

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE AGRONOMÍA
CARRERA DE INGENIERIA AGRONÓMICA



TESIS DE GRADO

**OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE REQUERIMIENTO DE AGUA DE
ESPECIES FORRAJERAS (AVENA, CEBADA Y TRITICALE) BAJO EL
SISTEMA DE RIEGO POR PIVOTE CENTRAL, EN LA ESTACIÓN
EXPERIMENTAL CHOQUENAIRA**

VEIMAR CRESPO TIÑINI TAMBO

La Paz – Bolivia

2024

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

OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE REQUERIMIENTO DE AGUA DE ESPECIES FORRAJERAS (AVENA, CEBADA Y TRITICALE) BAJO EL SISTEMA DE RIEGO POR PIVOTE CENTRAL, EN LA ESTACIÓN EXPERIMENTAL CHOQUENAIRA

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

Presentado por:

VEIMAR CRESPO TIÑINI TAMBO

Asesores:

Ph. D. Rene Chipana Rivera

Tribunal Examinador

Ing. MSc. Fanny Bertha Arragan Tancara

Ing. MSc. Carlos López Blanco

Aprobado

Presidente del Tribunal Examinador

La Paz - Bolivia

2024

Dedicatoria

Dedicó con todo mi corazón mi tesis a mi madre Irma Tambo y padre Crespo Tiñini, pues sin ellos no lo había logrado. Su bendición a diario a lo largo de mi vida me protege y me lleva por el camino del bien, por eso les doy mi trabajo en ofrenda por la paciencia y amor Asia mí, se los aprecia y quiere mucho.

Como también me lo dedico a mi persona. por el esfuerzo, paciencia, voluntad y por nunca dejarme vencer por los obstáculos afrontados.

Agradecimiento

A Dios por darme sabiduría, fortaleza, fe y sobre todo por ser mi guía en los momentos difíciles y permitirme concluir esta tarea con satisfacción en el alma.

A mi querida Bolivia, que mediante la Universidad Mayor de San Andrés permite a los jóvenes a acceder a una formación Superior gratuita, dotándoles el mayor instrumento.

A la Carrera de Ingeniería Agronómica, perteneciente a la Facultad de Agronomía de la Universidad Mayor de San Andrés por Acogerme en sus aulas. A todo el plantel docente por la formación recibida.

A la Estación Experimental de Choquenaira y administrativos por su trato generoso y por haberme facilitado la manipulación y estudio del Sistema de Riego por Pivote Central.

A mis asesores Dr. Rene Chipana, por su aceptación y colaboración desinteresada en la ejecución del presente trabajo de investigación.

Al tribunal revisor, Ing. MSc. Fanny Bertha Arragan Tancara, Ing. MSc. Carlos López Blanco, por la revisión del presente trabajo de investigación.

A mis compañeros tesisistas y estudiantes en formación, por su apoyo incondicional en momentos difíciles en mi formación Académica, Agradezco a todas aquellas personas que me apoyaron y ayudaron a poder culminar mi formación Académica.

CONTENIDO GENERAL

CONTENIDO GENERAL.....	IV
INDICE GENERAL.....	V
INDICE DE CUADROS.....	IX
INDICE DE FIGURAS.....	X
INDICE DE ANEXOS.....	XI
RESUMEN.....	XII
SUMMARY.....	XIII

INDICE GENERAL

1	INTRODUCCIÓN.....	1
2	OBJETIVOS	2
2.1	Objetivo general.....	2
2.2	Objetivos específicos	2
3	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	3
3.1	Importancia y utilidad de la los forrajes.....	3
3.1.1	Cebada.....	3
3.1.2	Avena	4
3.1.3	Triticale.....	4
3.2	Siembra.....	4
3.3	Densidad de siembra	5
3.4	Requerimientos del cultivo	6
3.5	Exigencia climática para la producción de forrajes anuales.....	6
3.5.1	Clima	6
3.5.2	Temperatura.....	7
3.5.3	Precipitación.....	7
3.6	Necesidades del suelo para el cultivo	7
3.7	Tipos de sistemas de riego	8
3.7.1	Sistemas de riego por aspersion	8
3.7.2	Sistemas fijos	8
3.7.3	Sistemas semifijos.....	9
3.7.4	Sistemas móviles	9
3.8	Máquina de regar pivote central.....	9
3.9	Componentes principales del sistema de riego por pivot central	10
3.9.1	Pivote	11
3.9.2	Tramos y torres de conducción	11
3.9.3	Aspersores múltiples	12
3.9.4	Caja de control de la torre y cable del tramo	13
3.9.5	Anillo colector y tubo “J”	13
3.9.6	Panel de control	14
3.9.7	Temporizador	15

3.9.8	Unidades motrices.....	15
3.9.9	Sistemas de control de la máquina	15
3.9.10	Emisores o aspersores	17
3.9.11	Tipo de aspersor utilizado en la máquina pivote central	18
3.10	Tuberías.....	19
3.10.1	Tubería de conducción y distribución.....	19
3.10.2	Tuberías regantes	19
3.11	Equipos y accesorios hidráulicos	20
3.11.1	Válvula de alivio de presión	20
3.11.2	Válvula de control.....	20
3.11.3	Válvula de aire	20
3.11.4	Medidor de gasto hidráulico	20
3.11.5	Medidor de presión	21
3.12	Sistema de bombeo	21
3.12.1	Unidad de bombeo.....	21
3.13	Unidad de almacenamiento	22
3.13.1	Fuente de agua.....	22
3.13.2	Reservorio.....	22
3.14	Consideraciones básicas sobre relación suelo-agua-planta.....	23
3.14.1	Sistema suelo agua planta.....	23
3.14.2	Agua en el suelo.	23
3.14.3	Suelo.....	24
3.14.4	Profundidad efectiva	25
3.14.5	Textura.....	25
3.14.6	Densidad aparente.....	25
3.14.7	Método del cilindro	26
3.14.8	Capacidad de campo	26
3.14.9	Agua disponible para las plantas	26
3.14.10	Punto de marchitamiento permanente	27
3.14.11	Evapotranspiración	28
3.14.12	Evaporación	28
3.14.13	Transpiración	29

3.14.14	Evapotranspiración del cultivo.....	29
3.14.15	Método FAO Penman- Monteith.....	29
3.14.16	Movimiento del agua en el suelo.....	29
3.14.16.1	Infiltración.....	29
3.14.16.2	Velocidad de infiltración	30
3.14.17	Lamina de riego en aspersión.....	31
3.14.17.1	Lámina de riego neta y bruta	31
3.14.18	Requerimiento de riego.....	31
3.15	Uniformidad del sistema de riego por el pivote central	32
3.16	Eficiencia de riego.....	33
3.16.1	Eficiencia de almacenamiento.....	35
3.16.2	Eficiencia de conducción.....	35
3.16.3	Eficiencia de aplicación.....	36
4	LOCALIZACIÓN	37
4.1	Características de la zona de estudio	37
4.1.1	Ubicación geográfica.....	37
4.1.2	Clima	37
4.1.3	Fisiografía.....	38
4.1.4	Vegetación	38
4.2	Descripción del sistema de riego	38
5	MATERIALES Y METODOS	39
5.1	Materiales de campo.....	39
5.2	Materiales de gabinete.....	39
5.3	Métodos	39
5.3.1	Metodología de la investigación	39
5.3.2	Territorio de la Estación Experimental Choquenaira	40
5.3.2.1	Caracterización físico - hídrica del suelo	40
5.3.2.2	Obtención de la velocidad de infiltración por el método del cilindro infiltrómetro	40
5.4	VARIABLES DE RESPUESTA	43
5.4.1	Situación socioeconómica del sistema de riego por pivote central a mejorar 43	
5.4.1.1	Actividad económica.....	43

5.4.1.2	Épocas en que realiza la siembra de forrajes	43
5.4.1.3	Uso y destino del forraje	44
5.4.1.4	Parámetros de Funcionamiento del Sistema de Riego por Pivote Central	44
5.4.1.5	Uniformidad del sistema de riego por el pivote central	47
5.4.1.6	Cálculo de la eficiencia de riego	48
5.4.2	Ingeniería del sistema de riego por pivote central considerando los aspectos necesarios de acuerdo a sus requerimientos.....	49
5.4.2.1	Oferta de agua para el sistema de riego.....	49
5.4.2.2	Parámetros básicos de suelo.....	50
5.4.2.3	Evaluación del sistema de riego por pivote central.....	50
5.4.2.4	Eficiencia de riego según propuesta.....	52
5.4.2.5	Balance hídrico	52
5.4.2.6	Evapotranspiración	53
5.4.2.7	Precipitación efectiva.....	53
5.4.2.8	Coeficiente del cultivo.....	53
5.4.2.9	Cálculo de la evapotranspiración real.....	54
5.4.2.10	Balance oferta/demanda.....	55
5.4.2.11	Requerimientos de agua por el cultivo.....	57
5.4.2.12	Sistema de captación.....	57
5.4.2.13	Reservorio de distribución	57
5.4.2.14	Ampliación del reservorio.....	58
5.4.2.15	Sistema de aducción y distribución.....	58
6	RESULTADOS	59
6.1	Velocidad de Infiltración Básica	59
6.2	Los Parámetros Hidráulicos del Sistema de Riego	61
6.3	Cálculo de la dosis de Riego.....	62
7	CONCLUSION.....	64
8	RECOMENDACIONES	65
9	BIBLIOGRAFÍA.....	66
	ANEXOS	70

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Tiempos de Trabajo con Respecto al Velocímetro	46
Cuadro 2. Resultados del Análisis Físico del suelo	50
Cuadro 3 Evapotranspiración potencial según Penman – Monteith.	53
Cuadro 4 Precipitación media mensual y precipitación efectiva.	53
Cuadro 5 Coeficientes de cultivo para demanda de agua.	54
Cuadro 6 Evapotranspiración real, área y requerimiento de agua de cultivos.	54
Cuadro 7 Volúmenes de agua disponible y requerida por cultivos.	55
Cuadro 8 requerimiento de agua del cultivo	57
Cuadro 9. Muestreo de las Láminas de las pruebas de Infiltración	59
Cuadro 10. Velocidad de Infiltración Básica del Área de Estudio	60
Cuadro 11. Parámetros del Sistema de Riego por Pivote Central.....	61
Cuadro 12 Dosis de riego para el Cultivo de avena	62
Cuadro 13 Dosis de riego para el Cultivo de cebada	62
Cuadro 14 Dosis de riego para el Cultivo de triticale.....	63

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Eje pivote central	11
Figura 2. Torre de conducción	12
Figura 3. Aspensor para forrajes.....	12
Figura 4. Caja de control de la torre.....	13
Figura 5. Panel de control	14
Figura 6. Sistema de control de la maquina	16
Figura 7. Emisor y aspensor	18
Figura 8. Aspensor modelo SUPER SPRAY®.....	19
Figura 9. Unidad de bombeo.....	22
Figura 10. Capacidad de campo y punto de marchites permanente para suelos de distintas clases texturales.....	27
Figura 11. Ubicación del Pivote Central	37
Figura 12. Cilindro Infiltrómetro.....	41
Figura 13. Formación en V de los Recipientes.....	48
Figura 13. Sistema de Riego por Pivote Central	51
Figura 15 Infiltración Instantánea	59
Figura 16. Lamina Acumulada	60

INDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Temperatura máxima.....	70
Anexo 2 Temperatura mínima.....	70
Anexo 3. Humedad Relativa por Año	71
Anexo 4 Velocidad del viento.....	71
Anexo 5 Uniformidad de Riego en base a la ecuación (2) Herermann Hein	72
Anexo 6. Caja de control del Sistema de Riego por Pivote Central	73
Anexo 7. Caseta - Paso de Energia	73
Anexo 8. Aforo del Pozo que alimenta el Reservoirio	74
Anexo 9. Medición del Caudal de Cada Aspensor	74
Anexo 10. Determinación de la Pluviometría del Sistema de Riego	75
Anexo 11. Medición de la Infiltración por los Cilindros infiltrómetros	75
Anexo 12. Tipo de Boquilla en Sprint de uno de los emisores del Pivote Central	76
Anexo 13. Toma de muestra de suelo con el barreno de muestreo a una Prof. de 50 cm....	76
Anexo 14 Identificación de cada Aspensor del Sistema de Riego.....	77

RESUMEN

El agua. Un bien tan primordial para el planeta, y aún más para la agricultura. Por la cual se la tiene que dar una mayor optimización en su consumo.

En la Estación Experimental de Choquenaira se trata de aprovechar todas las tierras cultivables en sus primordiales cultivos de forrajeras (Avena, Cebada y Triticale), ante la necesidad de alimentar el ganado bovino, ovino y camélido. Para lo cual se utiliza diversos sistemas de riego como ser: riego por aspersion, riego por goteo y por el riego por pivote central. Para ello, nos enfocaremos en el sistema de riego por pivote central, lo cual se trabajó la caracterización de las propiedades físico-hídricas del suelo. a partir de la toma de muestra analizada en laboratorio, como también se tomaron los datos de determinación de parámetros hidráulicos del sistema de riego pivote central marca Valley modelo 8000 classic la cual esta abastecida por un reservorio que es deficiente a los requerimientos del sistema al momento de regar, contando con un pozo de agua surgente como recarga al reservorio. Así también se determinó el Coeficiente de Uniformidad (CUh) de los aspersores con el método de Heermann y Hein, y finalmente se prosiguió con la determinación de las eficiencias de riego del sistema.

En cuanto a los resultados obtenidos de las características del suelo, mostraron un suelo franco arcilloso, con PH de 8.73, densidad aparente 1.287 g/cm^3 , capacidad de campo 32% (masa), punto de marchitez de 18% (masa). Como también los parámetros hidráulicos obtenidos en el sistema de riego pivote central, fueron de: velocidad de desplazamiento de 2,09 m/min operado al 100% en marcha, para regar 2.01 hectáreas, con un tiempo de riego de una revolución entera de 4 h, y un caudal de aplicación de $27,34 \text{ m}^3/\text{h}$. trabajando a una presión de trabajo de 6 - 7 bares. así también la pluviometría del sistema. Que nos dio un coeficiente de uniformidad del 80.83%. con una eficacia de riego del 61,93%. Se realizó un balance hídrico para saber la frecuencia de riego y la cantidad de agua a aplicar con el sistema de riego por pivote central.

