de las electroválvulas para cada parcela.



Fuente: Elaboración propia

Estas electroválvulas en el presente trabajo de investigación se controlan de manera eléctrica a través del controlador electrónico de riego, el mismo que fue ensamblado para facilitar el control del riego.

Fotografía 19: Forma de conexión de las tres electroválvulas al controlador de riego.



Fuente: Elaboración propia.

### 5.3.7. Las mangueras de goteo

Las mangueras se instalaron a 30 cm de distanciamiento entre líneas. En la siguiente imagen se les ve previamente a ser colocadas en el campo.

Fotografía 20. Mangueras de goteo antes de ser colocadas en la parcela.



Fuente: Elaboración propia

Para lograr el traslape de los bulbos de humedecimiento, se instaló doble manguera de goteo, de modo que se logró un distanciamiento de 20cm entre cada planta de lechuga.

Fotografía 21. Mangueras de goteo dispuestas en la parcela.



Fuente: *Elaboración propia*

La distancia entre las mangueras es de 30cm, y el espaciamiento de los emisores es de 20cm.

### 5.3.8. Determinación del coeficiente de uniformidad CU

El coeficiente de uniformidad de riego del cuarto más bajo  $CU_{25}$  se calculó siguiendo la metodología de Merriam y Keller (1978), mediante el uso de la siguiente expresión:

$$CU_{25} = \frac{q_{25}}{q_{total}} \times 100\% \quad (14)$$

De donde:

$q_{total}$  : Caudal medio de 16 recipientes medidos.

$q_{25}$  : Caudal medio de 4 recipientes de menor caudal.

#### Interpretación del Coeficiente de Uniformidad.

CUC	Clasificación
>95%	Excelente
85%-95%	Bueno
80%-85%	Aceptable
70%-80%	Pobre
<70%	Inaceptable

(Merriam & Keller, 1978)

Fotografía 22. Determinación del coeficiente de uniformidad.



Fuente: Elaboración propia

El siguiente es el cuadro N° 6 de resultados luego de las pruebas para la medición del coeficiente de uniformidad del sistema de riego localizado. Las tres parcelas

fueron instaladas con la misma manguera de goteo, de modo que el resultado de la uniformidad es el mismo en las tres parcelas.

Cuadro 6: Toma de datos de la evaluación de los emisores del sistema de riego.

		TIEMPO DE RIEGO t=10min															
n		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
mg		158	166	162	165	163	166	158	161	165	166	159	158	165	166	160	161

*Fuente: Elaboración propia.*

**n:** El número de emisores examinados.

**mg:** El peso del agua colectado en los recipientes luego de 10min de irrigación.

**Procedimiento:**

Se promedia el total de los volúmenes de los 16 recipientes o pomos de medición seguidamente se identifica los 4 recipientes de menor contenido y se obtiene el promedio de los mismos.

**Q<sub>total</sub>: Promedio del total**

$$\overline{q_{total}} = (158 + 166 + 162 + 165 + 163 + 166 + 158 + 161 + 165 + 166 + 159 + 158 + 165 + 166 + 160 + 161)/16$$

$$\overline{q_{total}} = 162.4375$$

**q<sub>25</sub>: Promedio de la cuarta parte con menos descarga**

n=4	1	2	3	4
mg	158	158	158	159

$$\overline{q_{25}} = 158.25$$

$$CU = \frac{158.25}{162.4375}$$

CU% = 97.42% (Excelente uniformidad).

Fotografía 23. Las tres parcelas y los contenedores de agua de riego.



*Fuente: Elaboración propia*

La cantidad de agua irrigada, se determina a través de bidones o contenedores adaptados en un emisor de salida de la parcela como se puede ver en la imagen precedente; un bidón para cada parcela.

Fotografía 24. Instalación de los bidones medidores agua de riego.



*Fuente: Elaboración propia*

Para cada parcela, como se aprecia en la imagen, se adecuó un tramo de manguera de irrigación el cual se introdujo dentro del bidón, para lo cual se utiliza un conector “T”, a través del cual la manguera prosigue hacia un drenador correspondiente.

Fotografía 25. Bidones utilizados para cada parcela.



*Fuente: Elaboración propia*

Estos bidones tienen una capacidad de 5 litros, el peso específico del agua es  $1\text{g/cm}^3$ , lo que significa que 1 gramo de agua equivale a 1mL de volumen de agua. Al estar conectados a un emisor, estos bidones contienen el volumen de agua acumulado durante el tiempo de riego. Se tiene que registrar la fecha de instalación y registrar la fecha en la que son retirados. Seguidamente se registra

con una balanza electrónica el contenido de agua de los bidones de modo que así se sabe la cantidad de agua irrigada durante dicho lapso de tiempo. De esta manera se puede saber la cantidad de agua aplicada al cultivo con una simple operación de multiplicación por el número de emisores del sistema de riego.

Fotografía 26. Pesado del contenido de agua de los bidones.



*Fuente: Elaboración propia.*

Al final de la campaña, el pesado de los volúmenes de agua de cada lisímetro, representa la demanda hídrica del cultivo correspondientemente, posteriormente se comparan dichos resultados y se hace las interpretaciones correspondientes que se muestran en el siguiente capítulo.

### **5.3.9. El cultivo.**

El cultivo utilizado es la lechuga *Lactuca sativa L.* var. Crespa, esta variedad presentó mejor resistencia a las enfermedades fúngicas del suelo en un experimento anterior, específicamente a *Brotrytis sp* y *Sclerotinia sp*. Se instaló un almacigo pero en bandejas de propagación. Las semillas fueron directamente sembradas en las bandejas en las que se utilizó sustrato desinfectado.

Fotografía 27. Sustrato desinfectado y bandeja de propagación.



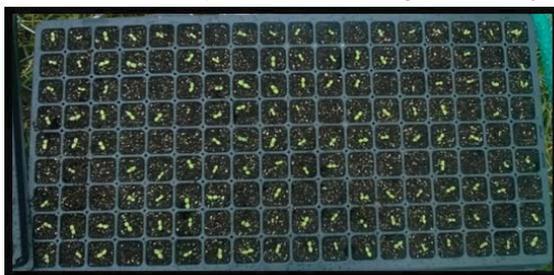
*Fuente: Elaboración propia*

Fotografía 28. Siembra de semillas de lechuga en las bandejas de propagación



*Fuente: Elaboración propia.*

Fotografía 29: Crecimiento de las plántulas de lechuga en bandeja de propagación.



*Fuente: Elaboración propia.*

### **5.3.10. Instalación de las plantas en el campo definitivo.**

Se realizó a los 59 días de la siembra. Algo importante que se notó luego de hacer el trasplante, es que las hojas de las plantulas no murieron como generalente suele pasar, simplemente continuarón su crecimiento en el terreno definitivo. Las plantulas recién trasplantadas, se cubrieron con malla Rashell de 65% de proteccion.

Fotografía 30: Plántulas recién trasplantadas cubiertas con malla rashell.



*Fuente: Elaboración propia.*

Fotografía 31: Vista de la parcela con riego sub-superficial (S1)



Fuente: Elaboración propia.

Fotografía 32: Vista de la parcela con riego por goteo superficial (S2)



Fuente: Elaboración propia.

Fotografía 33: Parcela S1, vista del riego localizado sub-superficial.



*Fuente: Elaboración propia.*

Fotografía 34: Parcela S2, vista del riego localizado superficial sin mulch



*Fuente: Elaboración propia.*

Fotografía 35: Parcela S3, vista del riego localizado superficial con mulch.



*Fuente: Elaboración propia.*

### 5.3.11. Instalación de los sensores de Humedad

Se hizo uso de 03 sensores de humedad basados en la medición de la constante dieléctrica del suelo, lo cual garantiza una mejor medida de la humedad volumétrica de manera directa e independiente del tipo de suelo del que se trate. La marca que se utilizó es de la compañía norteamericana DECAGON.

Fotografía 36: Sensores de humedad utilizados.



*Fuente: Elaboración propia.*

#### 5.3.11.1. Profundidad de instalación de los sensores:

Los sensores en cada caso, se instalaron a una profundidad de 8 centímetros de la superficie del suelo como se puede apreciar en la fotografía 38.

Fotografía 37: Profundidad de instalación de los sensores de humedad.



*Fuente: Elaboración propia.*

### 5.3.11.2. **Conexión de los sensores al módulo controlador de riego:**

Se realiza a través de un conector estéreo estándar de 3.5mm. Dicha conexión se realiza de manera rápida con la precaución de respetar el orden correspondiente, es decir, el primero a la izquierda sensor (S1), el segundo al medio sensor (S2) y el tercero a la derecha (S3).

Fotografía 38: Conector de 3.5mm del sensor de humedad



*Fuente: Elaboración propia.*

Fotografía 39: Electroválvulas y sensores conectados al controlador de riego.



*Fuente: Elaboración propia.*

### 5.3.12. **El controlador de riego.**

El controlador fue diseñado y ensamblado para las necesidades del presente trabajo de investigación, dicho trabajo tomó un tiempo total de 3 meses. Se recalca que el controlador electrónico fue ensamblado por el autor de la presente tesis. El controlador tiene tres entradas de sensor y tres salidas para electroválvulas. El de control del riego, está basado en el principio de reposición de la humedad perdida por cada parcela. Cada parcela al final del día pierde

humedad en diferente medida. Dicha humedad es cuantificada con los sensores de humedad volumétrica y posteriormente el controlador toma el valor de dicha humedad y habilita el riego hasta que las parcelas tengan la misma humedad inicial configurada por el usuario. El volumen de agua de reposición es almacenado en los medidores volumétricos instalados en cada parcela.

### 5.3.12.1. Partes internas del controlador de riego.

Internamente el controlador consta de componentes electrónicos que son descritos a continuación.

**1.- Tarjeta controladora principal.-** Es una placa electrónica que consta de un procesador programable. De entre las opciones que existen en el mercado se probó con los modelos, Raspberry Pi 3, Arduino Mega y Arduino Due.

Fotografía 40: Tarjeta principal del controlador de riego.



*Fuente: Elaboración propia.*

Y se decidió trabajar con la tarjeta Arduino Mega, debido a que consta de una memoria interna que si se corta el suministro de energía, puede guardar los datos de la configuración definidos por el usuario, las otras dos tarjetas no tienen esta capacidad mencionada.

**2.- Pantalla LCD.-** Es una tarjeta que permite visualizar los valores de la humedad del suelo, la hora y otros parámetros del controlador de riego. Para lo cual se probó las siguientes tarjetas: Pantalla LCD de 16x2, Pantalla TFT táctil de 800x480.

Fotografía 41: Pantallas LCD.



*Fuente: Elaboración propia.*

Se escogió la pantalla LCD 16x2, debido a que no requiere de muchas conexiones con la tarjeta principal. Esto permitió que se pueda aumentar otras tarjetas auxiliares al controlador de riego para aumentarle más funcionalidades.

**3.- Tarjetas auxiliares.-** Son tarjetas que conectadas a la tarjeta principal, forman parte del controlador electrónico de riego, los cuales son: Shield GSM, Modulo RTC, Modulo microSD.

Fotografía 42: Tarjetas auxiliares que componen el controlador de riego.



*Fuente: Elaboración propia.*

- a. **Tarjeta Shield GSM:** Es una tarjeta que tiene un chip de celular, que permite que el controlador electrónico de riego envíe mensajes de texto automáticamente con la información de la humedad del terreno.
- b. **Tarjeta RTC:** Esta tarjeta, permite que el controlador conste de un sistema de reloj con hora, minuto, y segundos accesibles para el controlador. Lo cual permite que el controlador pueda ser configurado para habilitar el riego a cualquier hora de día deseado.
- c. **Tarjeta módulo micro SD:** Esta tarjeta, permite que el controlador electrónico de riego, pueda registrar en una memoria micro SD, los datos de la humedad, momentos de riego y otros parámetros que posteriormente pueden ser descargados a una computadora para su posterior análisis.