El pivote central brinda una adecuada pluviometría. Que permitirá anticipar la siembra de forrajes, en el mes de septiembre para poder cosechar en el mes de febrero, y realizar el primer corte de forraje. Como también se calculó la ampliación del reservorio de agua. Para satisfacer las necesidades de los cultivos forrajeros.

ABSTRACT

Water. Such a fundamental good for the planet, and even more so for agriculture. Therefore, it must be given greater optimization in its consumption.

In the experimental Chonaira station, the aim is to take advantage of all the arable lands in its main forage crops (Oats, Barley and Triticale), given the need to feed cattle, sheep and camelids. For which various irrigation systems are used such as: sprinkler irrigation, drip irrigation and central pivot irrigation. To do this, we will focus on the central pivot irrigation system, which worked on the characterization of the physical-water properties of the soil. from the sample taken analyzed in the laboratory, as well as the data for determining the hydraulic parameters of the Valley model 8000 classic center pivot irrigation system, which is supplied by a reservoir that is deficient in meeting the requirements of the system at the time. time to irrigate, counting on a spring water well to recharge the reservoir. Thus, the Uniformity Coefficient (CUh) of the sprinklers was also determined with the Heermann and Hein method, and finally the determination of the irrigation efficiencies of the system was continued.

Regarding the results obtained from the soil characteristics, they showed a clay loam soil, with a pH of 8.73, apparent density 1.287 g/cm^3 , field capacity 32% (mass), wilting point of 18% (mass). As well as the hydraulic parameters obtained in the central pivot irrigation system, they were: travel speed of 2.09 m/min operated at 100% in gear, to irrigate 2.01 hectares, with an irrigation time of an entire revolution of 4 h, and an application flow rate of 27.34 m³/h. working at a working pressure of 6 - 7 bars. as well as the rainfall of the system. Which gave us a uniformity coefficient of 80.83%. with an irrigation efficiency of 61.93%.

The central pivot provides adequate rainfall. However, we want to anticipate the sowing of forage, for this we intend to sow in mid-September to be able to harvest in the month of February, and make the first cut of forage. A water balance was carried out to know the frequency of irrigation and the amount of water to apply with the central pivot irrigation system. As the expansion of the water reservoir was also calculated. To meet the needs of forage crops.

1 INTRODUCCIÓN

El agua. Un bien tan primordial para el planeta, teniendo una gran cantidad en la superficie terrestre, de la cual solo el agua dulce es apta y consumida por todos los seres vivos. Tan primordial para la agricultura. este recurso debe ser la preocupación principal de todo sistema de riego, al darle una mayor Optimización y una mayor Utilidad.

El riego al ser una alternativa para incrementar los rendimientos de los cultivos agrícolas y forrajeros, pretende disminuir la influencia negativa del cambio climático. Así mismo la implementación de riego tecnificado trae consigo ventajas como la conservación de las propiedades físicas y químicas de los suelos.

La realización de estudios referidos a la Optimización del sistema de riego en la Estación Experimental de Choquenaira. Nos brinda un sistema de riego por pivote central, el cual ayuda a un mejor aprovechamiento y distribución del agua al momento de regar. considerando dar utilidad al sistema de riego por pivote central a tener sembradíos de especies forrajeras, por la falta de alimento en tiempos de estiaje para el ganado Ovino, Bovino y Camélido. debido a la demanda de los productos lácteos que tiene la estación experimental.

Las tierras de la Estación Experimental Choquenaira por su actitud agrícola son sometidas a una intensa actividad productiva, la cual tropieza con problemas, debido al cambio climático provocando mayor evapotranspiración en época seca o de siembra, precipitaciones concentradas en cortos periodos de tiempo y la falta de agua en las fases importantes de la producción, por consiguiente, disminuyen sus rendimientos. Por tal motivo se debe aprovechar en su gran mayoría el recurso agua. Ya sea para la siembra, ganado o consumo humano.

La Estación Experimental de Choquenaira, dependiente de la UMSA cuenta con un avanzado sistema de riego por pivote central, lo cual se le está dando utilidad al sembrar forraje en su área regable, para el ganado que tiene la estación. La empresa en sistemas de riego VALMONT IRRIGATION, fue la que instalo el sistema de riego

por pivote central y capacito a los docentes de riego en el funcionamiento del sistema del modelo VALLEY CLASIC PLUS 8000.

Este sistema de riego por pivote central, Es uno de los sistemas de riego bajo presión más eficientes para regar y para inyectar fertilizantes líquidos. Su capacidad para regar tanto en terrenos ondulados como llanos, convierten al Pivote central en el sistema más significativo en la agricultura.

La tecnificación de los sistemas de riego en el altiplano en los últimos años está tomando mayor interés en su implementación a consecuencia de la mala eficiencia que brinda los sistemas de riego por gravedad y escases de los recursos hídricos. La implementación del sistema de riego por Pivote Central en la Estación Experimental de Choquenaira dependiente de la UMSA, busca una mayor eficiencia de gestión de los recursos hídricos que se tiene, para aprovechar fuentes de agua que no se está dando utilidad. El presente trabajo de investigación realizo un balance hídrico para saber la frecuencia de riego y la cantidad de agua a aplicar con el sistema de riego por pivote central, atreves de la evaluación de diferentes parámetros.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

- Optimización del cálculo de requerimiento de agua de especies forrajeras (Avena, Cebada y Triticale), bajo el sistema de riego por pivote central en la Estación Experimenta Choquenaira, municipio de Viacha.

2.2 Objetivos específicos

- Evaluación de la situación socioeconómica del sistema de riego por pivote central a mejorar
- Realizar la ingeniería del sistema de riego por pivote central, considerando los aspectos necesarios de acuerdo a los requerimientos.

3 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

3.1 Importancia y utilidad de la los forrajes

Toda investigación en cultivos destinados para forraje, debe fundamentarse en el concepto de que los forrajes son el alimento más adecuado y barato para los rumiantes, con mayor productividad ganadera (Cardozo, 2000).

Diez de Medina (2011), señala que en el Altiplano Central la época de producción de forrajes está determinada por una estacionalidad que es muy marcada. El forraje solo se produce en el período primavera-verano y se debe conservar en las estaciones de otoño e invierno.

El mismo autor indica que los cereales menores forrajeros (avena, cebada y triticale), constituyen un recurso forrajero importante dentro la actividad pecuaria de la región andina del país y especialmente en las zonas altas, que, debido a las condiciones climáticas adversas en cuanto a humedad y temperatura, estas especies se han constituido en base de la alimentación de la ganadería de estas regiones. Estos cereales menores, en siembras puras, proporcionan un forraje con bajo contenido proteico que no cubre los requerimientos del animal para la producción de leche en particular, por lo que se busca evaluar diferentes especies forrajeras en distintas localidades.

3.1.1 Cebada

La Cebada en Bolivia, se cultiva en una gran diversidad de suelos y climas. La mayor superficie cultivada es en aquellas regiones cuya altura está entre los 3.000 y 3.500 msnm. A menos de 3.000 la cebada compite con el trigo y el maíz, sobre los 3.700 las heladas limitan la formación de grano. En zonas donde la altura sería la óptima para el cultivo de la cebada, ésta tiene que competir con la papa. (Córdova, 1998).

El mismo autor, indica que la importancia del cultivo de la cebada en nuestro país, radica en que se la utiliza para el consumo humano, para la alimentación de los animales, en berza y en grano y como materia prima para la industria cervecera.

3.1.2 Avena

La Avena en Bolivia, constituye uno de los cultivos forrajeros anuales más importantes después del maíz en los valles y zonas altas del altiplano. Esta condición se debe a su amplio rango de adaptación a diferentes condiciones de clima y suelo, su buena palatabilidad y la facilidad de conservación como heno o ensilaje, que la convierte en un recurso forrajero valioso para las épocas secas y frías del año, principalmente de las zonas altas del país. (Córdova, 1998)

3.1.3 Triticale

El Triticale en Bolivia, es una alternativa importante en áreas con problemas de poca humedad y suelos pobres y/o salinos, como es el caso de algunas zonas productoras de cereales en el país. Lo rustico de este cereal lo hace superior a otros en estas condiciones, ya que produce mayor cantidad de grano y forraje que los demás cereales. En cuanto a las ventajas del triticale, el mismo autor, destaca que tiene muy alta energía germinativa, que se traduce en una rápida emergencia de la plántula con una buena implantación de la pastura y una entrega rápida del forraje, y que generalmente casi todos los triticales en pleno invierno, aun sin lluvias y con heladas, continúan su crecimiento mientras que otros cultivos dejan de hacerlo.

3.2 Siembra

Tapia, citado por Chambi (2005), manifiesta que se ha establecido que la mejor época de siembra está comprendida entre el 15 de octubre al 15 de enero en el altiplano, dependiendo de la frecuencia de lluvias, aconseja no sembrar con las primeras lluvias, por la posibilidad que estas se suspendan por un tiempo, que ocasionaría que las plantas emergidas perezcan por sequía. Añade que las épocas de siembra para la producción de forraje y semilla, regularmente se ajustan a las condiciones climatológicas de la zona, ajustándose necesariamente al principio de la estación de lluvias.

Marín (2002), la siembra, se la realiza al voleo tal como lo efectúan nuestros agricultores en el altiplano boliviano; en cebada se recomienda una densidad de 80

kg/ha, según la calidad y vialidad de la simiente, así como también la textura y estructura terrea. Para estudios experimentales la siembra se ha recomendado en líneas o hileras a una distancia de 20 a 25 cm entre líneas y a chorro continuo sobre las hileras.

3.3 Densidad de siembra

Chambi (2005), argumenta que la densidad de siembra varía ampliamente de un lugar a otro y dependiendo del propósito de la misma ya sea para forraje o grano. Además, es afectada significativamente por la disponibilidad de agua y la calidad de la semilla.

El mismo autor en un estudio realizado en la Sub-cuenca Media del Rio Keka, Provincia Omasuyos, demuestran que utilizando densidades de siembra; de 90 kg/ha para todas las variedades de estudio, obteniendo rendimientos promedio en avena de 6,15 ton/ha seguido por la cebada con 4,76 ton/ha y por último el triticale con 3,93 ton/ha, en diferentes localidades.

Quispe (1999), con relación a la densidad de siembra la que presento con mayor altura fue la densidad de 90 Kg con 120.93 cm, seguido por la densidad de 110 Kg con 120.00 cm y, por último, la densidad de 100 Kg con solo de 118.13 cm.

Prieto y Alzérreca, (1992), en un estudio comparativo de forrajes anuales que realizaron en tres localidades del altiplano, durante tres años, utilizando densidades de siembra; de 100 kg/ha para la cebada, 80 kg/ha para la avena y 120 kg/ha para el triticale, obtuvieron rendimientos promedios de 5.25 ton MS/ha, 4.91 ton MS/ha y 5.84 ton MS/ha respectivamente.

Villarroel (2001), en un ensayo de tres especies forrajeras con diferentes densidades de siembra en la estación Experimental de Belén, obtuvo los siguientes resultados; con densidades de 90 y 100 Kg/ha obtuvo los mayores rendimientos de 8.02 y 8.04 ton/ha respectivamente y por último con la densidad de 110 Kg/ha tan solo 7.98 ton/ha.

Mantilla (1995), en estudio comparativo de variedades de avena, cebada y triticale en la localidad de Choquenaira utilizo densidades de siembra de, 100 Kg/ha para la avena y triticale, 80 Kg/ha para la cebada, obteniendo rendimientos de 7.58; 6.46 y 5.23 ton MS/ha respectivamente.

3.4 Requerimientos del cultivo

Los Forrajes en el Altiplano están constituidos por monocotiledóneas gramíneas que son plantas anuales y por tanto transpiran durante todo su ciclo vegetativo. La cantidad de agua que las plantas necesitan para su adecuado crecimiento y producción es la suma de la evaporación de agua del suelo y de la transpiración por las hojas, o evapotranspiración del cultivo (ETc). La evapotranspiración depende fundamentalmente de dos grupos de factores: los climáticos (temperatura y humedad del aire, radiación solar y viento) y los derivados de la planta (área foliar o fracción de suelo sombreado por el cultivo y características aerodinámicas y de regulación estomática de dicha área foliar). Las necesidades reales del cultivo, ETc están relacionadas con la demanda climática o evapotranspiración de referencia (ETo) mediante un factor corrector denominado coeficiente de cultivo, Kc, de tal forma que $ETc = Kc \times ETo$. (Valvidia, 2011)

Dada la enorme casuística que se puede dar, el Kc ofrece una enorme variabilidad. En la cantidad de agua final a aportar influye, además de la variedad cultivada, otros parámetros como la densidad de siembra y sistema de riego. A modo orientativo en el caso particular de la producción de cebada tiene una huella hídrica de 0.43 metros cúbicos por kilogramo de forraje, por lo que es importante, eficientizar el uso del agua en la producción de este cultivo

3.5 Exigencia climática para la producción de forrajes anuales

3.5.1 Clima

INFOAGRO (2007), la cebada es un cultivo tolerante a las condiciones extremas de clima y suelo, excepto a los suelos anegados y ácidos, es tolerante a la salinidad,

requiere de una temperatura templada entre 15 y 31° C, una precipitación de 300 y 600 mm. Es un cultivo de foto período largo.

3.5.2 Temperatura

Según el autor Corpoica (2007), el cultivo de la cebada forrajera requiere una temperatura de 10°C mínimo y máximo 18°C, No tolera sombra, se adapta a altitudes desde los 2400 a 3000 m.s.n.m. Tolera heladas hasta menos 2°C, en zonas donde la precipitación esta entre los 600 y 850 mm/año.

Según Parsons (2005), la mayor parte de las gramíneas se cultivan en zonas templadas con temperaturas que varían entre 15°C a 31°C, aunque también pueden soportar bajas temperaturas en las zonas altas (0 °C);

3.5.3 Precipitación

Parsons (2005), los cereales por lo general requieren cantidades de precipitación entre 600 a 850 mm/año; sin embargo, se pueden adaptar a zonas con lluvias que registren de 300 a 400 mm/año.