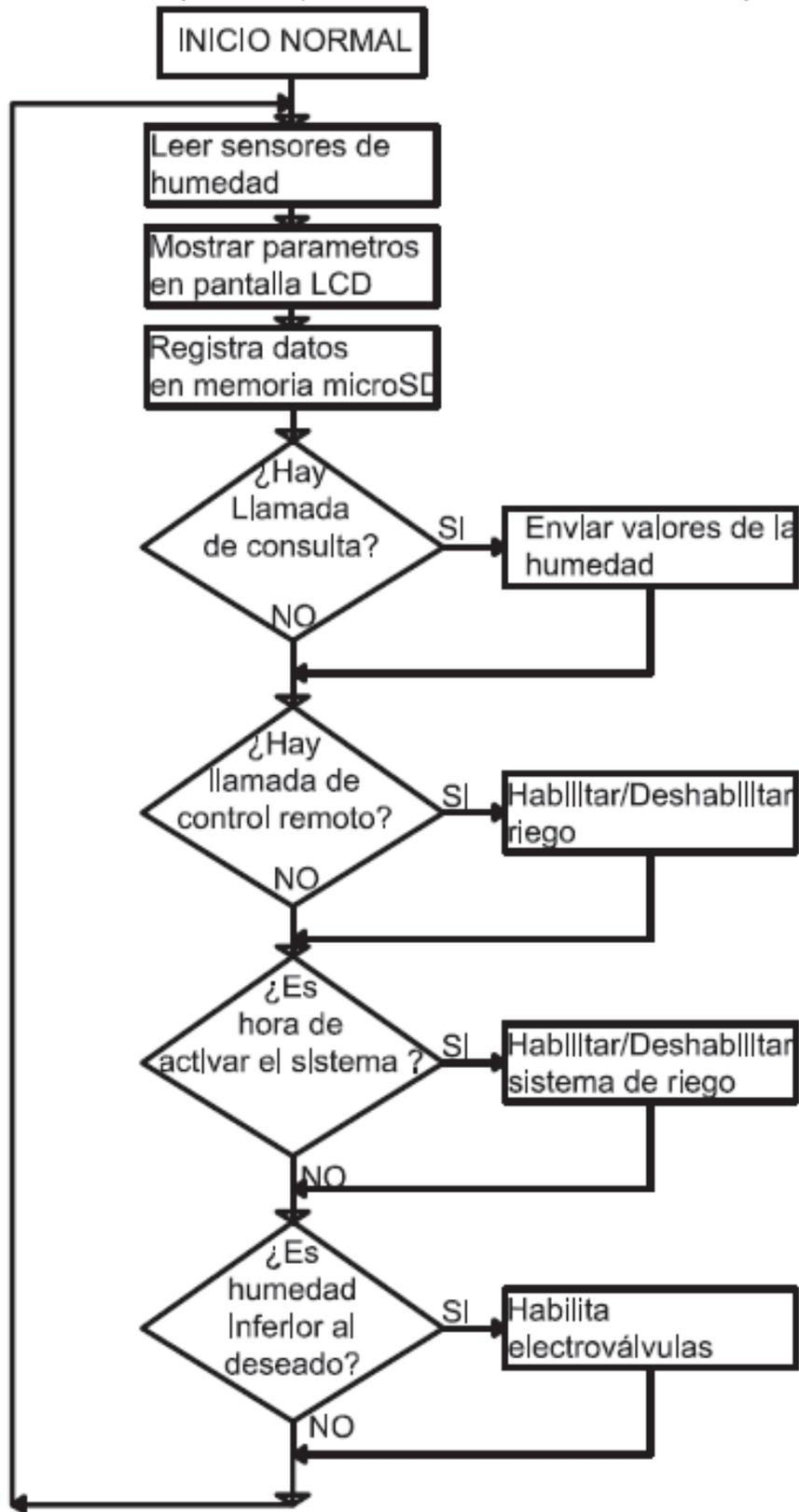
Fotografía 43: Tarjetas electrónicas adicionales utilizadas.



*Fuente: Elaboración propia.*

- d. **Tarjeta Relay:** A través de esta tarjeta, el controlador de riego, activa y desactiva a las electroválvulas.
- e. **Regulador de voltaje:** Dota de energía eléctrica a los componentes eléctricos.

Gráfico 6: Diagrama de flujo del funcionamiento del controlador de riego.



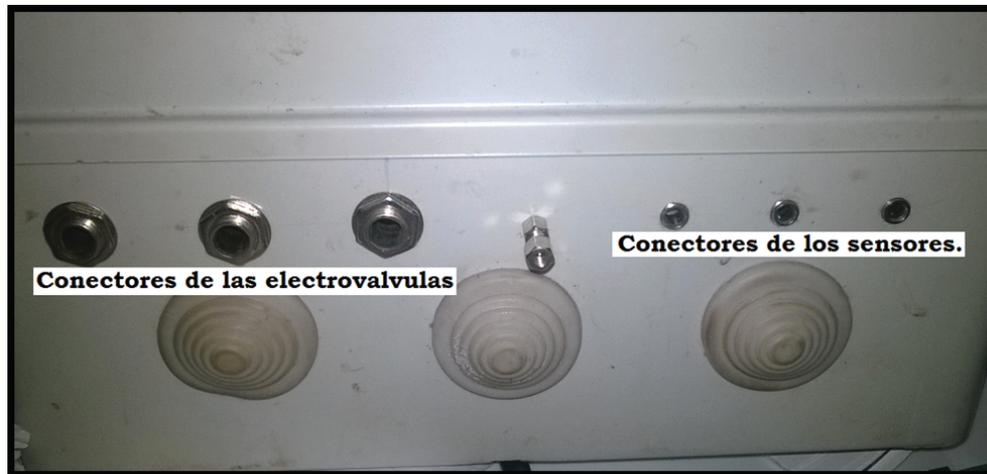
Fuente: Elaboración propia.

Fotografía 44: Vista frontal del controlador de riego ensamblado.



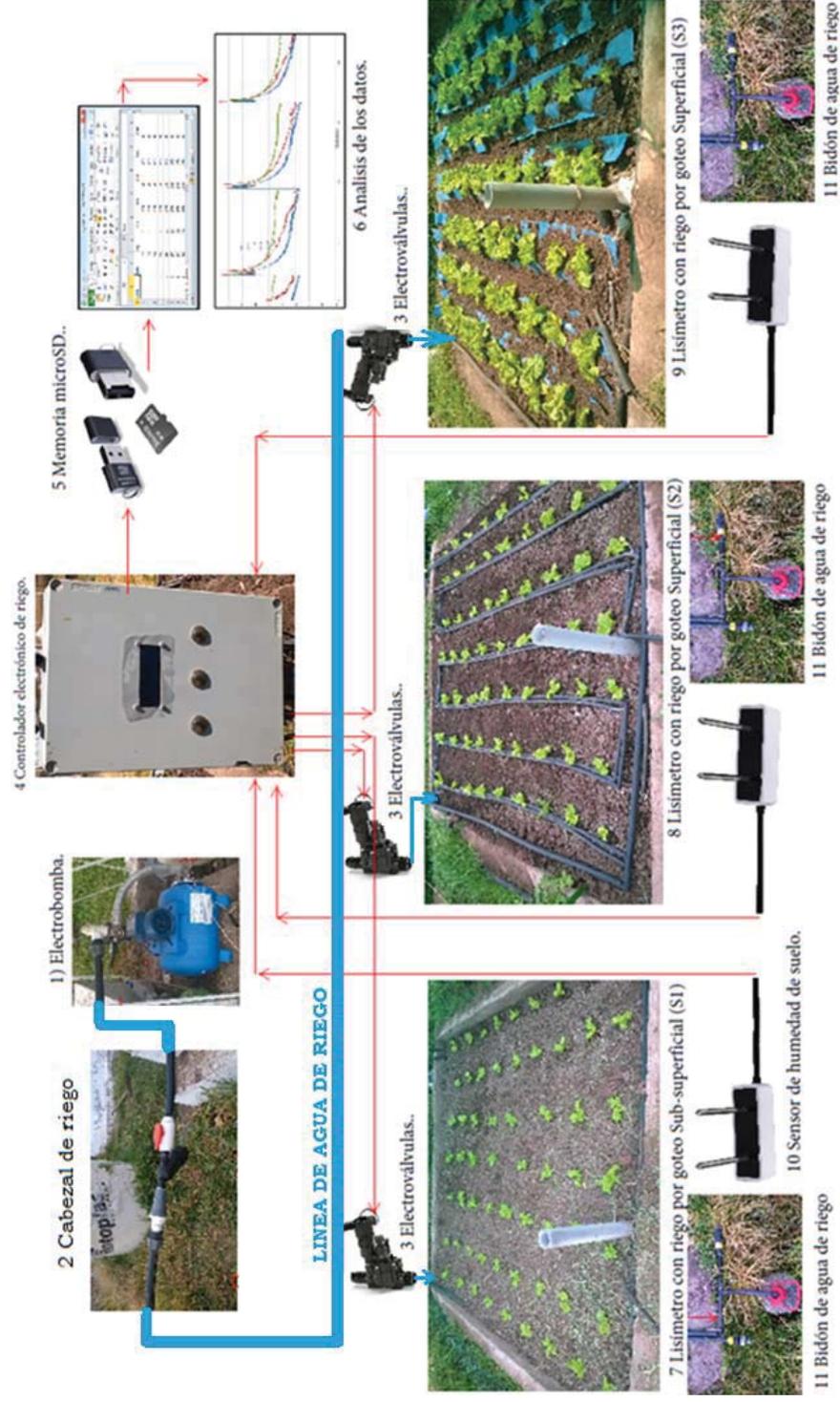
*Fuente: Elaboración propia.*

Fotografía 45: Vista inferior de los conectores del controlador de riego.



*Fuente: Elaboración propia.*

### 5.3.12.2. Entradas y salidas del controlador de riego.



Fuente: *Elaboración propia*

- 1) Electrobomba le da presión de 1 Bar al sistema de goteo; 2) El cabezal de riego garantiza la presión constante y agua filtrada; 3) Las electroválvulas dotan de agua a cada parcela 4) El controlador de riego controla las electroválvulas en base a la humedad de las parcelas 5) La memoria microSD, contiene la información del comportamiento de la humedad del sistema. 6) Los datos son analizados. 7), 8) y 9) Son los lisímetros de experimentación. 10) Es el sensor que mide la humedad volumétrica instantánea del sistema. 11) Son bidones de almacenamiento del agua irrigado y contienen el volumen de agua consumido por planta.

Fotografía 46: Controlador electrónico de riego instalado en el campo.



Fuente: Elaboración propia.

### 5.3.13. Detalles del riego controlado.

#### 5.3.13.1. La lectura de los datos de la memoria microSD.

La información del microSD es accesible con el uso de cualquier lector de memorias disponibles en el mercado.

Fotografía 47. La memoria microSD



Fuente: Elaboración propia.

Una vez introducido en el computador, se mostrará el archivo con nombre TARPUY.TXT, archivo en el que se encuentra el registro de los datos.

Figura 15: Vista del archivo del microSD en hoja de cálculo.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Hora	Min	seg	SP1	SP2	SP3	Acc1	Acc2
2	9	22	30	370	370	370	0	
3	9	23	30	370	370	370	0	
4	9	24	30	370	370	370	0	
5	9	25	29	370	370	370	0	
6	9	26	29	370	370	370	0	
7	9	27	29	370	370	370	0	
8	9	28	28	370	370	370	0	
9	9	29	28	370	370	370	0	

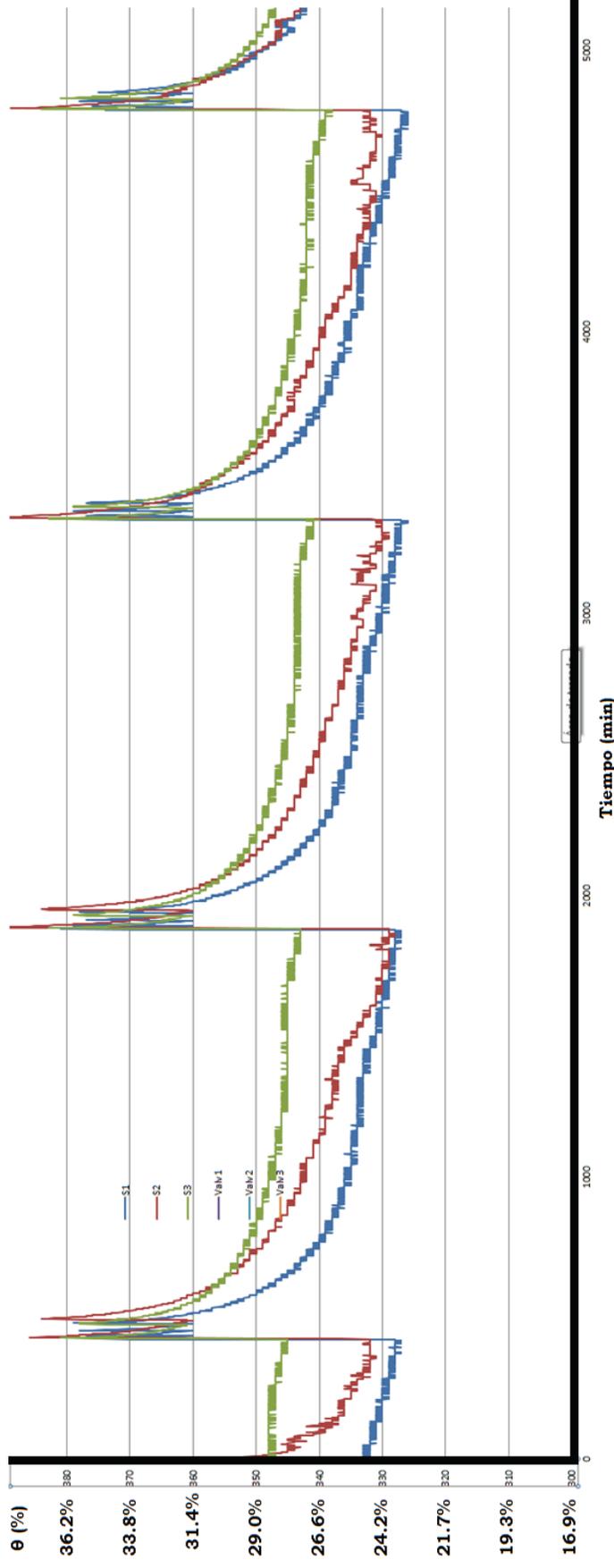
Fuente: Elaboración propia.