3.6 Necesidades del suelo para el cultivo

Parsons (2005), menciona que para el cultivo de la cebada es necesario que las condiciones físicas del suelo tengan las siguientes características.

- Una estructura granular, que permita la aireación y el movimiento de agua en el suelo.
- Un perfil de tierra cultivable de unos 30 cm para un enraizamiento adecuado.
- Que no sea susceptible a la formación de costras que dificulten la germinación.
- Contenido de materia orgánica.
- La cebada es un cultivo que se adapta bien en suelos con un pH de 7 – 8.
- Requiere suelos profundos, bien drenados, preferiblemente francos, de fertilidad media a baja y pH entre 6 y 8. Puede tolerar algo de salinidad. No tolera encharcamiento.

Por otro lado, según Roger (2004), describe que por debajo de los -10°C , pocas son las cebadas que sobreviven, la cebada prefiere clima templado, 15°C de temperatura óptima en el crecimiento vegetativo y de 17 a 18°C en el espigado, suelo franco a franco arcilloso bien drenado, no suelos ácidos, pH de 6 a 8.5 mayor tolerante a la salinidad.

3.7 Tipos de sistemas de riego

3.7.1 Sistemas de riego por aspersión

El riego por aspersión es un método mediante el cual el agua se aplica sobre la totalidad de la superficie del suelo en forma de lluvia, utilizando para ello una red de riego que permite conducir el agua con la presión adecuada hasta los elementos encargados de aplicarla, los aspersores (Fernández et al., 2010).

Los sistemas de riego por aspersión se pueden, genéricamente, dividir en sistemas estacionarios y móviles o autopropulsados. En los sistemas estacionarios, los aspersores permanecen en una posición fija mientras dura la aplicación del agua. En las instalaciones móviles, con desplazamiento continuo, los aspersores funcionan mientras se mueven, de forma independiente o junto con las tuberías donde van montados, siguiendo una trayectoria lineal o circular. Dentro de los sistemas estacionarios, se incluyen los que se desplazan de una posición de riego a otra, ya sea a mano, tirados por tubería flexible o de forma mecanizada, como es el caso de las tuberías con ruedas, que se denominan sistemas de desplazamiento discontinuo. Los sistemas estacionarios incluyen también las instalaciones fijas, de cobertura total. Los principales sistemas móviles, con desplazamiento continuo, son los sistemas pivote, los laterales de avance frontal y los cañones tirados por una tubería con enrollador o tirados por cable (Santos et al., 2010, p. 165).

3.7.2 Sistemas fijos

Todos los elementos de este sistema son fijos, salvo algunos casos en donde los aspersores van ocupando sucesivas posiciones a lo largo de las líneas de riego. La colocación de la red puede ser permanente (permanece enterrada a una profundidad

de 0.6 - 1 metro durante toda la vida útil) o temporal (se coloca al principio de la temporada de riego y se retira al final de la misma). Un sistema en donde todas las tuberías y aspersores son fijos se llaman de cobertura total (Fuentes & Garcia, 2010).

3.7.3 Sistemas semifijos

En este sistema son fijos el grupo motobomba y la red de tuberías principales, que suelen ir enterrada. De ella derivan los hidrantes en donde se conectan los ramales de alimentación (fijos o móviles), en donde, a su vez se conectan las líneas de riego, que son móviles. Estas últimas llevan acoplados los aspersores, bien directamente o a través de unas mangueras y montado sobre patines, con el fin de permitir el riego en varias posiciones sin necesidad de cambiar la tubería (Fuentes & Garcia, 2010).

3.7.4 Sistemas móviles

Todos los elementos de la instalación son móviles, incluso puede serlo el grupo motobomba cuando se hace una toma de agua distinta en cada posición de riego. Este sistema se utiliza sólo en pequeñas superficies o para dar riego complementario (Fuentes & Garcia, 2010).

3.8 Máquina de regar pivote central

La mecanización del riego por aspersión comprende dos sistemas:

desplazamiento de un aspersor de gran tamaño y desplazamiento de línea de riego.

El primer caso corresponde a los coñones de riego, en sus modalidades de caños viajero y enrollador. El desplazamiento automático de la línea de riego corresponde al pivote (con desplazamiento circular) y al lateral de riego (con desplazamiento frontal). En estos equipos los aspersores riegan a la vez que se desplazan, con lo cual la pluviometría no está determinada únicamente por el caudal instantáneo, sino que es preciso considerar también la velocidad de avance (Fuentes & Garcia, 2010).

El pivote, máquina de riego es una tubería regante con aspersores o microaspersores, que se mueve en círculo alrededor de un punto fijo o pivote, donde tiene la entrada del agua. La tubería es soportada por torres metálicas, movidas con dos ruedas instaladas

en su base y autopropulsadas mediante un motor eléctrico (o hidráulico). La línea regante se alinea por medio de un sistema de control que regula el avance de cada torre. Si la alineación falla, debido al atascamiento u obstrucción de una rueda, el sistema suspende su funcionamiento. La tubería regante del pivote central generalmente tiene aspersores con gasto y diámetro de mojado diferentes a lo largo de la tubería, con la finalidad de compensar la velocidad tangencial de cada punto de la tubería regante. Entre mayor es el radio que corresponde a la posición de un aspersor, mayor es el área que riega; por lo tanto, se requiere mayor gasto para igualar las láminas de riego (Peña, 2012).

Este sistema consiste en una tubería lateral, de acero galvanizado, que gira en torno a un punto fijo en el centro de la parcela regada; de ahí, su denominación de “pívor”, semejante a su denominación inglesa de “Center Pívor Laterals”. Los sistemas ,siempre, están constituidos por: el “centro pivote”, donde está el eje de rotación, que se corresponde con un tubo vertical que abastece de agua al lateral de riego; por las “torres”, que son estructuras metálicas motorizadas, donde se apoya la estructura del sistema, y que son las responsables del movimiento del lateral; los “tramos o arcos”, que son estructuras trianguladas, que integran la propia tubería de transporte del agua, para vencer los vanos entre torres; y por la tubería propiamente dicha, donde se montan los aspersores y difusores a los que abastece de agua. Los sistemas pivote de riego pueden tener dimensiones muy variables, pudiendo regar círculos o sectores circulares (Santos et al., 2010, p. 205).

3.9 Componentes principales del sistema de riego por pívor central

Los pivotes pueden ser de avance circular; Están formados por una tubería porta emisores que va sustentada sobre torres automotrices, dotadas normalmente de un motor eléctrico y dos ruedas neumáticas. La tubería, que normalmente es de acero galvanizado, sirve de elemento resistente para vencer el vano entre torres juntamente con barras o cables, formando una viga en celosía, dejando un vano hasta el suelo de unos 3 m. Cada tramo va unido a una torre soporte y articulado con el tramo anterior. La unión debe ser estanca y sólida ya que tiene que transmitir esfuerzos importantes, especialmente en equipos trasladables (Moreno, 2013).

Las partes básicas o los componentes que conforma el pivote central se describen a continuación:

3.9.1 Pivote

Es la estructura central de la cual gira todo el sistema, normalmente tiene cuatro patas que están fijadas a unos cimientos de cemento. El punto de entrada de agua se encuentra en la base del pivote al principio de la tubería de elevación. El agua fluye a través de esta tubería y el codo. Este último gira dentro del tubo de elevación (Fong, 2010) (Figura 1).

Figura 1. Eje pivote central



Fuente: Reporte Fotográfico (2024)

3.9.2 Tramos y torres de conducción

El agua que sale del codo es transportada a través del campo por un acueducto. Este acueducto está hecho de una serie de tramos conectados. Cada tramo tiene una “unidad de conducción” que mueve el acueducto alrededor del campo. El acueducto, que tiene forma de arco, está sujetado por una “cuerda de arco” que va unida al acueducto por una serie de estructuras en forma de “V”, que pueden llegar a ser hasta ocho entre cada unidad de conducción. Los tubos del acueducto entre tramos se conectan mediante una manguera corta que se llama “bota flexible”, la cual está unida en sus extremos con unos empalmes de aluminio (Figura 2).

Figura 2. Torre de conducción



Fuente: Reporte Fotográfico (2024)

3.9.3 Aspersores múltiples

La característica más importante del pivote Central es su capacidad para aplicar el agua uniformemente. Esto se consigue por medio de unos aspersores que están soldados al acueducto. Los tamaños de las boquillas de los aspersores varían en diámetro de acuerdo con la distancia que hay al centro del sistema. Los aspersores más alejados del centro tienen mayor diámetro ya que deben regar una superficie superior (Fong, 2010) (figura 3).

Figura 3. Aspersor para forrajes



Fuente: Reporte Fotográfico (2024)

3.9.4 Caja de control de la torre y cable del tramo

Una caja de control se encuentra en cada torre de conducción, unos cables de código de color entran y salen de cada caja. Por lo tanto, el cable recorre toda la longitud del sistema. El cable lleva dos tipos de carga eléctrica. 120 voltios para un sistema de control, y 480 voltios para mover los motores de las torres de conducción (Fong, 2010) (Figura 4).

Figura 4. Caja de control de la torre



Fuente: Reporte Fotográfico (2024)

3.9.5 Anillo colector y tubo “J”

El cable del tramo debe poder girar en el pivote ya que de otro modo se enrollaría alrededor del mismo. El aparato que sirve para que no se quede enrollado se llama “anillo colector”. El anillo colector está compuesto de unos anillos de latón apilados y aislados unos de otros. Estos están fijos, unas brochas giran alrededor manteniendo un flujo constante de electricidad, sin forzar el cable mientras el sistema está dando vueltas alrededor del campo. El cable colector se alimenta desde el anillo colector a través de una tubería en forma de “J” saliendo de la tubería de elevación cerca de la

parte superior. El cable de control sale hacia abajo por la pata del pivote hasta el panel de control (Fong, 2010).

3.9.6 Panel de control

El panel de control permite controlar el sistema. En la mayoría de los casos, el panel de control se encuentra en el pivote. Algunas de las funciones que se pueden controlar son:

- Arranque / parada.
- Adelante / atrás.
- Velocidad del sistema que controla la cantidad de agua aplicada.

El panel de control se alimenta con una corriente de 480 voltios AC. Este voltaje puede venir desde las líneas públicas, generadores mecánicos o convertidores de fase. Un transformador de voltaje 480 - 120 provee la corriente de 120 voltios necesaria para el funcionamiento del circuito de control. La corriente de 480 voltios va por medio del cable de control, desde el panel de control hasta cada uno de los contactos de los motores de conducción. Cuando se enciende el contacto en la torre de conducción, la corriente pasa al motor y el sistema se mueve tal como se muestra en la Figura 5 (Fong, 2010).

Figura 5. Panel de control



Fuente: Reporte Fotográfico (2023)

3.9.7 Temporizador

El panel de control también le permite cambiar la velocidad del sistema mediante un aparato llamado Temporizador o Porcentaje de velocidad. Si el porcentaje de velocidad está al 100 por ciento, la última torre de conducción estará en continuo movimiento (el 100 % del tiempo). A este porcentaje, el sistema está a su máxima velocidad y aplicando la menor cantidad de agua. Para incrementar el riego, el sistema debe disminuir su velocidad. Por ejemplo, si el porcentaje de velocidad está a 50 %, entonces la última torre estará en funcionamiento durante 30 segundos por cada minuto que pase (es decir, el 50 % del tiempo). En este caso se dobla la cantidad de agua aplicada (Fong, 2010).

3.9.8 Unidades motrices

Es importante controlar la velocidad de la última torre, ya que controla las otras: las demás se mueven para mantenerse “en línea”. Como la velocidad de cada motor de conducción es constante, cada motor deberá ir a una velocidad proporcionalmente inferior para poder mantener el alineamiento entre las distintas torres. En cada una de las torres intermedias, se encuentra una barra de control ligada a la base de la caja de control de la torre y al tramo siguiente. Al moverse tanto la última torre como su tramo, la barra de control de la penúltima unidad de conducción va girando. La barra de control está ligada a un eje en la parte inferior de la caja de control. El eje va unido a una placa. Al girar la barra de control, gira la placa que a su vez controla la clavija de ejecución. Al encender y apagar la micro clavija de ejecución, envía una corriente de 480 voltios AC al motor de la torre haciendo que se mueva hasta que esté “en línea” con la siguiente torre (Fong, 2010).

3.9.9 Sistemas de control de la máquina

El tablero de control es un circuito electrónico en la que se encuentran todas funciones que debe cumplir el sistema, en la figura 5 se percibe los interruptores de control que están identificados en forma numérica, tiene las siguientes funciones:

- Interruptor de encendido y apagado del sistema.
- Marcador de voltímetro que llega desde la fuente de energía.
- Cuenta horas, en la que se puede ver las horas de funcionamiento del sistema de riego.
- Mediante este interruptor se controla la marcha a la izquierda o derecha del sistema.
- Interruptor de control de parada y rebote.
- Interruptor que permite controlar el paro y marcha del sistema de pivote central.
- Interruptor que permite controlar el funcionamiento del sistema con agua y sin agua.
- Tornillo de control de temporizador cíclico que indica el porcentaje de marcha o velocidad de funcionamiento del sistema de riego.

Figura 6. Sistema de control de la maquina



Fuente: Reporte Fotográfico (2023)

3.9.10 Emisores o aspersores

El sistema de riego debe su nombre al emisor que provoca la característica de una llovizna, este emisor es el aspersor (De la cruz, 2015). Los aspersores son los elementos de la instalación de riego por aspersión encargados de distribuir el agua en forma de lluvia sobre la superficie del suelo. Son elementos provistos de una o más boquillas montadas sobre un cuerpo central, por las que sale el agua a presión. El movimiento giratorio del aspersor es provocado por la presión del agua que, al salir, se dispersa en forma de gotas mojando una superficie más o menos circular, cuyo alcance depende de la presión del agua y del tipo de aspersor (Fernández et al., 2010).

La intensidad y uniformidad de lluvia que proporciona el lateral depende de: el tipo de emisor, su espaciamiento en la tubería, la presión en las boquillas y el tamaño de estas. La disposición de emisores más ventajosa para alcanzar un equilibrio entre las pérdidas de evaporación y arrastre y uniformidad de riego parece ser situar los emisores a unos 2 m sobre el suelo (aunque esto no puede hacerse con los aspersores de impacto), con una anchura mojada en torno a los 12-15 m, lo que requiere una presión de trabajo de 1.50 a 2 bar, o algo menor si no hay problemas de escorrentía. En estas condiciones pueden utilizarse separaciones entre emisores de 2.5 a 3 m, no debiendo superar en general los 57 m con los emisores de mayor alcance como los Rotator (Tarjuelo, 2005, p. 235).