### **5.3.13.2. Tratamiento de los datos contenidos en la memoria microSD**

Con la información de la humedad y usando el Excel de Microsoft, fue posible hacer los análisis deseados, básicamente del comportamiento de la humedad del suelo durante el riego así como también durante el tiempo sin riego.

Adicionalmente para un mejor análisis, con los datos disponibles, fue posible graficar el comportamiento de la humedad para visualizar la variación de la humedad.

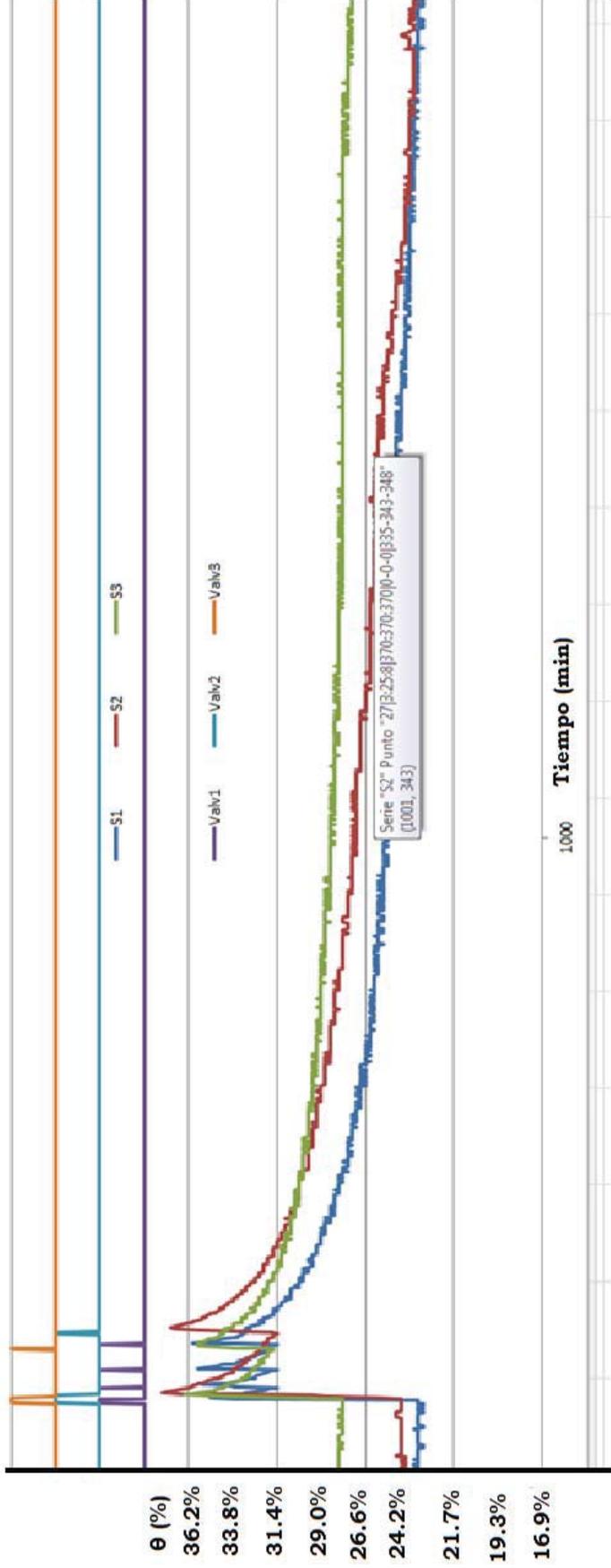
Figura 16: Gráfica de la variación de la humedad (27, 28, 29 y 30 de Mayo 2016).



Fuente: *Elaboración propia.*

**Interpretación:** Lo que tenemos en la imagen, es la gráfica demostrativa en una hoja de cálculo, de la variación de la humedad del suelo correspondiente a 3 días. Vemos que el controlador activó el riego cada día, y que a partir de cada riego, la humedad del suelo fue descendiendo a lo largo del día de modo que para el día siguiente se efectuó un nuevo riego de reposición de la humedad. Con fines prácticos, en el presente se muestra el comportamiento de tres días de un total de 78 días que estuvo el cultivo en campo. El comportamiento del controlador fue el mismo durante todo el proceso de la presente tesis de investigación. Nótese cómo varía la humedad a lo largo del día.

Figura 17: Grafica de la variación de la humedad y el momento de riego.



Fuente: *Elaboración propia.*

**Interpretación:** Ésta es una imagen ampliada del anterior y recordando que S<sub>1</sub> es la parcela del riego sub superficial, S<sub>2</sub> es la parcela del Riego superficial sin mulch y S<sub>3</sub> es la parcela del riego superficial con mulch. En la imagen vemos que las parcelas S<sub>2</sub> y S<sub>3</sub> se irrigan solamente 2 veces en el primer día. Pero vemos en cambio que la parcela principal de experimentación S<sub>1</sub> (**Azul**), se irrigó 4 veces, la misma que es irrigada por la válvula 2 (**Valv1**). Esto es debido a que al ser un riego sub-superficial, el agua llega más rápidamente a la raíz que los otros dos casos y por ende riega en menos tiempo pero más veces, es decir, riega más veces pero menos tiempo en comparación a los otros dos casos.

#### **5.3.14. Riegos efectuados.**

El riego por goteo es de alta frecuencia, y debido a las caídas de humedad rápidas, durante el día, se riega diariamente y durante las noches en un horario programado de 18:00 horas a 18:45 horas, tomando como referencia el tiempo de riego calculado en el capítulo 5 correspondiente al diseño agronómico. El volumen de agua aplicado, o lo que es lo mismo el tiempo de riego o de reposición de la humedad perdida, está en función a la lectura de la humedad instantánea del terreno gracias al sensor de humedad y el equipo controlador de riego, humedad que es cedida a la atmosfera por diversos motivos; en nuestro caso los factores que influyen a dichas pérdidas de humedad son afectadas por el tipo de disposición del tipo de riego localizado.

Numero de riegos efectuados= 78.

Esto es debido a que el cultivo estuvo en el campo luego del trasplante, 78 días.

El volumen de reposición de agua, fue distinto para cada caso.

El hecho de que el sistema esté habilitado para irrigar entre las 18:00 y 18:30.

Significa que fuera de ese horario por más de que la humedad caiga por debajo del umbral de riego, el sistema no irrigará sino hasta el día siguiente en el horario configurado.

.

##### **5.3.14.1. Momento de riego registrado en el controlador.**

Para ver los tiempos de riego, hacemos uso de los datos que fueron registrados por el controlador electrónico de riego, contenidos en la memoria microSD, contenido que se muestra en el cuadro 7.

Cuadro 7: Registro de datos del controlador de riego.

Hora	Min	seg	SP1	SP2	SP3	Acc1	Acc2	Acc3	JMCnt	ms	JMBit	JMCKbBit	DIA	MES	AÑO	V1En	V2En	V3En	S1	S2	S3
17	54	1	33.8	33.8	33.8	0	0	0	248340	762137	1	0	20	5	16	0	0	0	27.6	24.7	28.1
17	55	1	33.8	33.8	33.8	0	0	0	269035	822072	1	0	20	5	16	0	0	0	27.6	24.7	28.1
17	56	1	33.8	33.8	33.8	0	0	0	289730	882016	1	0	20	5	16	0	0	0	27.6	24.7	28.1
17	57	1	33.8	33.8	33.8	0	0	0	310425	941954	1	0	20	5	16	0	0	0	27.6	24.7	28.1
17	58	1	33.8	33.8	33.8	0	0	0	331120	1001892	1	0	20	5	16	0	0	0	27.3	24.7	28.1
17	59	1	33.8	33.8	33.8	0	0	0	351815	1061832	1	0	20	5	16	0	0	0	27.3	24.7	28.1
18	0	0	33.8	33.8	33.8	0	0	0	372102	1120623	1	1	20	5	16	1	1	1	27.6	24.7	28.1
18	0	1	33.8	33.8	33.8	409	409	409	372510	1121824	1	1	20	5	16	1	1	1	27.6	24.7	28.1
18	1	1	33.8	33.8	33.8	21104	21104	21104	393205	1181892	1	1	20	5	16	1	1	1	33.1	24.9	27.8
18	1	3	33.8	33.8	33.8	21725	21725	21725	393827	1183710	1	1	20	5	16	0	1	1	33.8	24.7	27.8
18	2	37	33.8	33.8	33.8	21725	54360	54360	426462	1278413	1	1	20	5	16	0	1	0	34.3	28.3	33.8
18	3	1	33.8	33.8	33.8	21725	62494	54360	434595	1302003	1	1	20	5	16	0	1	0	33.8	29.5	35.1
18	4	1	33.8	33.8	33.8	21725	76510	54360	455290	1362022	1	1	20	5	16	0	0	0	33.6	33.9	36.0
18	5	1	33.8	33.8	33.8	21725	76510	54360	475985	1421990	1	1	20	5	16	0	0	0	32.9	37.9	35.5
18	11	1	33.8	33.8	33.8	21725	76510	54360	600155	1781868	1	1	20	5	16	0	0	0	31.9	35.5	34.1
18	11	48	33.8	33.8	33.8	21725	76510	54360	616652	1829697	1	1	20	5	16	1	0	0	31.4	35.3	33.8
18	12	1	33.8	33.8	33.8	25924	76510	54360	620850	1841884	1	1	20	5	16	1	0	0	31.9	35.3	33.8
18	12	14	33.8	33.8	33.8	30653	76510	54360	625580	1855606	1	1	20	5	16	0	0	0	33.8	35.3	33.8
18	36	0	33.8	33.8	33.8	30653	76510	54360	1117530	3281660	1	1	20	5	16	0	0	0	31.7	32.2	31.9
18	36	9	33.8	33.8	33.8	30653	76510	54360	1120820	3291213	1	1	20	5	16	1	0	0	31.4	31.9	31.7
18	36	10	33.8	33.8	33.8	30817	76510	54360	1120984	3291694	1	1	20	5	16	1	0	1	31.9	31.9	31.4
18	36	37	33.8	33.8	33.8	40283	76510	63826	1130450	3319180	1	1	20	5	16	0	0	1	33.8	32.2	31.9
18	37	0	33.8	33.8	33.8	40283	76510	71602	1138225	3341749	1	1	20	5	16	0	0	1	36.0	32.2	31.7
18	37	34	33.8	33.8	33.8	40283	76510	83308	1149932	3375715	1	1	20	5	16	0	0	0	36.0	32.2	33.8
18	43	0	33.8	33.8	33.8	40283	76510	83308	1262395	3701814	1	1	20	5	16	0	0	0	34.1	31.7	35.3
18	43	51	33.8	33.8	33.8	40283	76510	83308	1280228	3753540	1	1	20	5	16	0	1	0	33.8	31.4	35.1
18	44	0	33.8	33.8	33.8	40283	79373	83308	1283090	3761845	1	1	20	5	16	0	1	0	33.8	31.7	35.1
18	45	0	33.8	33.8	33.8	40283	100068	83308	1303785	3821881	1	1	20	5	16	0	1	0	33.8	31.9	35.1
18	45	29	33.8	33.8	33.8	40283	110035	83308	1313753	3850815	1	1	20	5	16	0	0	0	33.6	33.8	35.1

Fuente: Elaboración propia.

En sombreado se tiene los momentos de riego para cada lisímetro, ver descripción en la siguiente página.

**Explicación:** La tabla muestra parámetros que del equipo de riego que permiten realizar un seguimiento detallado del proceso de riego, así tenemos:

<b>Hora, Min, Seg</b> Indican la hora del sistema.	<b>JMBit:</b> Es un indicador de la activación del equipo vía remota.
<b>SP1 SP2 SP3:</b> Indican el valor de humedad deseado.	<b>JMCkBit:</b> Indicador de activación vía reloj.
<b>Acc1, Acc2 Acc3:</b> Indican el tiempo de riego.	<b>DIA MES AÑO:</b> Es la fecha del equipo.
<b>JMCnt:</b> Valor de calibración.	<b>V1En, V2En V3En:</b> Estado de las electroválvulas.
<b>ms:</b> Milisegundos transcurridos desde el encendido del equipo.	<b>S1, S2, S3:</b> Estado de humedad del suelo.

Del cuadro 7 se interpreta que:

Se empezó a regar los tres lisímetros a las 18:00:00 del día 20 de mayo del 2016.