Figura 7. Emisor y aspersor



Fuente: Reporte Fotográfico (2023)

3.9.11 Tipo de aspersor utilizado en la máquina pivote central

El aspersor utilizado en el sistema es la de marca SENNINGER del modelo SUPER SPRAY® la cual lo instaló en el pivote central de marca VALLEY CLASSIC 8000, tiene una amplia variedad de deflectores intercambiables para satisfacer varios requerimientos específicos de cultivo, clima y suelo. Es el aspersor tipo spray más versátil para riego de pivote central con sus veintidós platos deflectores intercambiables para una fácil personalización

Sus características principales de acuerdo a su ficha técnica son: de baja presión operativa de 0.41 a 2.76 bar, La boquilla UP3® es fácil de cambiar. Para retirar la boquilla, simplemente presione y tire; para reinstalarla, colóquela y empújela hasta que haga clic. También es fácil de identificar debido a su codificación por colores. Viene en diferentes diámetros, dependiendo al requerimiento que proporciona un caudal mínimo de 61 Lt/Hr y un máximo 6805 Lt/Hr. con una codificación por color y una enumeración.

Figura 8. *Aspersor modelo SUPER SPRAY®*



Fuente: Reporte Fotográfico (2023)

3.10 Tuberías

3.10.1 Tubería de conducción y distribución

La red de conducción y de distribución constituye el conjunto de tuberías que llevan el agua desde la fuente de abastecimiento o unidad de bombeo, hasta la entrada de los laterales. En el caso de los sistemas de movimiento continuo como pivote, cañón o avance frontal, la tubería de conducción generalmente es fija y termina hasta el lugar donde se encuentra el pivote, o bien, la tubería de alimentación se instala dónde están los hidrantes para conectar la motobomba o manguera en el caso del cañón viajero o avance frontal (Peña, 2012).

3.10.2 Tuberías regantes

Las tuberías regantes son aquellas que tienen integrados los emisores o aspersores para riego y suministran el agua a los cultivos. Se clasifican hidráulicamente como tuberías con salidas múltiples (Peña, 2012).

La tubería regante del pivote comprende la longitud total del brazo soportadas por torres de estructuras triangulares de acero galvanizado, la tubería es de fierro

galvanizado, el sistema de riego por pivote en estudio está compuesto de una estructura de 78 m con una torre de 3.60 m.

3.11 Equipos y accesorios hidráulicos

3.11.1 Válvula de alivio de presión

Las válvulas de alivio de presión son indispensables en los sistemas de riego a la salida de la bomba, ya que permiten disipar el exceso de presión debido al golpe de ariete que se genera al cerrar la válvula de retención ocasionado, entre otras causas, por el apagado repentino del equipo de bombeo o el cierre de válvulas durante la operación normal del equipo de bombeo. Las válvulas de alivio permiten la fuga de agua o aire cuando aumenta la presión sobre un límite preestablecido en la tubería. Esto sucede porque se vence un resorte calibrado a la presión de abertura de la válvula (Peña, 2012).

3.11.2 Válvula de control

Las válvulas de control sirven para cerrar o abrir conductos, de manera parcial o total. Con las válvulas de control puede regularse el gasto o la presión en una tubería. Cerrándolas se reduce el gasto y abriéndolas se incrementa la descarga hidráulica (Peña, 2012).

3.11.3 Válvula de aire

El sistema de riego debe contener válvulas de admisión y expulsión de aire ubicadas en el cabezal de control y a lo largo de la red de conducción y de distribución (Peña, 2012). Las válvulas de aire son utilizadas para controlar la cantidad de aire que podría estar presente dentro de las tuberías que transportan fluidos.

3.11.4 Medidor de gasto hidráulico

Los medidores de gasto son dispositivos que relacionan la velocidad del agua y su área de paso. Se calibran de manera tal que indican el gasto hidráulico que pasa por ella. Pueden basarse en la velocidad, en la carga de velocidad o en la velocidad de

partículas que fluyen con el agua. Pueden ser de placa de orificio, de tubo Venturi, de tubo Pitot, de propela o turbina, electromagnético y ultrasónico, este último de efecto Doppler o de tiempo en tránsito (Peña, 2012).

3.11.5 Medidor de presión

Los manómetros son dispositivos que sirven para medir la presión en diferentes puntos del sistema de riego. Tienen sensores que indican las presiones de operación y generalmente son mecánicos con carátula. No generan pérdidas de carga en las tuberías. Los sistemas de riego por aspersión se pueden supervisar en el cabezal de control, leyendo la presión de operación del sistema en el momento de la inspección, debido a que para cada gasto del sistema corresponde una presión de operación (Peña, 2012).

3.12 Sistema de bombeo

3.12.1 Unidad de bombeo

El equipo de bombeo consiste en una bomba hidráulica y su motor, que proporciona la energía necesaria para mover el agua desde el cárcamo hasta su aplicación en los emisores de la parcela. El motor puede ser eléctrico o de combustión interna. En las plantas de bombeo, para los sistemas de riego, se emplean los siguientes tipos de bombas: de eje horizontal, llamadas simplemente centrifugas; las de eje vertical, conocidas como bomba turbina vertical, y las sumergibles (Peña, 2012).

Figura 9. Unidad de bombeo



Fuente: Reporte Fotográfico (2024)

3.13 Unidad de almacenamiento

3.13.1 Fuente de agua

En general, la fuente de agua con la que permite derivar el agua de abastecimiento al reservorio o lugar de almacenamiento, es el pozo norte que cuenta con un pozo surgente, esta agua es trasferida por una motobomba de 5 hp al reservorio para su posterior almacenamiento. Lo cual será usada para fines de riego por el pivote central.

3.13.2 Reservorio

Los reservorios son elementos fundamentales que permiten almacenar y abastecer agua para sistemas de riego, en consecuencia, el uso posterior de forma suficiente de acuerdo con los requerimientos del cultivo.

3.14 Consideraciones básicas sobre relación suelo-agua-planta.

3.14.1 Sistema suelo agua planta

El agua es retenida dentro de los poros del suelo con grados variables de intensidad, según la cantidad de agua presente. El agua junto con sus sales disueltas en ella, forma la solución del suelo, tan importante como medio para abastecer los principios nutritivos para las plantas que se desarrollan en dicho suelo.

Según (Borquez, 1999) el interés por el suelo se centra principalmente en su papel como un lugar de almacenamiento de agua, ámbito de crecimiento de la raíz, pero también es un depósito de elementos minerales y proporciona ancladero a las plantas. Además, contiene una población microbiológica activa y muchos organismos grandes, tales como las lombrices de tierra, que tienen efectos importantes sobre sus características químicas, físicas y el crecimiento de las raíces. (Pardos, 2011)

También (Pardos, 2011) menciona que el conocimiento de la relación de suelo – agua - planta es esencial para la producción agrícola bajo riego. Cada cultivo tiene requisitos de agua particulares y cada suelo tiene sus propiedades que afectan en una forma u otra el suministro de agua a las plantas. La cantidad de agua en el suelo a un tiempo dado es un valor sumamente dinámico, ya que es el resultado neto de la cantidad recibida ya sea por lluvia o por riego menos las pérdidas por evaporación, transpiración o infiltración profunda. La disponibilidad de esta agua para las plantas depende a su vez del sistema de raíces presente y de propiedades hidráulicas del suelo tales como porosidad, conductividad hidráulica y capacidad de retención de agua.

Las plantas transpiran grandes cantidades de agua como mecanismo para equilibrar su balance de energético. La cantidad de agua transpirada es aportada por el suelo y absorbida por las raíces. (Villafáfila, 2009)

3.14.2 Agua en el suelo.

La producción de alimentos y el uso de agua están relacionados de forma inseparable, el agua siempre ha sido el principal factor que limita la producción agrícola en gran parte del mundo, donde la precipitación no es suficiente para satisfacer la demanda de

los cultivos, con la competencia cada vez mayor por recursos hídricos no renovables en todo el mundo y la creciente demanda de productos agrícolas, nunca antes ha sido tan apremiante la necesidad de mejorar la eficiencia y productividad del uso del agua para la producción de cultivos, a fin de garantizar la seguridad alimentaria en el futuro y enfrentar las incertidumbres asociadas con el cambio climático. (Mendoza, 2015)

El agua es el elemento vital para la vida, sin el agua no se podría vivir, la mayoría de los productos agrícolas y pecuarios están hechos en su mayor parte de agua, como ejemplo se pueden mencionar los siguientes productos; el tomate que contiene el 94% de agua, la lechuga el 95%, el plátano el 76% y la naranja el 87% de agua. (Mendoza, 2014)

El suelo es un sistema heterogéneo, disperso, poroso y polifásico, las tres fases de la naturaleza ordinaria son: fase sólida, que constituye la matriz del suelo; fase líquida, que consiste del agua del suelo, la cual contiene sustancias disueltas y se llama más correctamente solución del suelo y la fase gaseosa que es la atmósfera del suelo (Calvache, 2014).

Este mismo autor, manifiesta que, el suministro de agua al suelo, ya sea por riego, lluvia o flujos internos es indispensable para la germinación, crecimiento, desarrollo y producción de las plantas. El movimiento, contenido y disponibilidad del agua está determinado principalmente por las propiedades físicas del suelo, particularmente la textura, estructura, porosidad, profundidad y contenido de materia orgánica. El suministro de agua al suelo, ya sea por riego, lluvia o flujos internos es indispensable para la germinación, crecimiento, desarrollo y producción de las plantas, el movimiento, contenido y disponibilidad del agua está determinado principalmente por las propiedades físicas del suelo, particularmente la textura, estructura, porosidad, profundidad y contenido de materia orgánica. (Calvache, 2014)

3.14.3 Suelo.

El suelo es el almacén de agua para las plantas, el agua que se aplica a los terrenos ya sea mediante la lluvia o mediante el riego, es almacenado por el suelo en el espacio poroso. (Mendoza, 2014)

La buena calidad física del suelo determina un ambiente adecuado para el desarrollo de las raíces vegetales, además del ingreso y almacenamiento óptimo del agua necesaria para el crecimiento de las plantas (Rojas, 2013).

El suelo, la planta y la atmósfera constituyen un sistema continuo, en el cual el suelo proporciona un anclaje mecánico a las plantas, además del almacenaje de agua y el oxígeno que absorben las raíces, entonces para determinar las características del suelo es necesario tener en cuenta propiedades físicas. (Rojas, 2013).

3.14.4 Profundidad efectiva

Álvarez (1985), menciona que la profundidad y la distribución del sistema radicular del cultivo es de gran importancia para determinar la lámina de riego a aplicar de manera que al humedecer el suelo hasta profundidades inferiores trae problemas de déficit hídrico en la planta y al hacerlo hasta profundidades mayores constituyen un gasto innecesario de agua.

3.14.5 Textura

Ortiz (1984), menciona que se refiere a la proporción relativa de arena, limo y arcilla en el suelo, define la cantidad de agua que puede almacenar un suelo, movimiento del agua al suelo, facilidad de abastecimiento de nutrientes, de agua y de aire.

3.14.6 Densidad aparente

La densidad aparente de un suelo, es la relación que existe entre la masa o peso seco del suelo y la unidad de volumen aparente del mismo, el volumen aparente incluye a las partículas sólidas y el espacio poroso (Gabriel, 2015).

La densidad aparente se define como la masa de suelo por unidad de volumen (g/cm^3 o t/m^3). Describe la compactación del suelo, representando la relación entre sólidos y espacio poroso (Rojas, 2013).

3.14.7 Método del cilindro

El método más utilizado para realizar esta determinación es el método del cilindro, una de las desventajas de tomar la muestra con el cilindro es que el valor puede variar con el tamaño del cilindro, siendo mayor la densidad cuando menor es el tamaño del cilindro a causa de que no se captan los poros de mayor diámetro, en general, el método presenta poca variación, es fácil de repetir y su determinación es sencilla. (Rojas, 2013)

3.14.8 Capacidad de campo

Es un nivel de humedad que se consigue dejando drenar el agua de un suelo saturado. Este contenido de agua supone la mayor cantidad de agua que el suelo puede llegar a almacenar sin drenar. También se conoce como capacidad de campo (CC). (Gomez, 2010)

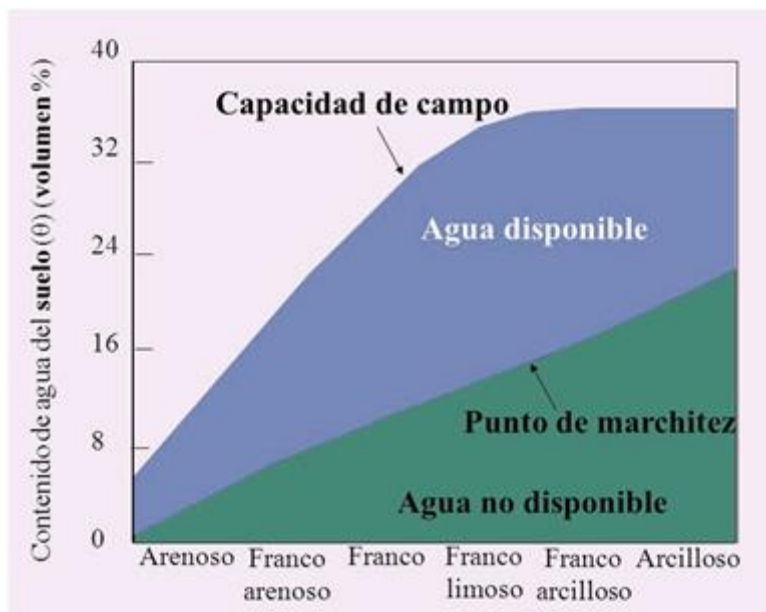
La capacidad de campo se refiere a la cantidad relativamente constante de agua que contiene un suelo saturado después de 48 horas de drenaje, el concepto de capacidad de campo se aplica únicamente a suelos bien estructurados donde el drenaje del exceso de agua es relativamente rápido, si el drenaje ocurre en suelos pobremente estructurados, por lo general continuará durante varias semanas y este tipo de suelos de estructura tan pobre raramente tiene una capacidad de campo claramente definida, la capacidad de campo se determina mejor en un suelo saturando midiendo su contenido de agua después de 48 horas de drenaje, el suelo a capacidad de campo se siente muy húmedo en contacto con las manos (FAO, 2014)

3.14.9 Agua disponible para las plantas

La capacidad de retención de agua o Humedad Aprovechable que presentan los suelos corresponde al agua que se encuentra retenida en el suelo entre Capacidad de Campo (CC) y Punto de Marchites Permanente (PMP) y depende de la textura del suelo, su estructura, profundidad efectiva, de la presencia de piedras y otras limitantes en el perfil de suelo. (Gil, 2009)

En la figura (10), se presenta una relación entre la textura del suelo y su capacidad de retención de agua, en anexo se incluye un esquema para determinar textura al tacto en terreno.

Figura 10. Capacidad de campo y punto de marchitez permanente para suelos de distintas clases texturales



Fuente: (Gil, 2009)

Hay que tener presente, por otra parte, que el agua retenida en el suelo no se encuentra igualmente disponible en el suelo, por la cual para fines de riego hay que considerar sólo una fracción de esta agua (Umbral de riego), que varía entre un 30 a 40 % de la capacidad de total (0,3 a 0,4). (Gil, 2009)

3.14.10 Punto de marchitamiento permanente

Si el suelo no recibe un nuevo aporte, la evaporación de agua desde el suelo y la extracción por parte de las raíces hacen que el agua almacenada disminuya hasta llegar a este nivel en el que las raíces no pueden extraer más cantidad... Aunque el suelo aún contiene cierta cantidad de agua, las plantas no pueden utilizarla. Se conoce también como punto de marchitamiento permanente (PMP). (Gomez, 2010)

El punto de marchitez, a veces llamado punto de marchitez permanente, se define como el límite inferior de humedad aprovechable para las plantas. Por debajo de este umbral, las fuerzas de succión de las células de las raíces son insuficientes para extraer el agua retenida por el suelo. Además, el mismo autor señala, que, en un día seco y soleado, una planta como el maíz, puede transpirar excesivamente y marchitarse temporalmente, aun cuando la humedad del suelo sea la retenida a una tensión de 1 a 2 bar, (agua realmente disponible). Sin embargo, la planta se recuperará fácilmente durante la noche cuando las pérdidas por transpiración son mucho menores.

En contraste con esta marchitez temporal, el punto de marchitez indica la baja disponibilidad de humedad; en tales condiciones las plantas marchitas no se recuperan, a menos que se agregue agua al suelo. (Calvache, 2014)

3.14.11 Evapotranspiración

Los principales parámetros climáticos que afectan la evapotranspiración son la radiación, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y la velocidad de viento, así mismos factores como salinidad o baja fertilidad del suelo, uso limitado de fertilizantes, presencia de horizontes duros o impenetrables en el suelo, ausencia de control de enfermedades y parásitos y el mal manejo del suelo pueden limitar el desarrollo del cultivo y reducir la evapotranspiración. (FAO, 2014)

3.14.12 Evaporación

Según (FAO, 2014), la evaporación es el proceso por el cual el agua líquida se convierte en vapor de agua (vaporización) y se retira de la superficie evaporante (remoción de vapor). El agua se evapora de una variedad de superficies, tales como lagos, ríos, caminos, suelos y la vegetación mojada.

3.14.13 Transpiración

La transpiración consiste en la vaporización del agua líquida contenida en los tejidos de la planta y su posterior remoción hacia la atmósfera. Los cultivos pierden agua predominantemente a través de las estomas, estas 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 (FAO, 2014).

3.14.14 Evapotranspiración del cultivo

La evapotranspiración del cultivo se calcula multiplicando E_{To} por K_c el cual es un coeficiente que expresa la diferencia entre la evapotranspiración de la superficie cultivada y la superficie del cultivo de referencia, esta diferencia puede ser combinada dentro de un coeficiente único o integrado del cultivo, o puede ser separada en dos factores que describen por separado las diferencias en evaporación y transpiración entre las dos superficies. (FAO, 2014)

3.14.15 Método FAO Penman- Monteith

El método FAO Penman- Monteith (Allen et al., 1998) derivado de la modificación de Jhon Monteith en 1965 a la ecuación desarrollada por Haward Penman en 1948, actualmente está reconocida como un método estandarizado para la estimación de la evapotranspiración de referencia. (FAO, 2006)

El mismo autor indica que, este método utiliza un cultivo hipotético de referencia con una altura de 0,12 m, una resistencia superficial de 70 s m^{-1} y un albedo de 0,23, la cual representa la evapotranspiración de una superficie de pasto verde a una altura uniforme y que se desarrolla sin restricción de agua.

3.14.16 Movimiento del agua en el suelo

3.14.16.1 Infiltración

La infiltración es el movimiento de agua desde la superficie del suelo hacia abajo, que tiene lugar después de una lluvia o de un riego. La facultad de un suelo para permitir

el paso del agua a través de su perfil recibe el nombre de permeabilidad, que depende del número de poros, así como de su tamaño y de su continuidad. Un gran número de poros y unos poros grandes y continuos favorecen la permeabilidad (Fuentes & Garcia, 2010).

Las características de infiltración de un suelo constituyen un elemento básico para poder efectuar un adecuado diseño del sistema de riego, y determinar, así, el tiempo de riego apropiado (Vásquez, Vásquez, Vásquez, & Cañamero, 2017).

3.14.16.2 Velocidad de infiltración

Según Vásquez et al., (2017), Puede ser definida como la velocidad de entrada vertical del agua en el perfil del suelo cuando la superficie del terreno se cubre con una lámina delgada de agua. La función que describe la velocidad de infiltración en un punto cualquiera corresponde a un modelo exponencial de la forma:

$$i = a T_0^b \quad Ec 1$$

Donde:

i : Velocidad de Infiltración (L.T-1), expresada en mm/hora, cm/hora u otras unidades.

T₀ : Tiempo de oportunidad (tiempo de contacto del agua con el suelo) expresado en minutos u horas.

a : Coeficiente que representa la velocidad de infiltración para *T₀*=1 min.

b : Exponente que varía entre 0 y -1.

El éxito del riego por aspersión depende, en primer lugar, de que la velocidad potencial de infiltración del agua en el suelo sea mayor que la intensidad de precipitación para que no existan escurrimientos, encharcamientos, ni suelo saturado y, en segundo lugar, depende de que se apliquen las cantidades requeridas de agua. Generalmente, en riego por aspersión estándar el agua cae al suelo en forma de lluvia, de manera intermitente y varía la superficie mojada en cada movimiento del aspersor; sin embargo, en el suelo, mediante la capilaridad se distribuye la humedad en el área

dominada por la lluvia del aspersor, mejorando la uniformidad de humedecimiento del suelo (Peña, 2012).

3.14.17 Lamina de riego en aspersión

En la producción de los cultivos con los sistemas de riego, se acostumbra manejar láminas de riego en lugar de volúmenes de agua debido a la facilidad de hacer operaciones con menos cifras y facilitar comparaciones de cantidades de agua aplicadas a parcelas con superficies diferentes (Peña, 2012).

Para saber cuál es la cantidad de agua que debe aplicarse durante el riego de un cultivo, con un sistema de aspersión, es necesario considerar cuánta agua puede almacenar el suelo y cuánta le falta para llenar el almacén aprovechable; además, se requiere tomar en cuenta las pérdidas por arrastre y evaporación, y también la lámina de agua percolada. No deben planearse pérdidas por escurrimiento (Peña, 2012).

3.14.17.1 Lámina de riego neta y bruta

La lámina de riego neta de proyecto se define como la altura de agua necesaria para satisfacer el requerimiento de riego del cultivo, y la lámina de riego bruta de proyecto se define como la altura de agua necesaria para almacenar, conducir y aplicar el agua al nivel de parcela. Esta cantidad incluye la lámina de evapotranspiración del cultivo, la lámina de control de sales y las láminas correspondientes a las pérdidas de arrastre y evaporación, percolación, conducción, almacenamiento y escurrimiento; también toma en cuenta las aportaciones de lluvia, manto freático y rocío (Peña, 2012).

3.14.18 Requerimiento de riego

Un aspecto fundamental en la ingeniería de riego es lo referente a la cuantificación del consumo de agua o necesidades de agua de los cultivos. Éste es un elemento básico que se utiliza para dimensionar las obras de infraestructura de riego, así como planificar y programar el riego de los cultivos a nivel parcelario. Entonces, la determinación del consumo de agua de los cultivos llamada evapotranspiración real se efectúa mediante la utilización de diferentes métodos. La mayoría de ellos utiliza

variables climáticas como: evaporación de tanque clase “A”, temperatura, humedad relativa, radiación solar, entre otros (Vásquez et al., 2017).

3.15 Uniformidad del sistema de riego por el pivote central

En un sistema de riego es muy importante conocer si el agua se está aplicando de manera uniforme. Una baja uniformidad implica la existencia de zonas del suelo con exceso de agua y otras con escasez, o bien la necesidad de aplicar agua en exceso para que las zonas que reciben menos cantidad estén suficientemente abastecidas. Lo anterior supondrá que en determinadas zonas del campo no se conseguirán producciones satisfactorias (Fernández et al., 2010).

Según Fuentes & Garcia, (2010) la uniformidad de distribución del agua en la superficie del suelo depende, fundamentalmente, de los siguientes factores:

- Del modelo de reparto del agua por el aspersor, que depende, a su vez: del diseño del aspersor, de la presión de trabajo, del número y tipo de boquillas.
- De la disposición de los aspersores
- De la intensidad del viento dominante durante la aplicación del agua. El tamaño de las gotas juega un papel fundamental en las pérdidas causadas por la evaporación, mientras que la longitud y altura de la trayectoria del chorro influye en el arrastre del agua por el viento.

En riego por aspersión suelen manejarse unos coeficientes de uniformidad de Christiansen (CU) del siguiente orden: Descripción CU (%) Cultivo de alta rentabilidad con sistema radicular superficial 88 Cultivos extensivos con sistema radicular de profundidad media 82-88 Frutales y forraje con sistema radicular de profundidad media 70-82 Fuente: Clasificación realizado por Tarjuelo, (2005)

Sin embargo, los ensayos de campo realizados a pivotes dan valores generalmente altos del CU, (del 80 al 90%), con velocidades de viento inferior a 7.50 m/s. Keller (1990) indica valores de CU entre el 90 y 94% para sistemas bien diseñados si se tienen en cuenta los riegos sucesivos al utilizar alta frecuencia. Cuando el viento sopla hacia el centro pivote, en la dirección del lateral, el área regada disminuye alrededor

de un 17%, mientras que cuando sopla hacia el externo, el área crece cerca de un 19% (Tarjuelo, 2005, p. 249).

Los laterales autopropulsados, ya sean pivote o avance frontal, tienen ciertas ventajas sobre los sistemas estacionarios en cuanto a los efectos distorsionadores del viento, ya que: El lateral ocupa infinitas posiciones en su recorrido, compensándose en parte las distorsiones entre riegos sucesivos, el espaciamiento de emisores en el lateral es bastante pequeño, con un gran solapamiento entre ellos (Tarjuelo, 2005, p. 249).

Se considera que una parcela está bien regada cuando se consigue un coeficiente de uniformidad de Herermann Hein (CU_h) entre el 80 y 90%. Con valores mayores al 90% la parcela está muy bien regada. En cambio, con un valor de CU_h menores al 85% se considera que el pivote no riega adecuadamente (Tarjuelo, 2005, p. 329).

$$CU_h = 100 \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^n S_i \left| L_i - \frac{\sum_{i=1}^n L_i S_i}{\sum_{i=1}^n S_i} \right|}{\sum_{i=1}^n L_i S_i} \right] \quad Ec 2$$

Donde:

CU = coeficiente de uniformidad, en mm.

N = número de colectores.

L_i = lamina recogida por el colector (con i variando entre 1 y n), en mm.

S_i = distancia del centro del pivote al colector i, en m.

L₁ – L₂ = cantidad recogida por el colector (con i variando entre 1 y n). en ml.

3.16 Eficiencia de riego

La eficiencia de riego (E_r) se suele entender como el porcentaje de agua bruta aplicada que es aprovechada para satisfacer las necesidades del cultivo y las de lavado de sales (Peña, 2012).

La eficiencia de riego (E_r) está dada por la relación entre el volumen de agua evapotranspirada por las plantas y evaporada del suelo (E_{To}) más la cantidad de agua

necesaria para mantener una concentración adecuada de sales en el perfil enraizado del suelo (L_{sa}), menos la precipitación efectiva caída (P_e), menos la ascensión capilar producida desde la napa freática (L_{ac}); por un lado; y, por el otro lado, al volumen de agua derivado o extraído de la fuente de abastecimiento, que puede ser un río, reservorio, un pozo tubular o un manantial para ser usado en el riego (V_{ex}) (Vásquez et al., 2017).

$$Fr = Ec * Eal * Eap * 100 \quad Ec \ 3$$

Donde:

Fr = eficiencia de riego

Ec = eficiencia de conducción al tanto por 1.

Eal = eficiencia de almacenamiento al tanto por 1.

Eap = eficiencia de aplicación al tanto por 1.

En el libro *Irrigation of Agricultural Lands* se incluyó un capítulo de mejoramiento del riego, en el que se usó el término de eficiencia de riego para expresar el desempeño de un sistema de riego completo o de los componentes del sistema, de acuerdo con las necesidades de la evaluación. Eficiencia global de riego

(E_g). Es el producto de las eficiencias de los componentes individuales de un sistema de riego expresados como cocientes. Los términos que definen la uniformidad y la aceptación de un riego no deberían ser etiquetados como términos de eficiencia, si el producto de todos los considerados no da la eficiencia global. Propusieron que la eficiencia global (E_g) debe ser el producto de las eficiencias de almacenamiento (E_{alm}), de conducción (Ec) y aplicación (Ea) (Peña, 2012).