El lisímetro S1:

Se inició el riego a las 18:0:0 y luego de alcanzar la humedad deseada se dejó de irrigar a las 18:01:03, (1min 3 seg)  
Después a las 18:11:48 se activó el riego de S1 hasta las 18:12:14, (26 seg)

Finalmente S1 se volvió a irrigar a las 18:36:09 finalizando a las 18:36:37, (28 seg)

Tiempo de riego para S1 es entonces de: **1min, 57seg, con tres riegos.**

El lisímetro S2:

Se inició el riego a las 18:00:00 hasta las 18:04:01; (4min 01 seg)

Después se volvió a irrigar a las 18:43:51 hasta llegar a la humedad configurada a las 18:45:29. (1min 38)

Tiempo de riego para S2 es entonces de: **5min, 39seg, con dos riegos.**

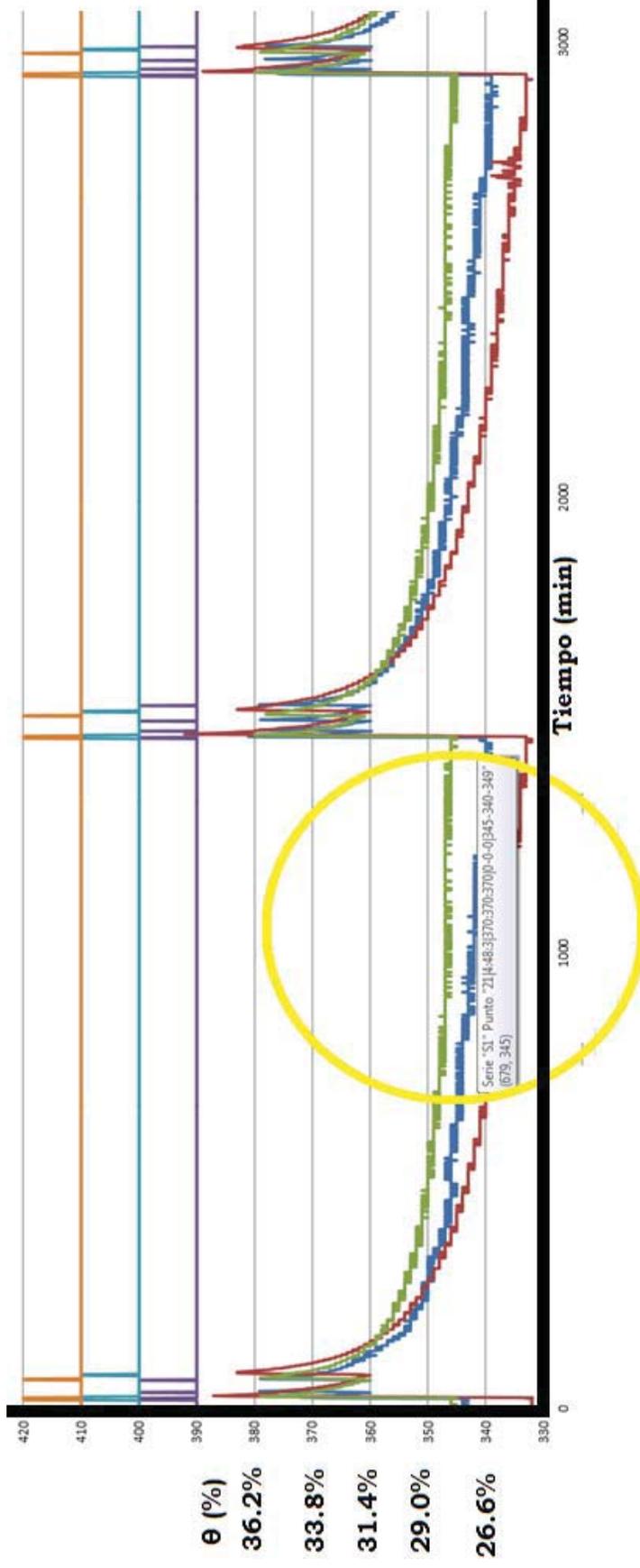
El lisímetro S3:

Se inició el riego a las 18:00:00 hasta las 18:02:37; (2min 37seg)

Después se volvió a irrigar a las 18:36:10 hasta llegar a la humedad configurada a las 18:37:34. (1min 24)

Tiempo de riego para S3 es entonces de: **4min, 01 seg, con dos riegos.**

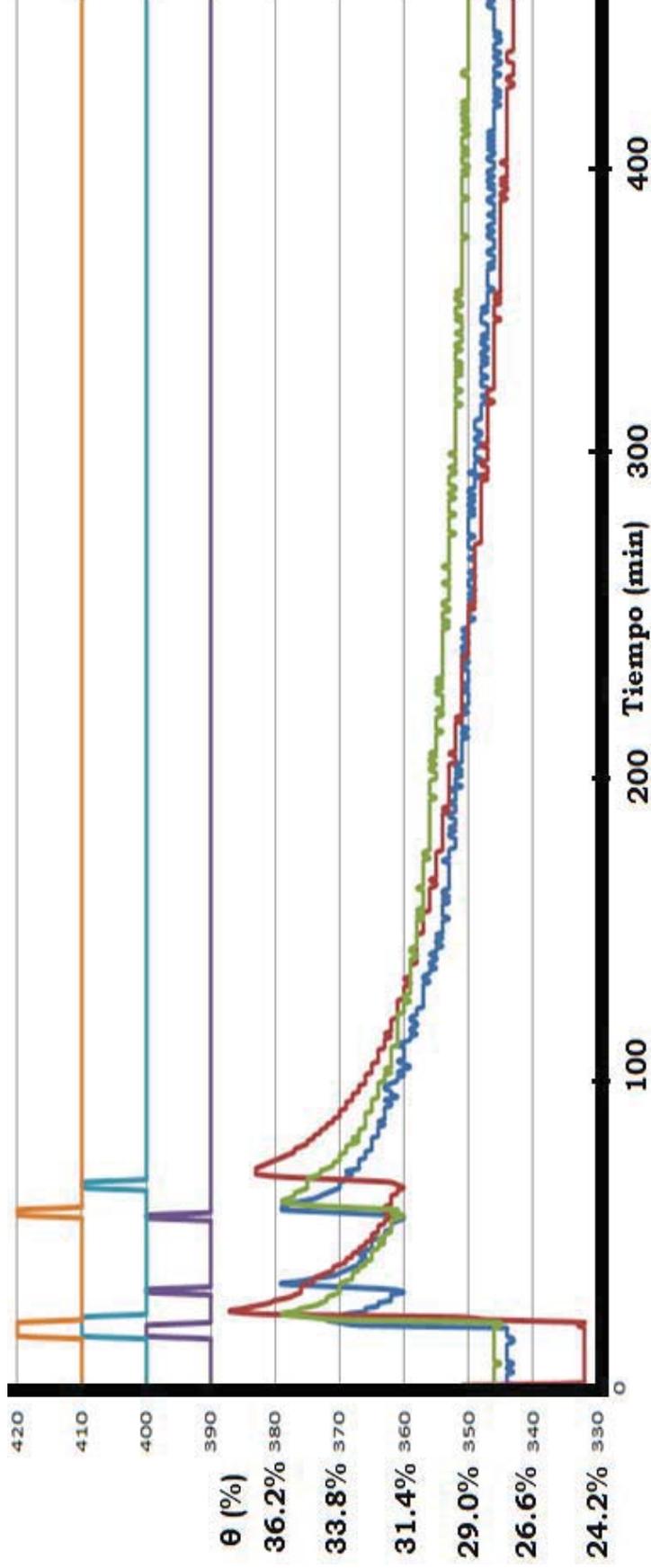
Gráfico 7: La humedad graficada a partir de los datos registrados.



Fuente: *Elaboración propia.*

**Interpretación:** Este gráfico 7 es un resultado del procesamiento en hoja de cálculo, en donde se aprecia la variación de la humedad a lo largo de 2 días. Además se observan tres graficas en líneas en la parte superior, en donde se aprecia el momento de riego y su efecto en la humedad del suelo para las tres parcelas correspondientes.

Gráfico 8: Vista en hoja de cálculo con la visualización de la duración de la irrigación.



Fuente: *Elaboración propia.*

**Interpretación:** Ampliación de la anterior en donde se observa más detalladamente los tiempos de riego de cada parcela y su efecto en la humedad del suelo. Además se ve el comportamiento de la humedad en cada parcela. Es importante ver cómo es que la parcela S1 se irriga más veces, pero en tiempos efectivos se irriga menos tiempo que los demás

### 5.3.14.2. Análisis del momento de riego.

Del cuadro 7, en el que se muestran los datos del primer riego, se tiene los tiempos de riego. Pero para la hora programada, como se ve en la imagen anterior, se ve que se riega automáticamente de la siguiente manera:

S1= 03 veces pero tiempos cortos (2 minutos)

S2=02 veces pero tiempos más largos (5.3 minutos)

S3=02 veces pero tiempos más cortos a comparación de S2 (4.0 minutos)

Es así que para el riego del cuadro N° 8 los tiempos son:

Cuadro 8: Resultados obtenidos a partir del cuadro N°7.

<b>Para el primer riego</b>			
	<b>S1</b>	<b>S2</b>	<b>S3</b>
<b>minutos</b>	2.0	5.3	4.00
<b>nro veces</b>	03	02	02

*Fuente: Elaboración propia.*

Donde se verifica que entre las 18:00 y las 19:00:

S1, se regó 03 veces en diferentes momentos haciendo un total de 2.0min

S2, se regó 02 veces en diferentes momentos haciendo un total de 5.3min

S3, se regó 02 veces en diferentes momentos haciendo un total de 4.0min

Se nota claramente que el riego sub-superficial es de mayor frecuencia que el riego superficial localizado.

### 5.3.15. Manual del controlador de riego.

#### 5.3.15.1. Partes del controlador de riego:

Consta de las siguientes partes:

**Imagen 1: Partes del controlador electrónico de riego.**

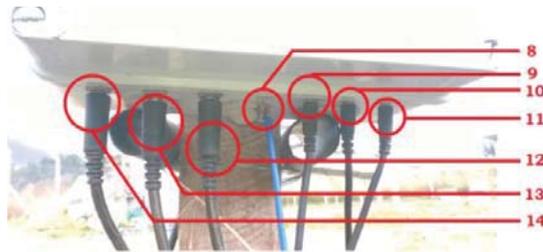


*Fuente: Elaboración propia*

#### **Descripción:**

- 1 → Conector de la fuente de alimentación eléctrica de 220Vac.
- 2 → Interruptor de encendido (1) y apagado (0) del controlador.
- 3 → Pantalla LCD del controlador de 2x16, con retro-iluminación.
- 4 → Botón de control de decremento para configuración de parámetros.
- 5 → Botón de control de incremento para configuración de parámetros.
- 6 → Botón de control de configuración o MODO, que permite entrar a los diferentes modos del controlador.
- 7 → Sólcalo para memoria microSD de 4GB.

**Imagen 2: Vista de la parte inferior del Controlador electrónico de riego**



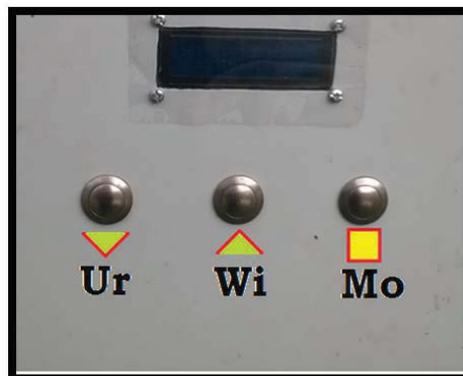
*Fuente: Elaboración propia*

**Descripción:**

- 8 → Conector de puesta a Tierra.
- 9 → Entrada y Conector estéreo de 3.5mm, para sensor S1.
- 10 → Entrada y Conector estéreo de 3.5mm, para sensor S2.
- 11 → Entrada y Conector estéreo de 3.5mm, para sensor S3.
- 12 → Entrada y Conector de 6.35 mm, para control de electroválvula 1.
- 13 → Entrada y Conector de 6.35 mm, para control de electroválvula 2.
- 14 → Entrada y Conector de 6.35 mm, para control de electroválvula 3.

**5.3.15.2. Funcionamiento de los botones de control:**

**Imagen 3: Vista de la parte frontal del controlador electrónico de riego**



*Fuente: Elaboración propia*

El equipo tiene dos etapas:

La primera: Durante el encendido

La segunda: En pleno funcionamiento

**a) Durante el encendido.**

Solamente durante el encendido es posible CONFIGURAR el equipo y cambiar algunos parámetros a través de los botones “Ur”, “Wi” y “Mo”.

Para lo cual se procede de la siguiente manera:

- Se enciende el equipo a través del interruptor de encendido.
- La pantalla mostrará: “Tarpuntay System”, durante 3 segundos.
- Seguidamente la pantalla mostrará “Morankichu?”
- Si no se presiona ningún botón, el equipo arrancará normalmente con la configuración que en ese momento tenga.
- Si por lo contrario, para configurar el equipo, se presiona el botón “**Mo**”, hasta cuando la pantalla muestre: “Suyay!!!”
- Es cuando se tiene que DEJAR de presionar el botón “**Mo**”.
- Seguidamente la pantalla mostrará los parámetros que pueden ser decrementados o incrementados en su valor con los botones “**Ur**” y “**Wi**”, respectivamente.
- Los parámetros que son modificables son:  
Sp1, Sp2, Sp3, Variación, SlowSampling, FastSampling, PachaOn, TuyOn, PachaOFF, TuyOFF.
- Seguidamente se muestra en la pantalla: “Pachatari?”
- Si no se presiona “Mo”, el encendido prosigue.
- En caso se presiones “Mo”, mientras la pantalla sigue mostrando “Pachatari?”.
- Se entra en el modo de configuración de la fecha y la hora del sistema.
- Los parámetros que se pueden incrementar o disminuir en este caso son:  
Pacha, Tuy, Ch’illmiy, P’unchay, Seq’eP’unchay, Killa, y Wata, los que son mostrados secuencialmente en la pantalla LCD del controlador.

## Descripción de los parámetros:

<b>Sp1,</b>	Es el valor de humedad volumétrica deseado para la parcela 1.
<b>Sp2,</b>	Es el valor de humedad volumétrica deseado para la parcela 2.
<b>Sp3,</b>	Es el valor de humedad volumétrica deseado para la parcela 3.
<b>delta,</b>	Es caída de humedad para activar riego.
<b>SlowSampling,</b>	Cambia el intervalo de tiempo de registro de datos, cuando el sistema NO está regando.
<b>FastSampling,</b>	Cambia el intervalo de tiempo de registro de datos, cuando el sistema SI está regando.
<b>PachaOn,</b>	Es la hora en el que se habilita el riego
<b>TuyOn,</b>	Es el minute de la hora en el que el riego esta "HABILITADO"
<b>PachaOFF,</b>	Es la hora en el que se DESHABILITA el riego
<b>TuyOFF.</b>	Es el minute de la hora en el que el riego esta "DESHABILITADO"

### b) En pleno funcionamiento.

Quando el equipo está en pleno funcionamiento, ya no es posible configurar ni cambiar ningún parámetro del equipo, pero si es posible VISUALIZAR los parámetros de configuración a través del botón "**Mo**".

En pleno funcionamiento, se puede cambiar lo que muestra el display a través del botón "Mo".

Siendo dichos parámetros los siguientes:

SP, PachaOn, PachaOFF, DMA, Valvulas, SDbIt, ClockBIt, JMBit, |Acc1|Acc2|Acc3|, Variación.

## **Descripción:**

SP: Son los valores de humedad en unidades del equipo, que están programados para regar, superar este valor desactiva el riego.

PachaOn: Muestra la hora configurada a la cual el riego se Habilita.

PachaOFF: Muestra la hora configurada a la cual el riego se Deshabilita.

DDMMAA: Muestra la hora y fecha del sistema.

Valves: Muestra la orden del equipo para las electroválvulas, si es "1", electroválvula de la parcela 1, tiene que estar activa, es decir, estar en riego. Lo mismo para las otras dos electroválvulas.

SDbit: Este es un auxiliar, cada vez que el sistema guarda un dato en la memoria microSD de la humedad y demás parámetros. El valor de SDbit, cambia su valor, es decir, de 1 a 0 y si está en 0 a 1. Sirve para verificar que sí se están guardando los datos correctamente en la memoria, porque a veces pasa que puede que la memoria no esté bien insertada en el zocalo entonces no registra ninguna información.

JMBit: Es un valor o bien 0 o bien 1, cuando es cero, significa que el sistema no está habilitado, y el sistema nunca regará. Para alternar su valor, se tiene que hacer una llamada celular al equipo, con el chip correcto.

ClockBit: Este también es un valor binario. Cuando está en 0, significa que la configuración de la hora hace que el sistema esté DESHABILITADO PARA REGAR y viceversa cuando está en 1, significa que el equipo está en la hora programada y está HABILITADO para regar.

|Acc1| Acc2| Acc3|: Donde Acc es un valor numérico en minutos, en condiciones correctas de operación, significa que es el tiempo que se ha irrigado en cada parcela respectivamente.

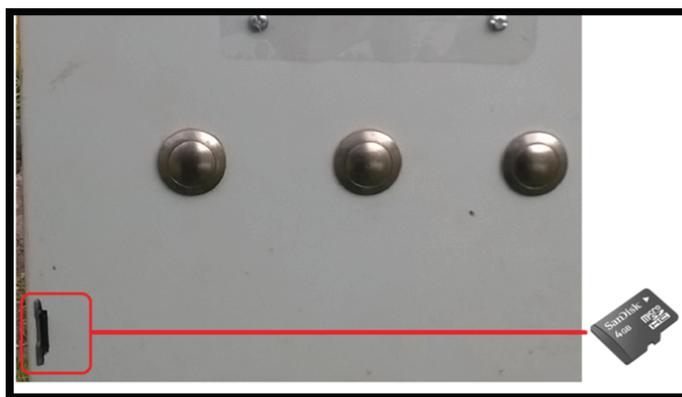
### 5.3.15.3. Registro de la información en la memoria microSD.

El controlador electrónico de riego tiene incorporado un zócalo para memoria microSD. Dispositivo en el que se registra la información de la humedad del suelo, acompañado otros datos importantes como son:

Hora (hh mm ss), Fecha (Dia Mes Año), Humedad programada (Sp1, Sp2, Sp3), Valor de los acumuladores de tiempo de riego (Acc1, Acc2, Acc3), Es estado del bit de control por celular (JMbit), El estado del bit de contro por hora (ClkBit), el tiempo transcurrido en mili segundos (ms).

Estos datos se guardan en la memoria microSD, cada minuto en un formato \*.txt, con el nombre de TARPUY, en formato estándar.

**Imagen 4: La memoria microSD en el controlador de riego.**



*Fuente: Elaboración propia*

### 5.3.15.4. Lectura de los datos de la memoria microSD.

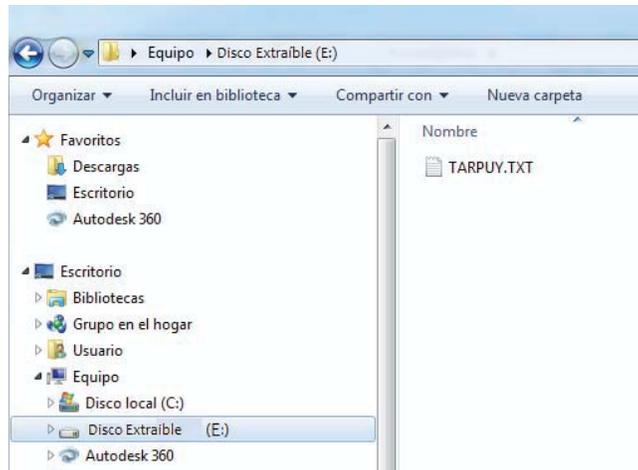
Se apaga el equipo controlador de riego, seguidamente se extrae la memoria microSD presionándolo hasta oír un sonido Click.

Seguidamente se introduce el microSD en una tarjeta lectora de microSDs estándar.

Seguidamente se inserta en un computador convencional con puerto USB y con Sistema operativo WINDOWS, para posteriormente abrir el archivo con MicroSoft Excel.

Una vez introducido en el computador, se mostrará el archivo TARPUY.TXT, archivo en el que se encuentra el registro de los datos.

**Figura 18: Visualización del archivo de registro de datos.**

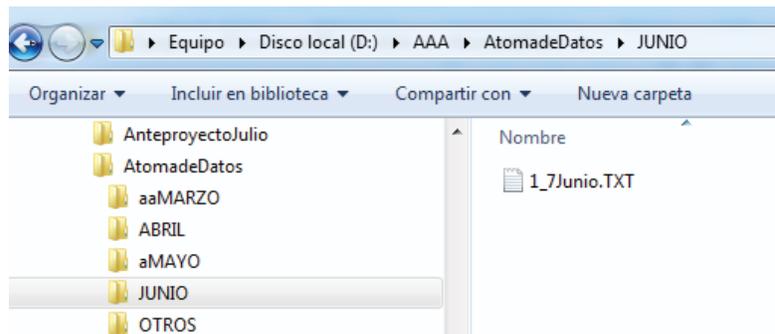


*Fuente: Elaboración propia*

#### 5.3.15.5. Abriendo los datos en excel

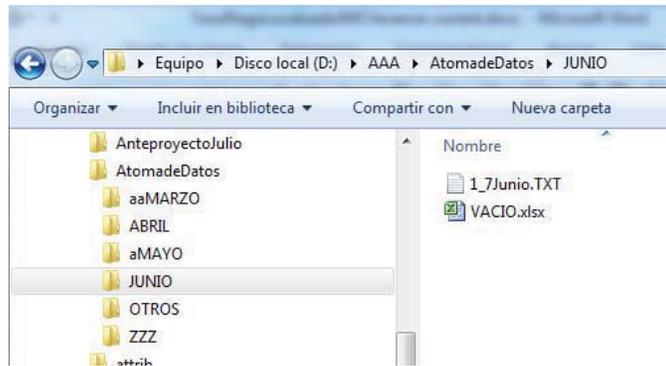
Para lo cual se procede:

**Figura 19: Cambio del nombre del archivo TARPUY.TXT.**



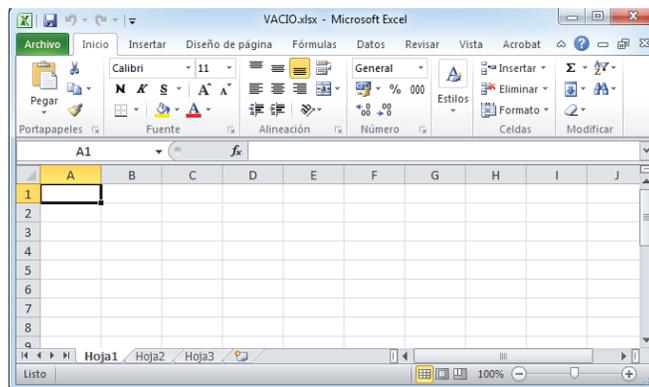
*Fuente: Elaboración propia*

**Figura 20: Creación de un archivo temporal en Excel, llamado Vacio.xlsx.**



*Fuente: Elaboración propia*

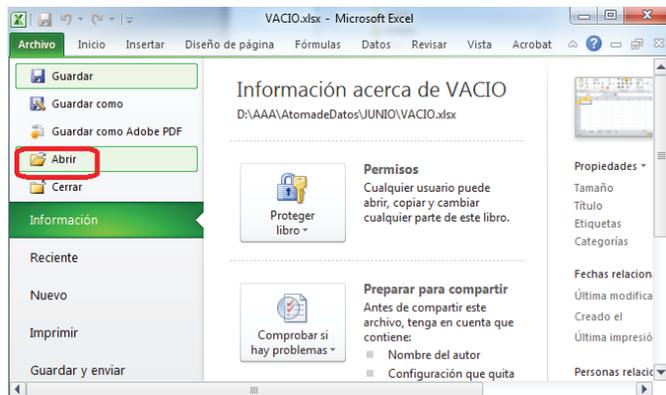
**Figura 21: Se abre el archivo recién creado.**



*Fuente: Elaboración propia*

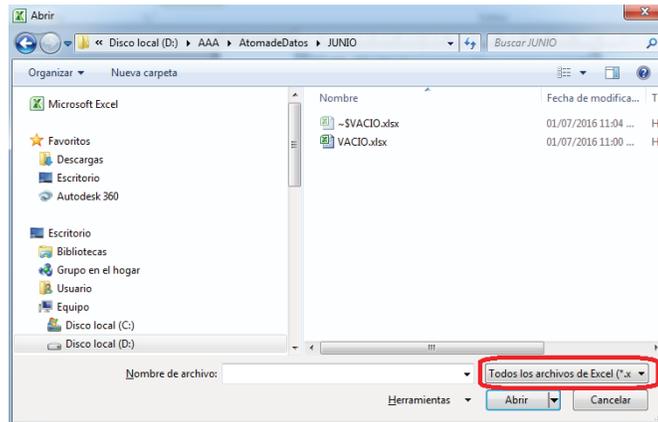
Seguidamente click en ABRIR.