Según MEF, (2003) citado por MINAGRI, (2015), las eficiencias de riego, indica cuan eficientemente se está aprovechando el agua. Los valores varían entre las diferentes modalidades de riego y los valores promedios son de la siguiente manera:

- Eficiencia de riego por gravedad = 40 %
- Eficiencia de riego por aspersión = 70 %
- Eficiencia de riego por goteo = 90 %

3.16.1 Eficiencia de almacenamiento

La eficiencia de almacenamiento es el cociente de dividir el volumen extraído para riego, entre el volumen que entró al almacenamiento durante el mismo periodo de tiempo. En las presas de almacenamiento debe considerarse el volumen ecológico, el de usos urbanos y otros usos, para repartir las pérdidas por evaporación proporcionales a todos los usos (Peña, 2012).

El balance de agua en un reservorio es igual al volumen de agua que ingresa al reservorio, menos el volumen de sedimentos colmatados en el vaso, el volumen de agua descargado por el aliviadero, el volumen de agua evaporado y el volumen de agua percolado (Vásquez et al., 2017).

La eficiencia de almacenamiento (E_s) se calcula mediante la expresión:

$$E_{alm.} (\%) = \frac{V_{ext}}{V_{talm}} * 100 \quad Ec 4$$

Donde:

V_{ext} : Cantidad de agua extraída del reservorio m^3 .

V_{talm} : Cantidad de agua que requiere el sistema m^3 .

3.16.2 Eficiencia de conducción

La eficiencia de conducción es el cociente de dividir el volumen de agua entregado para riego en las parcelas, entre el volumen que entró a la red de conducción durante el mismo periodo de tiempo o que se extrajo de la fuente de suministro (Peña, 2012).

$$E_c = \left(\frac{\sum Q_i}{Q_o} \right) * 100 \quad Ec 5$$

Donde:

E_c = eficiencia de conducción.

$\sum Q_i$ = sumatoria de los caudales de cada aspersor Lt/sg.

Q_o = caudal que se toma del reservorio Lt/sg.

3.16.3 Eficiencia de aplicación

La eficiencia de aplicación de riego es la cantidad de agua útil para el cultivo que queda en el suelo después de un riego, en relación al total del agua que se aplicó. Generalmente se mide en porcentaje o litros de agua útil en el suelo por cada 100 litros aplicados (MINAGRI, 2015).

Es el cociente de dividir el volumen de agua de riego usado en evapotranspiración en un área específica de riego, más el volumen necesario para mantener un contenido favorable de sales en la solución del suelo, menos el volumen de la lluvia aprovechable en esa área de riego, entre el volumen de agua suministrado o entregado a esa área (Vent). Para simplificar, al numerador se le llama volumen de requerimiento de riego (Vrr) (Peña, 2012).

$$E_{ap} = \frac{\text{lam.max.cultivo}}{\text{lam sistema}} * 100 \quad E_c 6$$

Donde:

E_{apl} = Eficiencia de aplicación

Lam. max. cultivo = Lamina máxima que requiere el cultivo según balance hídrico en mm/día

Lam. sistema = Lamina de aplicación del sistema en mm/día

4 LOCALIZACIÓN

4.1 Características de la zona de estudio

4.1.1 Ubicación geográfica

Está situada geográficamente a una altitud de 3870 m.s.n.m. ubicada a los 16° 42' 5" altitud sur y 68° 15' 15" longitud oeste, a una distancia de aproximada de 32 km de La Paz y a 6 km de localidad de Viacha. (INE, 2017, pág.2)

Figura 11. Ubicación del pivote central



Fuente: Elaboración Propia

4.1.2 Clima

La temperatura mínima promedio es de 2.4°C y la máxima promedio de 17.6°C, la humedad relativa media anual en la zona es de 38.8%. Las precipitaciones son estacionales e irregulares en intensidad y periodicidad alcanzando un promedio anual de 349,10 mm, en los últimos años las precipitaciones se concentran en los meses de diciembre a marzo, alcanzando el 68% de toda la precipitación. Con una velocidad de viento 9 km por hora (Senamhi, 2022).

4.1.3 Fisiografía

Las serranías abarcan aproximadamente el 21 % y las planicies el 79% que constituye la cuenca forrajera y lechera, los cuales son hábiles para la producción agrícola y crianza ganadera. (Ramírez, 2014)

4.1.4 Vegetación

Las especies más representativas que componen la comunidad vegetal son de tipo herbáceos anuales, plurianuales y de tipo arbustivas. Las plantas que predominan en las praderas nativas son gramíneas, en estos campos existen el sobre pastoreo del ganado bovino, ovinos y camélidos. (Mamani & Céspedes, 2012)

4.2 Descripción del sistema de riego

El riego por pivote central es un método de irrigación de cultivos que involucra una extensa estructura de acero con aspersores individuales adjuntos. La línea principal del sistema rota alrededor de un punto central denominado "punto de pivote". Los aspersores están posicionados en salidas a lo largo de la línea principal, y a medida que, rota, el agua se distribuye de manera uniforme sobre los cultivos. Este método de riego es eficiente y altamente efectivo para asegurar que los cultivos reciban la humedad adecuada. Es comúnmente utilizado para abarcar grandes extensiones de tierra. (Senninger Irrigation)

5 MATERIALES Y METODOS

5.1 Materiales de campo

- Cámara fotográfica.
- Cinta métrica y GPS.
- Flexómetro.
- Cronómetro.
- Recipiente de plástico.
- Cilindro infiltrómetro.
- Manómetro.
- Planillas de evaluación de suelos.
- Probeta de 100 ml.

5.2 Materiales de gabinete

- Material de escritorio
- Computadora
- Registro
- Impresora

5.3 Métodos

5.3.1 Metodología de la investigación

La metodología que se utilizó en la investigación fue con un enfoque cuantitativo tomando en cuenta que las variables serán cuantificables (Hernández et al. 1997).

5.3.2 Territorio de la Estación Experimental Choquenaira

La estación tiene una superficie de 160 has, de las cuales el 25% son tierras cultivables, 20% son medianamente cultivables por factores de suelo y clima y el 40% son 30 improductivas por la alta humedad del suelo (anegamiento en época de lluvias); el resto corresponde a la serranía y al pie de ella se encuentra las instalaciones de la Estación (Poma, 2014)

5.3.2.1 Caracterización físico - hídrica del suelo

Para determinar las características físico-hídricas del suelo se realizó El muestreo de suelo en el área regable del pivote central, con la técnica de la X obteniendo 12 muestras a una profundidad de 30 centímetros, para ello se ha utilizado el barreno muestreador de suelo, y después se realizó el cuarteo, para obtener una muestra simple de 1 kg, de lo que se hizo el análisis físico (textura, densidad aparente, densidad real, capacidad de campo) y químico (pH, conductividad eléctrica, N, P, K).

5.3.2.2 Obtención de la velocidad de infiltración por el método del cilindro infiltrómetro

Para determinar la velocidad de infiltración se realizó por el método de los cilindros infiltró-metros, que consiste en utilizar dos anillas cilíndricas sin fondo de metal las que se disponen en el terreno enterrando una de las bases a profundidad de 10 cm mínimamente. El anillo interior fue de 30 cm de diámetro y el anillo exterior de 60 cm, las dos con una altura de 40 cm como se muestran en la siguiente imagen. (Delgadillo & Pérez, 2016). (figura 12)

Figura 12. Cilindro Infiltrómetro



Fuente: Reporte Fotográfico (2022)

Procedimiento en campo

- Los cilindros infiltró-metros se enterraron a una profundidad de 10 a 15 cm, posterior a ello se colocó una regla en sentido vertical para medir la cantidad de agua infiltrada en determinado tiempo.
- Se tuvo suficiente agua, tanto en el cilindro interno como en el externo hasta que el agua ya no se infiltre en el terreno, y con ayuda de una bolsa plástica, de preferencia sea más grande que el cilindro interno, colocar la bolsa dentro del cilindro interno para rellenarlo la bolsa con agua, casi al borde del cilindro.
- Con ayuda de un cronometro se determinar el tiempo y la cantidad de lámina de agua infiltrada del cilindro interno, una vez se rompió la bolsa plástica que contiene el agua del cilindro interno se tomó los datos de tiempo y lamina de agua infiltrada hasta que el agua ya no baje su volumen manteniéndose constante.

Se repitió el procedimiento 10 veces formando una X en el área de riego por el pivote central, teniendo así un valor referencial de la infiltración en el área regable del sistema.

Procedimiento de gabinete

La lámina infiltrada se calculó de la diferencia entre cada valor de lectura del nivel de agua con la anterior, anotando el resultado en valor absoluto (sin signo negativo). Cuando existió datos de nivel de recuperación del agua, éste se ha considerado el nivel de agua anterior.

$$LAM = K'.Tn' \text{ (mm, min)} \quad Ec 7$$

Donde:

LAM = Lamina acumulada infiltrada en el suelo (mm)
K' y n' = Son constantes características de cada suelo
T = Tiempo de infiltración. (min)

Para calcular los coeficientes fue necesarios determinar la ecuación de la infiltración acumulada, la que se realizó por el método de los mínimos cuadrados utilizando la hoja de cálculo de Microsoft Excel.

El método de los mínimos cuadrados permitió obtener los coeficientes necesarios para definir una curva representativa de la infiltración acumulada utilizando los datos obtenidos en campo. Es decir, la curva que más se aproxima a los puntos obtenidos en la prueba cuando se grafican en un plano de coordenadas.

Kostiakov (1932) propuso un modelo exponencial, el cual desarrollo de manera empírica, como se muestra en la siguiente ecuación (Alvarado Batres & Barahona-Palomo, 2017):

$$I = k * t^n \quad Ec. 1$$

donde

I = velocidad de infiltración básica, en cm/h.

k = factor numérico adimensional, representa la velocidad de infiltración en cm/h durante el intervalo inicial, se obtiene analítica o gráficamente y es el parámetro del ajuste de los datos de campo al modelo.

n = exponente que varía entre 0 y -1 . Representa la tasa de cambio de la variable dependiente (I) respecto de la variable independiente (t), explicando la disminución de la I con el t . Cuando se grafican los datos de campo y se ajustan al modelo, es la pendiente de la curva de ajuste.

t = tiempo de infiltración, en minutos.

el siguiente cuadro se muestra el cálculo de la función de la infiltración instantánea y acumulada por el método de los mínimos cuadrados, de donde resulta la ecuación de la infiltración instantánea que corresponde a la siguiente expresión:

$$I_{ins} = 578,13 t^{-0.36}$$

cuando $t = \text{min}$

5.4 Variables de respuesta

5.4.1 Situación socioeconómica del sistema de riego por pivote central a mejorar

5.4.1.1 Actividad económica

La situación económica de la Estación Experimental de Choquenaira se basa en El agroecosistema que está conformado principalmente por el subsistema pecuario, dentro del cual se crían tres especies, bovinos, ovinos y camélidos. De los cuales se aprovecha su carne, lana y leche. Por lo cual la fuente de ingresos se centra en la elaboración de productos lácteos por lo cual se tiene que asegurar el alimento para estos animales.

5.4.1.2 Épocas en que realiza la siembra de forrajes

Una de las actividades de mayor importancia para la producción láctea es producción de forraje, el cual llega a ser determinante durante el año

Las especies forrajeras que anualmente se siembran son la cebada, avena y triticale. Sembrándose a principios de noviembre con la avena por ser una especie semitardía;

en cambio los cultivares de cebada y triticale que son de ciclo corto suelen sembrarse a mediados del mes de diciembre, misma que puede extenderse hasta finales de enero. La finalidad de estas siembras diferenciadas es encontrar o llegar a coincidir con el tiempo apropiado de cosecha de las tres especies forrajeras, especialmente cuando se tiene que realizar el ensilado.

5.4.1.3 Uso y destino del forraje

Ensilaje

Los insumos utilizados en la elaboración de ensilado, consistió básicamente en la adición de azúcar en una proporción de 20:1 (20 chatas y 1 qq de azúcar) y , el objeto de la aplicación es, elevar el nivel energético y dar una mayor palatabilidad a los forrajes conservados, tendiente a reducir las pérdidas por el no consumo de los animales; la especie utilizada en cantidad superior fue la cebada y la diferencia fue cubierto con la avena.

Henificado

La elaboración de heno, al no existir heniles, se continúa conservando por el sistema tradicional de apilonado (pilonas), el cual consiste simplemente en el amontonado de las plantas de cereales; estos piensos concentrados tienen una humedad de 18% aproximadamente; los mismos se constituyen en un alimento esencial por la reducción del peligro de timpanismo en los rumiantes

5.4.1.4 Parámetros de Funcionamiento del Sistema de Riego por Pivote Central

- Radio Irrigado

Se realizó la medición con una cinta métrica, la longitud del radio que alcanza a mojar el pivote, que corresponde desde el primer aspersor hasta el último aspersor que se encuentra al final del voladizo, teniendo un radio de 80 metros lineales de mojado.

- **Velocidad de desplazamiento**

La velocidad se calculó midiendo el tiempo que demora en desplazarse la última rueda para recorrer una distancia de 50 m, para lo cual se utilizó un cronometro que nos indicó el periodo que tardó en llegar de un punto al otro que fue marcado e identificado, una cinta métrica permitió determinar la distancia de 50 m, para determinar la velocidad se utilizó la ecuación (3) que es utilizado en las ciencias físicas en el tema de movimiento rectilíneo uniforme, puesto que la máquina del pivote se mueve a una velocidad constante que es controlada por el tablero de control.

$$Vd = D * T \quad Ec 8$$

Donde:

Vd.: Velocidad de desplazamiento (m/s).

D: Distancia del recorrido en una vuelta (m).

T: Tiempo que demora en recorrer una vuelta (h).

Para lo cual la velocidad nos da un valor de 125,4 m/h teniendo un funcionamiento del 100% del velocímetro del panel de control que se encuentra en el eje del sistema de pivote central.

- **Tiempo de revolución**

El tiempo de una revolución de sistema pivote central se calculó midiendo el tiempo que demora en desplazarse en una revolución completa del pivote central, con ayuda de un cronometro la revolución duro 4 horas. Teniendo el velocímetro del panel de control en funcionamiento del 100% del sistema.