**Figura 22: Procedimiento de Abrir.**



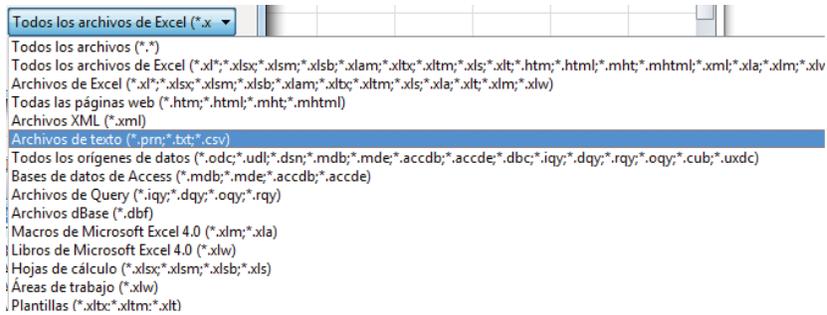
*Fuente: Elaboración propia*

**Figura 23: Cambio del tipo de archivo a abrir.**



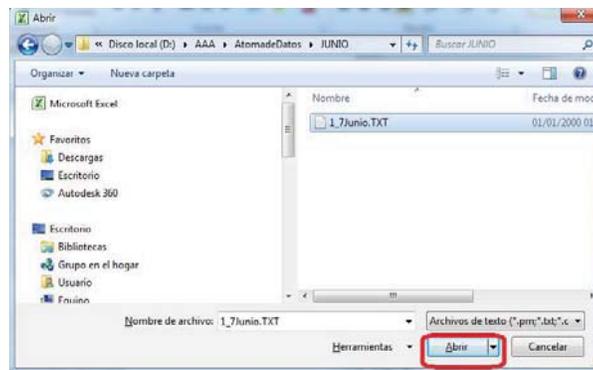
*Fuente: Elaboración propia*

**Figura 24: Selección de “Archivos de texto”**



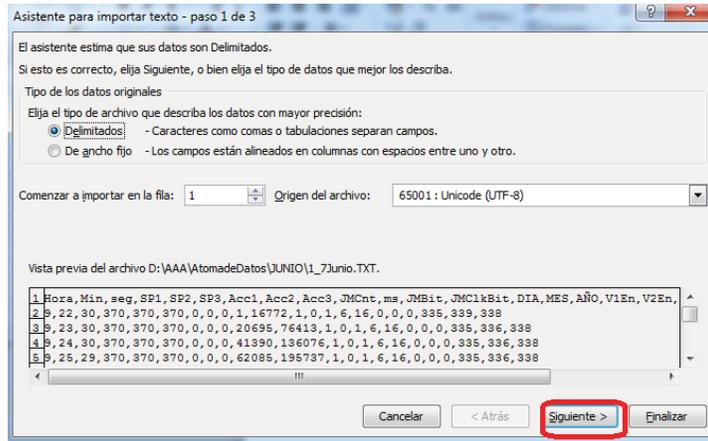
*Fuente: Elaboración propia*

**Figura 25: Procedimiento de abrir el archivo \*.txt**



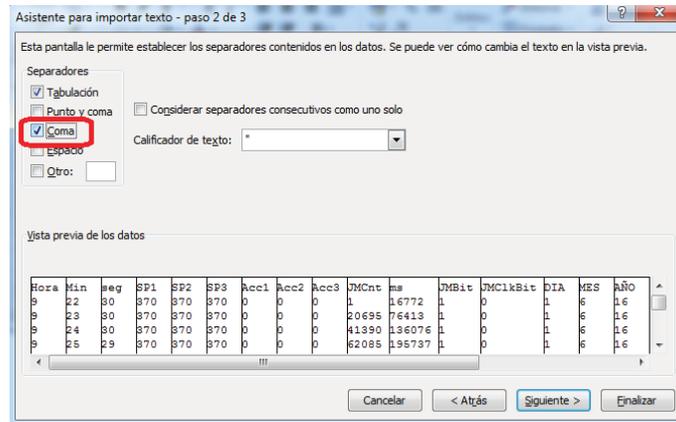
*Fuente: Elaboración propia*

**Figura 26: Siguiete sin hacer ningún cambio**



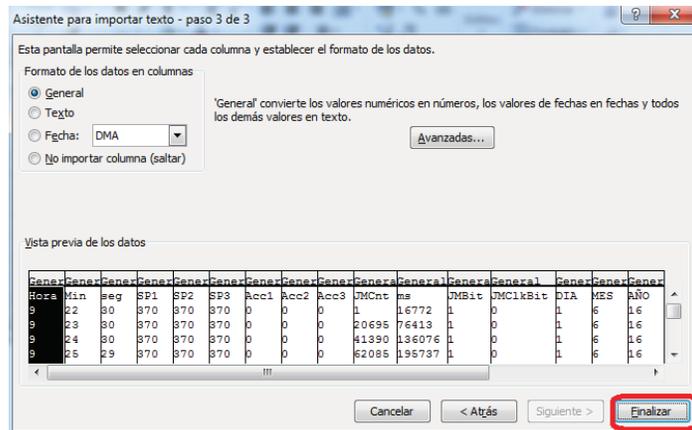
Fuente: Elaboración propia

**Figura 27: Habilitando el Check en separadores “Coma”.**



Fuente: Elaboración propia

**Figura 28: Procedimiento de “Finalizar”.**



Fuente: Elaboración propia

**Figura 29: Vista del archivo del microSD en Excel.**

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Hora	Min	seg	SP1	SP2	SP3	Acc1	Acc2
2	9	22	30	370	370	370	0	0
3	9	23	30	370	370	370	0	0
4	9	24	30	370	370	370	0	0
5	9	25	29	370	370	370	0	0
6	9	26	29	370	370	370	0	0
7	9	27	29	370	370	370	0	0
8	9	28	28	370	370	370	0	0
9	9	29	28	370	370	370	0	0

*Fuente: Elaboración propia*

**Figura 30: Se procede a “Guardar Como”.**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V
1	Hora	Min	seg	SP1	SP2	SP3	Acc1	Acc2	Acc3	JMCnt	ms	JMBit	JMCKbit	DIA	MES	AÑO	V1En	V2En	V3En	S1	S2	S3
2	9	22	30	370	370	370	0	0	0	1	16772	1	0	1	6	16	0	0	0	335	339	338
3	9	23	30	370	370	370	0	0	0	20695	76413	1	0	1	6	16	0	0	0	335	336	338
4	9	24	30	370	370	370	0	0	0	41390	136076	1	0	1	6	16	0	0	0	335	336	338
5	9	25	29	370	370	370	0	0	0	62085	195737	1	0	1	6	16	0	0	0	335	336	338
6	9	26	29	370	370	370	0	0	0	82780	255398	1	0	1	6	16	0	0	0	335	336	338
7	9	27	29	370	370	370	0	0	0	103475	315061	1	0	1	6	16	0	0	0	334	335	338
8	9	28	28	370	370	370	0	0	0	124170	374722	1	0	1	6	16	0	0	0	334	335	338
9	9	29	28	370	370	370	0	0	0	144865	434387	1	0	1	6	16	0	0	0	338	338	338
10	9	30	28	370	370	370	0	0	0	165560	494050	1	0	1	6	16	0	0	0	337	336	338
11	9	31	27	370	370	370	0	0	0	186255	553721	1	0	1	6	16	0	0	0	337	336	338
12	9	32	27	370	370	370	0	0	0	206950	613384	1	0	1	6	16	0	0	0	337	335	338
13	9	33	27	370	370	370	0	0	0	227645	673045	1	0	1	6	16	0	0	0	336	335	338
14	9	34	26	370	370	370	0	0	0	248340	732708	1	0	1	6	16	0	0	0	336	336	338
15	9	35	26	370	370	370	0	0	0	269035	792370	1	0	1	6	16	0	0	0	337	335	338

*Fuente: Elaboración propia*

Preferentemente con el mismo nombre propuesto del archivo. txt.

**5.3.15.6. Procesamiento del archivo en hoja de cálculo, de los datos registrados en la memoria microSD.**

Una vez abierto el archivo en Excel, del registro de datos que fueron obtenidos de del registro en la memoria microSD, se procede a hacer el análisis de los datos contenidos, como por ejemplo, generar un gráfico de la variación de la humedad del suelo en el lapso de tiempo de almacenamiento de los datos.

Adicionalmente para un mejor análisis, con los datos disponibles, es posible graficar el momento de riego, de modo que es más fácil el análisis de la variación de la humedad.

### 5.3.16. Rendimiento del cultivo en gr/planta

Luego de cosechar las lechugas de las tres parcelas, se procedió a pesarlas, para lo cual se quitó la parte correspondiente a la raíz, y para el pesado se utilizó una balanza electrónica.

Fotografía 48. Registro de pesos unitarios de lechuga



Fuente: Elaboración propia

Hechas las comparaciones, los valores de los rendimientos de las tres parcelas fueron similares como se esperaba.

Estos rendimientos pueden ser referidos a una hectárea mediante la multiplicación del número de plantas por hectárea.

## VI. RESULTADOS

### 6.1. Demanda de agua.

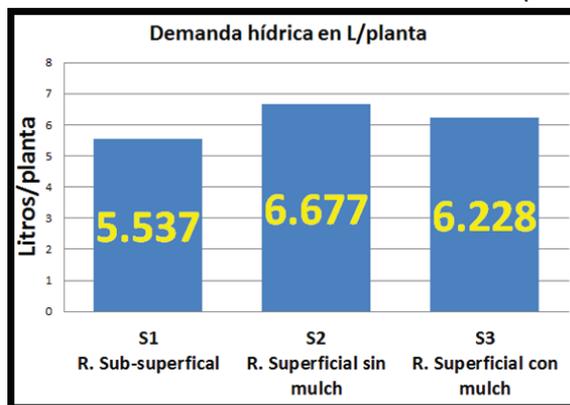
El contenido de agua de los tres contenedores del agua de riego, desde el momento del trasplante hasta el momento de la cosecha (78 días), fue pesado y totalizado obteniéndose los resultados esperados. Dicho resumen de pesos es precisamente la demanda hídrica de cada una de las parcelas instaladas en los lisímetros.

Cuadro 9: Resumen del pesado de los bidones del agua de riego.

<b>Pesado del agua</b>	<b>S1</b> sub-superficial	<b>S2</b> superficial sin mulch	<b>S3</b> superficial con mulch
<b>Peso en gramos (g)</b>	5537	6677	6228

*Fuente: Elaboración propia.*

Gráfico 9: Resultados de la demanda hídrica total (78 días)



*Fuente: Elaboración propia.*

Cuadro 10: Resultados de las diferencias de demanda hídrica, comparativos.

<b>Diferencia</b>	<b>L/planta</b>
<b>S2 - S1</b>	1.14
<b>S3 - S1</b>	0.691
<b>S2 - S3</b>	0.449

*Fuente: Elaboración propia.*

### 6.1.1. Diferencias porcentuales y discusión.

#### 1. Riego sub-superficial con Riego superficial sin mulch. (S2 vs S1)

Demanda de agua con riego sub-superficial (S1)=5.537L

Demanda de agua con riego superficial (S2)=6.677L

$$Diferencia\% = 100x \frac{(6.677 - 5.537)}{5.537}$$

Diferencia%=20.58%.

La demanda hídrica del riego localizado sin mulch (S2), es mayor que la del riego localizado sub-superficial S1 en 20.58%.

#### 2. Riego sub-superficial con Riego superficial con mulch. (S3 vs S1)

Demanda de agua con riego sub-superficial (S1)=5.537L

Demanda de agua con riego superficial (S3)=6.228L

$$Diferencia\% = 100x \frac{(6.228 - 5.537)}{5.537}$$

Diferencia%= 12.14%

La demanda hídrica del riego localizado superficial sin mulch (S3), es mayor que la del riego localizado sub-superficial (S1) en 12.47%.

#### 3. Riego superficial sin mulch y Riego superficial con mulch. (S2 vs S3)

Demanda de agua con riego superficial (S2)= 6677

Demanda de agua con riego superficial (S3)=6228

$$Diferencia\% = 100x \frac{(6.677 - 6.228)}{6.228}$$

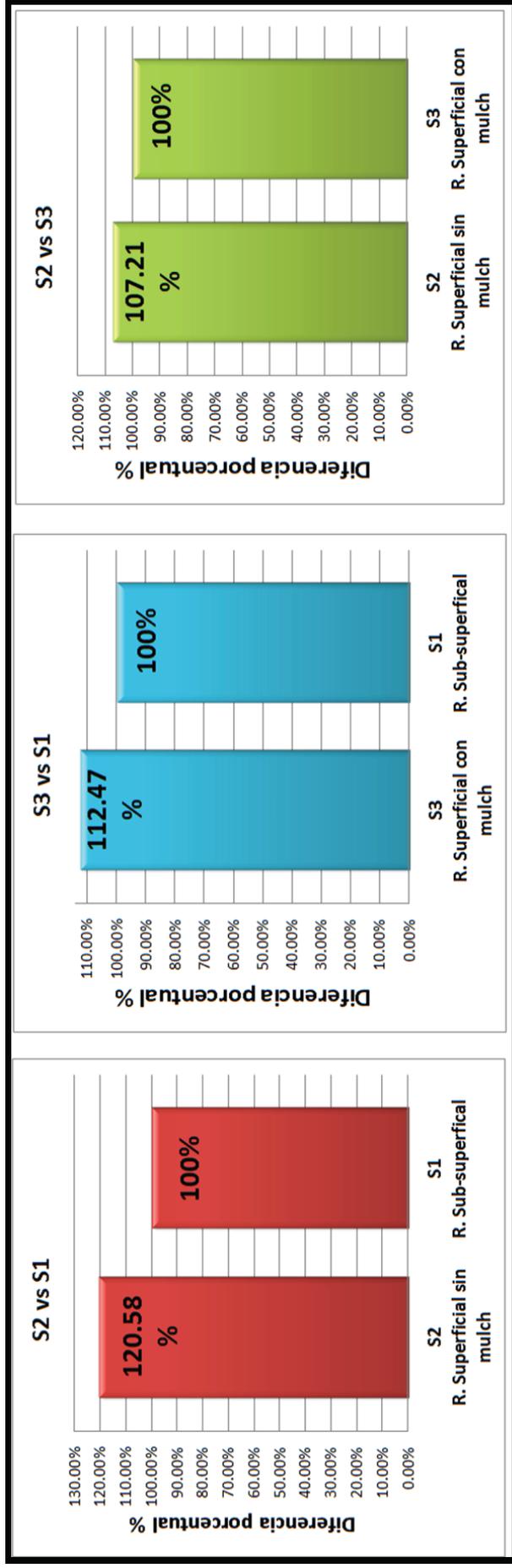
Diferencia%= 7.21%

La demanda hídrica del riego localizado superficial sin mulch (S2), es mayor que de la del riego localizado con mulch S3 en 7.21%.