Posterior a ello se elaboró el siguiente cuadro (3) donde se muestra los diferentes tiempos de trabajo del sistema de riego, según los porcentajes que se tiene en el velocímetro del panel de control del sistema pivote.

Cuadro 1. Tiempos de trabajo con respecto al velocímetro

PORCENTAJE (%)	HORAS POR VUELTA
100	4
90	4,44
80	5,56
70	7,94
60	13,23
50	26,46
40	66,14
30	220,46
20	1102,29
10	11022,93

Fuente: Elaboración Propia

- Área de cobertura

El área irrigada por el pivote central se calculó a través de la ecuación, (9) tomando en cuenta que el área regada por la máquina describe una circunferencia.

$$A = \pi \times Ri^2 / 1000 \quad Ec 9$$

Donde:

A: área total irrigada (ha).

Ri: distancia total irrigada (m).

π : Su valor es 3.141592654

en tal sentido con ayuda de una guincha se pudo medir el radio de mojado de unos 80 metros desde el eje hasta el límite del último aspersor. Dando nos un área de 2,01 hectáreas.

- Caudal del sistema

La medición del caudal de operación del sistema de riego se realizó mediante el cálculo de gasto de cada aspersor que tiene el sistema Y se calculó con la siguiente ecuación (10)

$$Qs = \sum Qi \quad Ec 10$$

Donde:

Q_s = caudal del sistema (m^3/s).

Q_i = caudal de cada emisor (m^3/s).

- Lámina aplicada

La lámina aplicada se obtuvo mediante la ecuación (6) siguiente. Los datos necesarios para determinar la lámina aplicación se obtuvieron con mediciones directas al tener el sistema en funcionamiento.

$$Lm = (Q_s \times Tr) / (A \times 10) \quad Ec 11$$

Donde:

Lm : Agua total aplicada por el equipo (mm).

Q_s : Caudal del sistema o medida (m^3/h).

Tr : Tiempo gastado para dar una vuelta (h).

A : Área total irrigada (ha).

Reemplazando los valores en la ecuación se pudo obtener la lámina aplicada por el sistema de 10,88 mm. agua que descarga por sus aspersores en el área regable del sistema.

- Presión de operación del sistema

La presión de operación se obtuvo mediante un manómetro de glicerina conectado a la tubería de ascenso de la torre central. La presión medida es de 6 a 7 bares. De esta presión depende el buen funcionamiento del sistema ya que garantiza tener un adecuado riego por el pivote central.

5.4.1.5 Uniformidad del sistema de riego por el pivote central

primeramente, se tuvo que identificar el color y diámetro de cada boquilla de cada aspersor, para colocarlo de forma ascendente partiendo del eje del pivote. Esto ayudara a que el volumen de agua se distribuya bien. En el anexo 5 se identifica el color, código, diámetro y caudal de cada aspersor del sistema.

para calcular la uniformidad del sistema de riego por pivote central se utilizó la ecuación de Heermann y Hein (CU) donde nos indica que primeramente se tiene que colocar recipientes que estén dispuestos todos con una distancia uniforme, que comiencen del eje del pivote hacia el exterior. Para la segunda fila de recipientes se tiene que medir 50 metros del perímetro exterior y de ahí colocar los recipientes con dirección al eje del pivote, formando una “V”.

Figura 13. *Formación en V de los recipientes*



Fuente: Reporte Fotográfico (2021)

Posterior a ello se dará funcionamiento y marcha del sistema de riego del pivote central a su máxima capacidad, una vez el sistema halla pasado por los recipientes se elaboró la tabla de registro de los volúmenes de cada recipiente que se muestran en el anexo 14.

5.4.1.6 Cálculo de la eficiencia de riego

- Eficiencia de conducción

Para hallar la eficiencia de conducción se realizó la medición de los caudales de cada aspersor mediante pluviómetros acomodados a lo largo del brazo del pivote central formando una V, realizando tres repeticiones para luego tener un promedio del caudal

de cada aspersor, se realizó la suma de todos los caudales. Como también se calculó el caudal de la toma del reservorio así a el pivote central, con los datos obtenidos se calculó la eficiencia de conducción.

- **Eficiencia de almacenamiento**

Utilizando la ecuación (4) de la eficiencia de almacenamiento, resulto un 70,76%, por lo cual se calculó del volumen de agua extraída por el pivote central del reservorio dando funcionamiento al sistema, evidenciando que el reservorio de 636,9 m³ de agua solo alcanzó a cubrir el 70 % del área total que tiene el sistema. por tal motivo reduce la eficiencia de almacenamiento.

Se calculo un volumen de 1000 m³ de agua para poder cubrir el área regable del sistema por pivote central, pudiendo así mejorar el buen funcionamiento del sistema

- **Eficiencia de aplicación**

Con la ayuda de la ecuación (6) se calculó la eficiencia de aplicación, para ello se necesitó saber la lámina de aplicación de agua del sistema de riego por pivote central, en funcionamiento del 100 % del sistema. Mas la lámina de agua que requiere el cultivo que será regado por el sistema.

5.4.2 Ingeniería del sistema de riego por pivote central considerando los aspectos necesarios de acuerdo a sus requerimientos.

5.4.2.1 Oferta de agua para el sistema de riego

El sistema de riego por pivote central cuenta con un reservorio pequeño que con ayuda de una cinta métrica se pudo medir una profundidad de 1,5 metros que tiene el reservorio, Con la misma cinta métrica se pudo medir el área irregular que tiene el reservorio. Con los datos obtenidos se obtuvo un volumen de 636 m³ con una caudal de recarga de 3,46 l/sg. por parte de un pozo surgente con un tiempo de 4 horas de trabajo de una motobomba que lleva el agua del pozo hasta el reservorio. Como se muestra en la figura. Teniendo un volumen de 686,65 l/sg destinados para el riego.

5.4.2.2 Parámetros básicos de suelo

Para obtener los parámetros básicos del suelo se tomó la muestra de suelo de área regable del sistema, para ser analizada al Laboratorio LAFASA. Obteniendo los siguientes resultados que se presentan en el cuadro.

Cuadro 2. Resultados del Análisis Físico del suelo

PARAMETROS		UNIDAD	RESULTADO	METODO
Textura	Arena	%	32	Bouyoucos
	Limo	%	38	
	Arcilla	%	30	
	clase textural	-	-	Franco Arcilloso
Densidad aparente		g/cm ³	1,287	Probeta
pH del suelo		-	8,73	Potenciómetro
Conductividad Eléctrica		dS/cm	0,0066	Potenciómetro
Humedad a CC		%	32	Ollas a presión (masa)
Humedad a PMP		%	18	Ollas a presión (masa)

Fuente: Laboratorio LAFASA

5.4.2.3 Evaluación del sistema de riego por pivote central

El riego por pivote central es un método de irrigación de cultivos que involucra una extensa estructura de acero con aspersores individuales adjuntos. La línea principal del sistema rota alrededor de un punto central denominado "punto de pivote", para lo cual se recabará los siguientes parámetros del sistema de riego.

La máquina de riego pivote central está instalada fijamente, es de marca Valley de procedencia de estados unidos modelo 8000, la estructura piramidal ubicada en el eje central de rotación está formada por perfiles angulares de acero galvanizado y anclada mediante pernos sobre la plataforma cuadrada de hormigón armado, se abastece de agua a través de un tubo de subida y un codo, ambos de acero galvanizado, teniendo el diámetro de tubo de subida de agua y los laterales de 6 pulgadas, el voladizo tiene

una tubería de 4 pulgadas de diámetro. La altura de la torre del pivote es de 4.22 m, la altura de luz entre el suelo y la estructura de la viga celosía es de 3.33 m, la máxima altura al lomo de la tubería medida desde el suelo es de 5.30 m, las torres de soporte miden 4.06 m y en cuanto al final del voladizo la altura es de 4.50 m. La totalidad de la máquina regante es de acero galvanizado como se muestra en la figura (13).

Figura 14. Sistema de Riego por Pivote Central



Fuente: VALLEY IRRIGATION

- **Características del aspersor**

El aspersor Senninger® Super Spray® tiene opciones de almohadillas deflectoras intercambiables para satisfacer distintos requisitos de tamaño de gota, cultivo, clima y suelo. Super Spray es la boquilla de aspersión más versátil para riego con pivote central, con sus veintidós almohadillas deflectoras intercambiables a presión para una fácil personalización. Con una capacidad de caudal de 0,27 a 29,9 gpm (61 a 6805 L/h), que resiste una presión de 6 a 40 psi (0,41 a 2,76 bar).

- Boquilla UP3® de fácil cambio: simplemente presione y tire para quitarla y colóquela y haga clic para reinstalarla; se identifican fácilmente con un código de color y tienen garantía de mantener el tamaño de orificio correcto durante cinco años.

- Las boquillas a presión UP3 son fáciles de quitar para limpiarlas o cambiarlas. Para quitar la boquilla, simplemente presione y tire de ella, luego colóquela y haga clic para volver a instalarla. No es necesario desmontar ni quitar el aspersor.
- Las boquillas codificadas por colores son muy visibles y fáciles de identificar. Los números de las boquillas (que corresponden a los tamaños de los orificios en 64avos de pulgada) son visibles en las orejas, y los tamaños medios se indican debajo del segundo dígito y las muescas en el borde inferior de la boquilla.

5.4.2.4 Eficiencia de riego según propuesta

La eficiencia de riego del sistema pivote central que resultó del producto de la eficiencia de almacenamiento, la eficiencia de conducción y la eficiencia de aplicación, cuyos valores resultaron de 90,00%, 93,33% y 93.77% respectivamente, la eficiencia de riego resultó del 91,94% valor que indica que la eficiencia del sistema de riego por pivote central es eficiente. Sin embargo, se tendría que ampliar el reservorio de agua y conectar una bomba sumergible que suministre todos los días el caudal del pozo así el reservorio de agua, para un buen funcionamiento del sistema de riego por pivote central.

5.4.2.5 Balance hídrico

El balance hídrico de oferta y demanda de agua para el área de estudio, se realizó aplicando el software ABRO 02 v.3.1, para lo cual se trabajó con: datos climáticos (Temperaturas máximas y mínimas, Precipitación Pluvial, Humedad Relativa, Horas Sol, Viento), cédula de cultivos, área de cultivo y caudal de oferta de agua, para el piso ecológico respectivo (Altiplano). El balance hídrico del área de estudio con el programa ABRO.

5.4.2.6 Evapotranspiración

El cálculo de la ETP (método de Penman- Monteith), utilizando los datos climáticos, se estimó de forma directa por el programa (Cuadro 3). Los mayores valores de la Evapotranspiración Potencial (ETP) son los meses de octubre a diciembre, con el valor de una media anual de 1.345,94 mm/año.

Cuadro 3 Evapotranspiración potencial según Penman – Monteith.

Meses	J	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	Anual
ET mm/día	2,91	2,94	3,43	3,90	4,29	4,52	4,23	3,91	3,76	3,66	3,51	3,20	
ET mm/mes	87,30	91,14	106,33	117,00	132,99	135,60	131,13	121,21	105,28	113,46	105,30	99,20	1.345,94

Fuente: elaboración propia, en base a PNR- ABRO 3.1. (2004).

5.4.2.7 Precipitación efectiva

El programa también calculo la precipitación efectiva para el piso ecológico del altiplano. El Cuadro 4, muestra la precipitación media mensual y la precipitación efectiva de la zona, calculada con el programa ABRO v. 3.1.

Cuadro 4 Precipitación media mensual y precipitación efectiva.

Meses	J	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	Anual
Prec. (mm)	3,22	8,78	5,46	16,52	36,83	40,94	100,51	118,80	89,33	61,79	21,09	7,75	511,02
P.E. (mm)	0,00	0,00	0,00	3,16	17,38	20,26	61,96	74,76	54,13	34,85	6,36	0,00	272,87

Fuente: elaboración propia, en base a PNR- ABRO 3.1. (2004).

5.4.2.8 Coeficiente del cultivo

Considerando las características de la información climática y la cédula de cultivos, el programa ABRO 3.1., estimo los valores de los coeficientes de cultivos (Kc) de acuerdo a las condiciones particulares de la zona de estudio, valores determinados por el Programa Nacional de Riego PRONAR y la FAO en el manual 24 respectivamente.

Los coeficientes de cultivo (kc) utilizados por el programa ABRO 3.1., para el piso ecológico del altiplano se detallan en el Cuadro 5.

Cuadro 5 Coeficientes de cultivo para demanda de agua.

Kc PARA CONDICIONES DEL ALTIPLANO					
CULTIVO	inicial	crecimiento	desarrollo	final	PERIODO DEL CULTIVO (días)
cultivo de cebada	0,37	0,76	1,15	0,6	120-180
cultivo de avena forrajera	0,43	0,85	1,15	0,8	120-180
cultivo de triticale	0,37	0,58	1,14	0,57	120-180

Fuente. PNR – ABRO 3.1. (2002) en base a PRONAR y FAO.

5.4.2.9 Cálculo de la evapotranspiración real

El Cuadro 6, detalla la ETR de los cultivos, las áreas a regar y la exigencia neta de agua mensual, es decir el requerimiento de agua de los cultivos propuestos (papa temprana, oca y haba verde) independiente del método de riego a aplicar, en la situación con proyecto.

Cuadro 6 Evapotranspiración real, área y requerimiento de agua de cultivos.

Meses	J	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M
Avena forrajera												
ETR Total (mm)	0,00	0,00	0,00	40,95	99,74	155,94	78,68	0,35	0,75	1,15	0,60	0,0
Área total (ha)	0,00	0,00	0,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	0,00
Req. Neto (m ³)	0,00	0,00	0,00	755,72	1647,23	2713,64	334,42	0,00	496,58	1.912,52	1.136,34	0,0
Cebada forrajera												
ETR Total (mm)	0,00	0,00	0,00	43,29	101,07	155,94	78,68	44,85	80,01	130,48	63,18	0,00
Área total (ha)	0,00	0,00	0,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	0,00
Req. Neto (m ³)	0,00	0,00	0,00	802,52	1673,83	2713,64	334,42	0,00	517,64	1.912,52	1.136,34	0,00
Triticale												
ETR Total (mm)	0,00	0,00	0,00	43,29	77,13	154,58	74,74	44,85	61,06	129,34	60,02	0,0
Área total (ha)	0,00	0,00	0,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	0,00
Req. Neto (m ³)	0,00	0,00	0,00	802,52	1195,06	2686,52	255,74	0,00	138,63	1.889,83	1.073,16	0,0

Fuente: elaboración propia (2024), en base a PNR- ABRO 3.1. (2002).