#### 4. Discusión.

En la región del Cusco no existen trabajos relacionados donde haya estas comparaciones, pero en Kansas, Estados Unidos, existen resultados comparativos entre SDI y riego localizado por goteo superficial, para el cultivo de maíz, en el que comparativamente se pudo demostrar una diferencia en el ahorro de agua del 25%.

Gráfico 10: Gráfico de las diferencias porcentuales.



Fuente: *Elaboración propia.*

**Explicación:** Los tres gráficos que se observan, son comparativos llevados al porcentaje.

Vemos que S2 consumió más agua que S1, en un 20.58%

Vemos que S3 consumió más agua que S1, en un 12.47%, finalmente:

Vemos que S2 consumió más agua que S3, en un 7.21%.

S1 corresponde al riego localizado sub-superficial, S2 al riego localizado superficial sin mulch y S3 al riego localizado superficial con mulch.

## 6.2. Resultados de la medición de la humedad volumétrica.

El sensor FDR, permite conocer la humedad volumétrica en tiempo real del suelo, es decir, la humedad instantánea. Para lo cual el fabricante proporciona la siguiente ecuación:

$$\Theta = 0.494 \times \text{Voltios} - 0.554$$

(Decagon, 2015)

De donde:

$\Theta$ : Representa la humedad volumétrica del suelo en decimales. Se multiplica por 100 para expresarlo en porcentaje (%).

Voltios: Es el voltaje que entrega como salida el sensor cuando éste está energizado.

## 6.3. Resultados del diámetro del bulbo de humedecimiento.

El diámetro del bulbo de humedecimiento, para un tiempo de riego de 10 minutos, resultó 16 centímetros, es decir con un radio de 8 centímetros.

## 6.4. Resultados de la determinación del coeficiente de uniformidad.

**$Q_{total}$ : Promedio del total de peso de los 16 emisores medidos.**

$$\overline{q_{total}} = 162.4375$$

**$q_{25}$ : Promedio de la cuarta parte de los emisores con menos descarga.**

$$\overline{q_{25}} = 158.25$$

$$CU = \frac{158.25}{162.4375}$$

$$CU\% = 97.42\% \text{ (Excelente uniformidad).}$$

## 6.5. Relación entre Rendimiento por planta y Demanda hídrica

### 6.5.1. Rendimiento del cultivo por planta.

En la cosecha se cortó la zona radicular a partir del cuello para el pesado correspondiente.

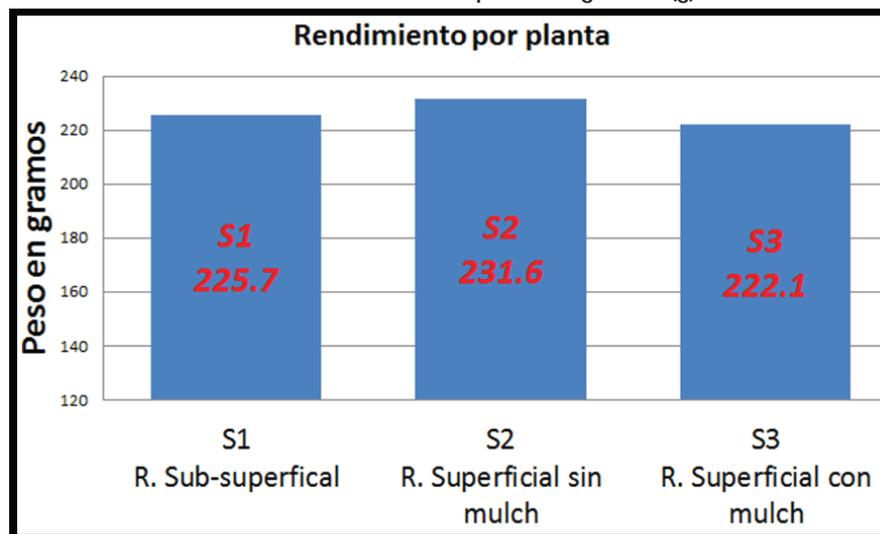
Se tomó 10 plantas de cada parcela y se procedió a pesar los mismos, luego se calculó el promedio, mostrándose los resultados en el cuadro 11.

Cuadro 11: Peso en gramos de 10 lechugas cosechadas de los tres lisímetros.

N	S1	S2	S3
1	225g	242 g	212 g
2	221 g	230 g	221 g
3	220 g	223 g	214 g
4	224 g	232 g	231 g
5	230 g	235 g	220 g
6	224 g	231 g	221 g
7	223 g	227 g	232 g
8	225 g	231 g	225 g
9	231 g	233 g	223 g
10	234 g	232 g	222 g
<b>Promedio</b>	<b>225.7 g</b>	<b>231.6 g</b>	<b>222.1 g</b>

*Fuente: Elaboración propia.*

Gráfico 11: Rendimiento planta en gramos (g).



*Fuente: Elaboración propia.*

### 6.5.2. Gramos de lechuga producida por litro de agua demandada (g/L).

Se obtiene la gráfica de la relación entre el rendimiento por planta y la demanda hídrica determinada.

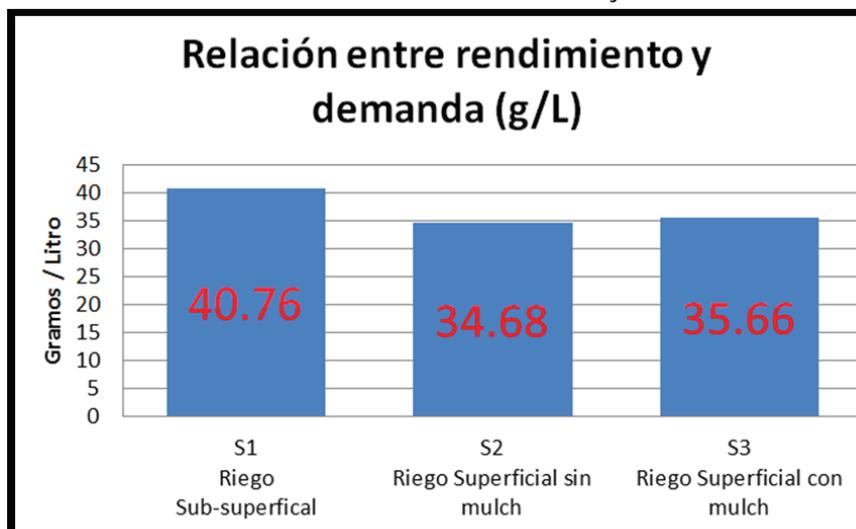
Para lo cual usamos los datos que se tiene en el cuadro 12.

Cuadro 12: Relación entre el rendimiento y la demanda hídrica de cada parcela.

<b>Rendimiento vs demanda hídrica</b>	<b>S1 Riego Sub- superficial</b>	<b>S2 Riego Superficial sin mulch</b>	<b>S3 Riego Superficial con mulch</b>
Rendimiento g/planta	225.7	231.6	222.1
Demanda hidrica L/planta	5.537	6.677	6.228
<b>Relacion: g/L</b>	<b>40.76215</b>	<b>34.68624</b>	<b>35.6615286</b>

*Fuente: Elaboración propia.*

Gráfico 12: Relación entre el rendimiento del cultivo y la demanda hídrica.



*Fuente: Elaboración propia.*

## 6.6. Costos de instalación del sistema de riego.

En el cuadro 13, se muestra el detalle del costo que tomó la realización de la presente tesis de investigación.

Cuadro 13. Costos de instalación del sistema de riego automatizado en soles S/.

	CANT	UNID	P.U.	COSTO
<b>Sistema de Bombeo</b>				<b>516.5</b>
Accesorios para su funcionamiento	1	und	186.5	186.5
Electrobomba 0.5HP	1	und	210	210
Presostato para riego por goteo	1	und	120	120
<b>Cabezal de riego y sistema de riego</b>				<b>1439.5</b>
Válvula de aire 1" doble efecto	1	und	90	90
Filtro azud de anillos	1	und	90	90
Unión T de 1"	2	und	15	30
Unión en codo de 1"	1	und	14	14
Manómetro de 6 bar con silicona para riego por goteo	1	und	50	50
Conector para manguera de 1" con rosca macho	5	und	11	55
Conector para manguera de 1" con rosca simple	5	und	10	50
Válvula esférica PVC para riego por goteo	2	und	15	30
Regulador de presión de 1.5Bar para riego por goteo	1	und	95	95
Manguera de polietileno de 1" para riego por presión	50	m	3.5	175
Manguera de polietileno de 1/2" para riego por presión	12	m	2.5	30
Drenadores para manguera de 16mm para riego por goteo	6	und	20	120
Acople de reducción de 1" a 1/2" rosca macho para riego por goteo	3	und	4	12
Tapa final de 1/2" para manguera de riego por presión	3	und	10	30
Unión de 16mm en codo escamado para manguera de riego por goteo	78	und	2.5	195
Manguera ciega de 16mm para riego por goteo	20	m	2	40
manguera de goteo Naan Dain Jan Modelo Amnon CNL 16mm	100	m	2.5	250
Acople en codo de 1/2" con empalme para tubo de 1/2"	3	und	14	42
Niple de unión con rosca macho de 1/2"	3	und	3	9
Unión de empalme rápido de 1"	1	und	13	13
Conector escamado de 1/2"	3	und	3	9
Conector escamado de 1"	3	und	3.5	10.5
<b>Electricidad</b>				<b>69.7</b>
Cable Nro 14 Indeco THW	38	m	1.5	57
Borneras y pila	1	und	12.7	12.7
<b>Controlador de riego</b>				<b>1704</b>
Tarjeta principal para control de riego	1	und	199	199
Case para tarjeta controladora	1	und	45	45
Fuente de voltaje de 5V 2.5 A para tarjeta principal	1	und	20	20

Regulador de voltaje DC-DC 5A para controlador de riego	1 und	17	17
Elevador de voltaje DC-DC 2A para controlador de riego	1 und	15	15
Regulador de voltaje DC-DC 8A para controlador de riego	1 und	40	40
Elevador de voltaje DC-DC 2.5A para controlador de riego	1 und	12	12
Power jack interruptor + fusible para controlador de riego	1 und	18	18
Protoshield para controlador de riego	1 und	25	25
Kit cable dupont macho-macho	2 und	9	18
Shield GSM para controlador de riego	1 und	168	168
Patallas de LCD 16x2	1 und	9	9
MSB 16GB sony para controlador	1 und	25	25
ADC Para tarjeta controladora de riego	2 und	35	70
Relay de estado sólido para tarjeta controladora de riego	1 und	39	39
Adaptador de LCD para tarjeta de controladora de riego	2 und	7	14
Módulo RTC de precisión ds3132 para controlador de riego	1 und	25	25
Cargador de batería interna del controlador de riego	1 und	9	9
Tarjetas auxiliares de prueba	1 und	927	936
<b>Pasaje para cotización y compra de sensores en lima</b>			<b>100</b>
Lima cusco	1 pasaje	100	100
<b>Actuadores</b>			<b>133</b>
Electroválvula de 1" Naan DanJain	1 und	65	65
Válvula eléctrica 24VAC MOD. 100DV rain bird	1 und	68	68
<b>SENSORES</b>			<b>2151.2</b>
Sensor de nivel de Líquidos ON/OFF para controlador de riego	1 und	10	10
Sensor de nivel de líquidos para controlador de riego	1 und	10	10
Sensores de humedad Decagon GS1	3 und	710.4	2131.2
<b>IMPRESIONES, ANILLADOS.</b>			<b>335.6</b>
impresión y anillado	1 und	26	26
impresión y anillado	1 und	26.5	26.5
Impresión y espiralado	1 und	24	24
impresión y anillado	1 und	25.8	25.8
Impresión y anillado de tesis	1 und	50	50
Impresión	1 und	27.3	27.3
5 juegos de impresión y anillado de tesis	1 und	150	150
Ploteo B/N	1 und	6	6
<b>Adicionales y herramientas</b>			<b>605</b>
Mano de obra de apoyo	10 dia	30	300
Alquiler de carro para llevar maquina	2 hora	25	50
Empastado	3 und	35	105
impresión volumen corregido	3 und	50	150
<b>TOTAL</b>		<b>S/.</b>	<b>7054.5</b>

Fuente: Elaboración propia

## CONCLUSIONES.

1. La demanda de agua del riego localizado superficial convencional (6.677 L/planta) fue mayor que la del riego localizado sub-superficial (5.537L/planta), porcentualmente la diferencia fue de 20.06%.
2. El diámetro del bulbo de humedecimiento resultó de 16 centímetros, es decir con un radio de 8cm para un tiempo de riego de 10 minutos, para el riego localizado superficial.
3. El coeficiente de uniformidad de descarga de los emisores de la manguera de goteo utilizada resultó igual a 97.42%, es decir, una uniformidad **excelente** de acuerdo a la tabla de coeficientes de uniformidad de Merriam & Keller.
4. La relación rendimiento por planta versus demanda hídrica por planta, resultó mayor para el riego localizado sub-superficial (40.76 g/L), es decir, por cada litro de agua irrigado se produjo 40.76g de lechuga aprovechable. Para el riego localizado superficial ésta relación resultó 34.68g/L y para el riego localizado superficial con mulch plástico dicha relación resultó 35.66g/L.

## 5. RECOMENDACIONES

1. Para futuros trabajos de tesis en hortalizas, se recomienda hacer la siembra en bandejas de propagación para luego trasplantar y no comprar plántulas que no están garantizadas sobre enfermedades de suelo que pudieran tener.
2. Del mismo modo, se recomienda enfáticamente que en caso de cultivo de lechugas, no regar durante el día en pleno sol.
3. Si se va a hacer un trabajo con sensores de humedad de suelo, en lo que respecta a la instalación del sensor, se recomienda cernir primero el sustrato, para evitar piedrecillas de más de 1cm de diámetro, ya que éstos interfieren en la lectura de la humedad.
4. En futuros trabajos de tesis, se recomienda realizar el comparativo con un cultivo de mayor profundidad radicular ejemplo maíz.
5. Para trabajos de tesis con lechuga y riego por goteo, se recomienda no instalar el gotero o emisor, en contacto con la planta de lechuga, de lo contrario se generan problemas de pudrición del cuello y mal aprovechamiento del agua de riego.

## BIBLIOGRAFÍA

1. **Barrios, N. E. (Agosto de 2004).** *EVALUACIÓN DEL CULTIVO DE LA LECHUGA, Lactuca sativa L. BAJO CONDICIONES HIDROPÓNICAS EN PACHALÍ.* Recuperado el 01 de Octubre de 2016, de USAC TRICENTENARIA-GUATEMALA:  
[http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/01/01\\_2071.pdf](http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/01/01_2071.pdf)
2. **Beláustegui, S. (2003).** *Hojas Técnicas* (Primera ed.). Buenos Aires - Argentina: Editorial P&R Argentina.
3. **Berlijn, J. D. (2006).** *Riego y Drenaje.* Mexico D. F.: Trillas S. A.
4. **Bernardo, S. (1995).** *Manual de irrigacion* (Sexta ed.). Minas Gerais - Brasil: Universidad Federal de Vicosa.
5. **Bohorquez, J. M., & Ruiz, N. (15 de Abril de 2011).** *Evaluaciones del riego localizado para conseguir un manejo uniforme y eficiente del agua.* Recuperado el 31 de Agosto de 2016, de [http://www.magrama.gob.es/ministerio/pags/Biblioteca/Revistas/pdf\\_Vrural\\_%2FVrural\\_2011\\_327\\_46\\_51.pdf](http://www.magrama.gob.es/ministerio/pags/Biblioteca/Revistas/pdf_Vrural_%2FVrural_2011_327_46_51.pdf)
6. **Campbell, C. S. (2014).** *Decagon Brasil.* Recuperado el 13 de 09 de 2016, de Water Content Measurement Methods and Field Applications: <http://www.decagon.com.br/assets/Virtual-Seminar-Slides/03252010.pdf>
7. **Campbell, C. S. (2014).** *Decagon Brasil.* Recuperado el 13 de 09 de 2016, de Dielectric Soil Moisture Measurement: <http://www.iai.ga.a.u-tokyo.ac.jp/mizo/seminar/colin.pdf>
8. **Canto, C. (09 de SETIEMBRE de 2016).** *AUTOMATIZACIÓN CONCEPTOS GENERALES.* Recuperado el 11 de SETIEMBRE de 2016, de UNIVERSIDAD AUTONOMA DE SAN LUIS DE POTOSI:  
[http://galia.fc.uaslp.mx/~cantocar/automatas/PRESENTACIONES\\_PLC\\_PDF\\_S/3\\_AUTOMATIZACION\\_GENERAL.PDF](http://galia.fc.uaslp.mx/~cantocar/automatas/PRESENTACIONES_PLC_PDF_S/3_AUTOMATIZACION_GENERAL.PDF)
9. **Cisneros, R. (2003).** *Apuntes de la materia de riego y drenaje* (Primera ed.). San Luis Potosí - México: Publicado por la Universidad Autónoma de

San Luis Potosí.

10. **Decagon, D. (12 de Mayo de 2015).** *Decagon devices*. Recuperado el 2015 de Septiembre de 20, de Decagon devices: [http://manuals.decagon.com/Manuals/14640\\_GS1\\_Web.pdf](http://manuals.decagon.com/Manuals/14640_GS1_Web.pdf)
11. **FAO. (2006).** *Evapotranspiración del cultivo, guía para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Roma - Italia: Estudio FAO Riego y drenaje.
12. **Fuentes, J. L. (2003).** *Técnicas de riego*. Madrid: Mundi Prensa.
13. **García Fontes, J. A. (2013).** *Introducción a la Automatización*. Recuperado el 11 de NOVIEMBRE de 2016, de Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática: [http://mapir.isa.uma.es/varevalo/pdf/Tema%2007%20-%20Introducci%C3%B3n%20a%20la%20Automatizaci%C3%B3n%20Industrial\\_mod.pdf](http://mapir.isa.uma.es/varevalo/pdf/Tema%2007%20-%20Introducci%C3%B3n%20a%20la%20Automatizaci%C3%B3n%20Industrial_mod.pdf)
14. **Gavande, S. (1972).** *Física de suelos principios y aplicaciones* (Primera ed.). México D.F. - México: Editorial Limusa - Wiley.
15. **Gurovich, L. A. (1999).** *Riego superficial tecnificado*. México D. F.: Alfaomega.
16. **Halsuet, P., & Miñambres, M. S. (2005).** *La Lechuga manual para su cultivo en agricultura ecológica*. Navarra: Bio Lur Navarra.
17. **Irrigation Direct. (21 de Setiembre de 2011).** *Irrigation Direct*. (USA, Editor) Recuperado el 20 de Enero de 2016, de Drip Irrigation History & Benefits: <http://www.irrigationdirect.com/tutorial/irrigation/view/drip-irrigation-history-and-benefits/expert-advice/id/6/>
18. **Lopez Lopez, G., Magaña Lira, N., & Vasquez Romero, C. (2014).** *Programa integral de desarrollo rural 2014*. Recuperado el 25 de Agosto de 2016, de SAGARPA: <http://www.sagarpa.gob.mx/Delegaciones/distritofederal/Documents/AgriculturaF/LECHUGA.pdf>

19. **Marciel Garcia, C. E. (01 de Abril de 2012).** *Slideshare*. Obtenido de Slideshare: <https://es.slideshare.net/OmarHernandez48/capacitancia-13022160>
20. **Martin de Santa Olalla, F., & De Juan Valero, J. A. (1993).** *Agronomía del Riego*. Madrid: Mundi Prensa.
21. Martín de Santa Olalla, F., López Fuster, P., & Calera Belmonte, A. (2005). *Agua y agronomía*. Madrid: Mundi-Prensa.
22. **Martinez Reyes, J. C. (23 de Febrero de 2012).** *SlideShare*. Recuperado el 24 de 09 de 2016, de Sensores y Actuadores: <http://es.slideshare.net/ErendiraAvalosMorales/sensores-y-actuadores-11723590>
23. **Merriam, J. L., & Keller, J. (1978).** *Farm irrigation system evaluation: A guide for management*. Utah: Utah Uneversity.
24. **NaanDanJain. (01 de 04 de 2012).** *Helitene*. Recuperado el 01 de 11 de 2015, de Amnon Drip PC CNL: [http://www.helitene.pt/media/pt/NDJ\\_Drip\\_cat\\_spn\\_AmnonDrip.pdf](http://www.helitene.pt/media/pt/NDJ_Drip_cat_spn_AmnonDrip.pdf)
25. **Ogata, K. (2010).** *Ingeniería de Control moderna*. Madrid: Pearson.
26. **Palomino, K. (2007).** *Riego por goteo*. Lima: Macro EIRL.
27. **Payero, J. O. (2005).** *Nebraska Lincoln EC776*. Recuperado el 10 de 10 de 2016, de Advantages and disadvantages of Subsurface Drip Irrigation: <http://itc.tamu.edu/ec776.pdf>
28. **Perez Porto, J. (2008).** *Definición de*. Recuperado el 12 de Septiembre de 2016, de Definición de Automatización: <http://definicion.de/automatizacion/>
29. **Pizarro, F. (1996).** *Riego localizado de lata frecuencia (RLAF)* (Tercera ed.). Bilbao - España: Ediciones Mundi - Prensa.
30. **Puppo, L. (06 de 07 de 2015).** *Calculo de lámina de riego* . Recuperado el 10 de 11 de 2015, de Canal MGAP: <https://www.youtube.com/watch?v=hs9edqD3eP8>

31. **Rincón, L. (2005).** *La ferirrigación de la Lechuga*. Murcia: Consejería de agricultura y agua de la Región de Murcia.
32. **Rodriguez, H. (2002).** *Métodos de análisis de suelo y plantas* (Primera ed.). México D.F. - México: Editorial Trillas.
33. **Rogrigo Villar, G. (27 de Febrero de 2014).** *slideshare*. Recuperado el 13 de 09 de 2016, de slideshare: <http://es.slideshare.net/LabFerrer/qu-debo-saber-antes-de-comprar-un-sensor-de-contenido-de-humedad-del-suelo>
34. **Salamanca, R. (1984).** *Suelo y fertilizantes* (Primera ed.). Bogotá -: Ediciones Universidad Santo Tomas.
35. **Saldarriaga, J. G. (1994).** *Hidrología aplicada* (Primera ed.). Bogotá - Colombia: Editorial Nomos S.A.
36. **Santos, L. (2010).** *El riego y sus tecnologías* (Primera ed.). Lisboa - Portugal: Editorial Europa América.
37. **University of Arizona. (2001).** *Subsurface Drain Irrigation Demonstration and Research project*. Recuperado el 18 de Enero de 2016, de <http://ag.arizona.edu/crop/irrigation/azdrip/SDI.htm>
38. **Villaroel Fuentes, D. I. (1981).** *Antecedentes bibliográficos sobre diseño, evaluación y manejo de riego por surcos*. Concepción: Universidad de Concepción.

# **ANEXOS**

# ANEXO 01

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO**

84.4  
EJL

- APARTADO POSTAL N° 921 - Cusco - Perú
- FAX: 238156 - 238173 - 232512
- RECTORADO  
Calle Tigre N° 127  
Teléfonos: 222271 - 224891 - 224181 - 254398
- CIUDAD UNIVERSITARIA  
Av. De la Cultura N° 713 - Teléfonos: 228661 - 222812 - 232370 - 232375 - 232226
- CENTRAL TELEFÓNICA: 232398 - 252210  
243835 - 243836 - 243837 - 243838
- LOCAL CENTRAL  
Plaza de Armas s/n  
Teléfonos: 227571 - 225721 - 224015
- MUSEO INKA  
Calle del Almacén N° 103 - Teléfono: 237380
- CENTRO AGRONÓMICO K'AYRA  
San Jerónimo s/n Cusco - Teléfonos: 277145 - 277246
- COLEGIO "FORTUNATO L. HERRERA"  
Av. De la Cultura N° 721  
"Estadio Universitario" - Teléfono: 227192

## FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

### CENTRO DE INVESTIGACION EN SUELOS Y ABONOS (CISA)

#### LABORATORIO ANALISIS DE SUELOS

TIPO DE ANALISIS : FERTILIDAD, CARACTERIZACION Y OTROS ANALISIS.

PROCEDENCIA DE MUESTRA : ESTACION METEOROLOGICA KAYRA SAN JERONIMO-CUSCO.

INSTITUCION SOLICITANTE : JULIO CONCHA VARGAS.

#### ANALISIS DE FERTILIDAD :

Nº	CLAVE	mmhos/cm C.E.	pH	% M.ORG.	% N.TOTAL	ppm P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Ppm K <sub>2</sub> O
01	E.METEOROLOGICO	0.40	7.50	2.93	0.15	53.5	28

#### ANALISIS DE CARACTERIZACION :

No	CLAVE	meq/100 C.I.C.	% CaCO <sub>3</sub>	% ARENA	% LIMO	% ARCILLA	CLASE- TEXTURAL
01	E.METEOROLOGICO	18.54		45	52	3	FRANCO-LIMOSO

#### OTROS ANALISIS :

Nº	CLAVE	% H.E.	% C.C.	g/c.c Da	g/c.c Dr	% PMP	% POROSIDAD
01	E.METEOROLOGICO	29.19	27.86	1.47	2.53	6.86	41.89

CUSCO-K' AYRA, 02 de mayo de 2016

Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco  
Facultad de Ciencias Agrarias  
Centro de Investigación en Suelos y Abonos (CISA)  
Laboratorio de Análisis de Suelos

Ing. Mg. Ricardo Calderón Cuyquechani  
DIRECTOR

FAUSTO YAPURA CONDORI  
ANALISTA EN SUELOS, AGUAS Y PLANTAS

ANEXO 2. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES.

CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES	2015 - 2016												
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Setiembre				
<b>ACTIVIDAD CULTIVO</b>													
1. Instalación de bandejasAlmacigo	X	X	X	X	X								
2. Solarización y aplicación de fungicidas	X	X	X	X	X								
3. Trasplante			X										
4. Seguimiento del cultivo		X	X	X	X	X	X	X					
5. Fumigaciones			X	X	X								
<b>COSECHA</b>													
6. Cosecha de las lechugas						X							
7. Evaluaciones de rendimiento							X						
8. Redacción de Volumen de tesis										X	X	X	X
<b>20. PRESENTACION DEL TRABAJO</b>													

Fuente: Elaboración propia