5.4.2.10 Balance oferta/demanda

El Cuadro 32, presenta los volúmenes de agua requeridos por los cultivos para el riego consuntivo de 8,33 y 13,20 hectáreas respectivamente, tomando en cuenta los aportes respectivos de agua y eficiencia de riego calculado (78%) en los sistemas propuestos.

Cuadro 7 Volúmenes de agua disponible y requerida por cultivos.

Meses	J	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	Anual
Avena forrajera													
Demanda													
Req. Bruto Tot.(m ³)	0,00	0,00	0,00	839,69	1.830,26	3.015,16	371,58	0,00	551,76	2.125,02	1262,60	0,00	9.996,06
Demanda Total (l/s)	0,00	0,00	0,00	0,32	0,68	1,16	0,14	0,00	0,23	0,79	0,49	0,00	3,82
Caud. Unit. Brut (m ³)	0,00	0,00	0,00	0,16	0,34	0,58	0,07	0,00	0,11	0,40	0,24	0,00	1,91
Oferta													
Fuente: reservorio. (l/s)	0,00	0,00	0,00	0,33	0,70	1,45	0,46	0,56	0,33	0,81	0,51	0,00	5,15
Of. Real Total (l/s)	0,00	0,00	0,00	0,33	0,70	1,45	0,46	0,56	0,33	0,81	0,51	0,00	5,15
Balance													
Balance (l/s)	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02	0,29	0,32	0,56	0,10	0,02	0,02	0,00	
Sup. Rieg Max. (ha)	0,00	0,00	0,00	2,04	2,05	2,49	6,63	0,00	2,89	2,04	2,09	0,00	
Superf. Adicio (ha)	0,00	0,00	0,00	0,04	0,05	0,49	4,63	0,00	0,89	0,04	0,09	0,00	
Área Deficitaria (ha)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cebada forrajera													
Demanda													
Req. Brut. Total (m ³)	0,00	0,00	0,00	891,69	1.859,81	3.619,64	1.180,26	1.436,26	775,97	2.125,02	1262,60	0,00	13.151,25
Demanda Total (l/s)	0,00	0,00	0,00	0,34	0,69	1,40	0,44	0,54	0,32	0,79	0,49	0,00	5,01
Caud. Unit. Brut (m ³)	0,00	0,00	0,00	0,17	0,35	0,35	0,11	0,13	0,08	0,40	0,24	0,00	1,83

Oferta													
Fuente: reservorio (l/s)	0,00	0,00	0,00	0,35	0,70	1,42	0,45	0,56	0,33	0,81	0,51	0,00	5,13
Oferta total (l/s)	0,00	0,00	0,00	0,35	0,70	1,42	0,45	0,56	0,33	0,81	0,51	0,00	5,13
Balance													
Balance (l/s)	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02	0,02	0,00	
Sup. Rieg. Max. (ha)	0,00	0,00	0,00	2,03	2,02	4,07	4,08	4,18	4,12	2,04	2,09	0,00	
Superf. Adici. (ha)	0,00	0,00	0,00	0,03	0,02	0,07	0,08	0,18	0,12	0,04	0,09	0,00	
Área Deficitaria (ha)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Triticale													
Demanda													
Req. Brut. Total (m ³)	0,00	0,00	0,00	891,69	1.327,85	3.589,51	1.092,84	1.436,26	354,85	2.099,81	1192,40	0,00	11.985,20
Demanda Total (l/s)	0,00	0,00	0,00	0,34	0,50	1,38	0,41	0,54	0,15	0,78	0,46	0,00	4,56
Caud. Unit. Brut (m ³)	0,00	0,00	0,00	0,17	0,25	0,35	0,10	0,13	0,04	0,39	0,23	0,00	1,66
Oferta													
Fuente: reservorio (l/s)	0,00	0,00	0,00	0,36	0,52	1,40	0,43	0,56	0,17	0,80	0,48	0,00	4,72
Oferta total (l/s)	0,00	0,00	0,00	0,36	0,52	1,40	0,43	0,56	0,17	0,80	0,48	0,00	4,72
Balance													
Balance (l/s)	0,00	0,00	0,00	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,00	
Sup. Rieg. Max. (ha)	0,00	0,00	0,00	2,09	2,10	4,04	4,22	4,18	4,64	2,04	2,09	0,00	
Superf. Adici. (ha)	0,00	0,00	0,00	0,09	0,10	0,04	0,22	0,18	0,64	0,04	0,09	0,00	
Área Deficitaria (ha)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	

Fuente: elaboración propia (2024), en base a PNR- ABRO 3.1. (2002).

5.4.2.11 Requerimientos de agua por el cultivo

Cuadro 8 requerimiento de agua del cultivo

AVENA FORRAJERA	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	TOTAL
Kc (Cultivo 1)	0,35	0,75	1,15	0,6	0,35	0,75	1,15	0,6	
ETR	40,95	99,743	155,94	78,678	42,424	78,96	130,48	63,18	
Req. Riego (mm)	37,78	82,36	135,68	16,72	0	24,82	95,62	56,81	449,8225
Area (ha)	2	2	2	2	2	2	2	2	
Req. Neto (m3)	755,72	1647,2	2713,6	334,42	0	496,58	1912,5	1136,3	8996,45
CEBADA FORRAJERA	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	TOTAL
Kc (Cultivo 1)	0,37	0,76	1,15	0,60	0,37	0,76	1,15	0,60	
ETR	43,29	101,07	155,94	78,68	44,85	80,01	130,48	63,18	
Req. Riego (mm)	40,13	83,69	135,68	16,72	0,00	25,88	95,63	56,82	454,55
Area (ha)	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	
Req. Neto (m3)	802,52	1673,83	2713,64	334,42	0,00	517,64	1912,52	1136,34	9090,90
TRITICALE	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	TOTAL
Kc (Cultivo 1)	0,37	0,58	1,14	0,57	0,37	0,58	1,14	0,57	
ETR	43,29	77,13	154,58	74,74	44,85	61,06	129,34	60,02	
Req. Riego (mm)	40,13	59,75	134,33	12,79	0,00	6,93	94,49	53,66	402,07
Area (ha)	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	
Req. Neto (m3)	802,52	1195,06	2686,52	255,74	0,00	138,63	1889,83	1073,16	8041,46

Fuente: elaboración propia (2024), en base a PNR- ABRO 3.1. (2002).

5.4.2.12 Sistema de captación

El sistema de captación que brinda el agua para el reservorio del sistema de riego por pivote central consta de un pozo de agua surgente que consta de un caudal constante de 3,46 l/sg. con ayuda de una motobomba de 5 hp ayuda a llevar el agua con dirección Asia el reservorio como se muestra en la figura.

5.4.2.13 Reservorio de distribución

El sistema de riego por pivote central consta de un reservorio de tierra pequeño de un área aproximado 386 m², con una profundidad de 1,65 m. cantando un volumen de 636,9 m³ que ofrece al sistema de riego. Pudiendo regar solo la mitad del área que cubre el sistema.

5.4.2.14 Ampliación del reservorio

Según al estudio realizado para el buen funcionamiento del sistema de riego por pivote central requiere un volumen bruto de 1000 m³ de agua para poder cubrir toda el área que riega el sistema. por tal motivo se requiere una ampliación del área al reservorio de tierra de 219,2 m².

5.4.2.15 Sistema de aducción y distribución

El sistema de aducción y distribución del sistema consta de una electrobomba de 12 hp, controlada por un panel de encendido y apagado como se muestra en la figura. Proporcionando un caudal de 6 l/sg., con una presión de trabajo de 6 a 7 bares. Portando una válvula de antirretorno a la salida del conducto.

6 RESULTADOS

6.1 Velocidad de Infiltración Básica

En el siguiente cuadro se muestra las repeticiones que se hizo para evaluar la infiltración básica que se tiene en la zona de estudio.

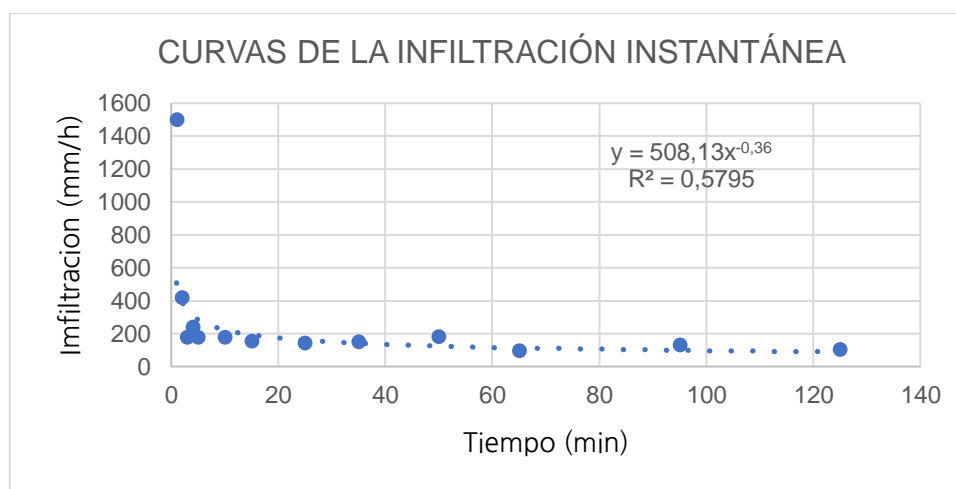
Cuadro 9. Muestreo de las Láminas de las pruebas de Infiltración

N	TIEMPO ACUMULADO (min)	LAMINA ACUMULADA (mm)									
		MUESTRA N-1	MUESTRA N-2	MUESTRA N-3	MUESTRA N-4	MUESTRA N-5	MUESTRA N-6	MUESTRA N-7	MUESTRA N-8	MUESTRA N-9	MUESTRA N-10
1	1,00	44	36	28	24	30	20	15	25	17	25
2	2,00	51	41	35	30	40	28	26	32	21	34
3	3,00	54	45	39	35	45	38	37	35	23	38
4	4,00	57	46	41	39	50	53	55	39	25	40
5	5,00	59	49	44	42	56	57	63	42	27	47
6	10,00	75	56	58	71	75	72	78	57	35	55
7	15,00	81	62	64	97	100	91	92	70	45	68
8	25,00	100	74	89	117	121	105	110	94	60	75
9	35,00	116	88	112	139	140	123	119	119	78	98
10	50,00	149	107	140	171	157	149	126	165	94	125
11	65,00	175	121	164	206	195	168	133	189	119	166
12	95,00	221	144	217	261	226	184	162	254	158	198

Fuente: Elaboración Propia

Teniendo una correlación de 58.92%, este resultado se observar en la figura (13)

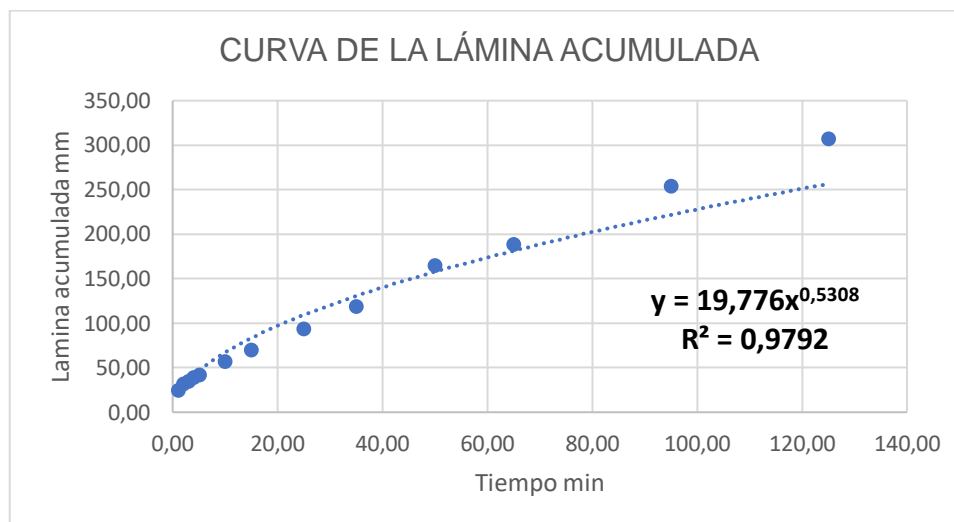
Figura 15 Infiltración Instantánea



Fuente: Elaboración Propia

que resultado de una confiabilidad de la función obtenida de 97.92%, este resultado se puede observar en la figura (14)

Figura 16. Lamina Acumulada



Fuente: Elaboración Propia

con ayuda de los datos obtenidos de la infiltración básica se pudo hallar la velocidad de infiltración básica que es de 15,673 mm/h. clasificado con movimiento lento, este resultado indica que la pluviometría de los aspersores del pivote central no debe de superar este resultado, puesto que se ocasionaría una escorrentía superficial que causaría la erosión del suelo.

Cuadro 10. Velocidad de Infiltración Básica del Área de Estudio

N° Prueba	tiempo en que ocurre la (VIB) en (min)	Velocidad de Infiltración Básica (VIB) (cm/h)	clasificación VIB Cisneros 2010
1	391,44	1,57	Moderadamente lenta
2	419,46	1,11	Moderadamente lenta
3	332,58	1,42	Moderadamente lenta
4	270,42	1,72	Moderadamente lenta
5	256,92	2,21	Moderada
6	367,38	0,84	Moderadamente lenta
7	362,04	0,70	Moderadamente lenta
8	281,52	1,59	Moderadamente lenta
9	294,36	0,99	Moderadamente lenta
10	330,3	1,37	Moderadamente lenta

Fuente: elaboración Propia

De acuerdo a Mamani (2017), menciona que la velocidad de infiltración básica oscila en un valor de 8 hasta 12 mm/h en las áreas cultivables de la estación experimental de Choquenaira, Según Arragan (2014), la velocidad de infiltración básica (VIB) encontrados en tres puntos de prueba del área investigativa de la Estación Experimental Choquenaira, va de 5,5 a 6 mm/h valores característicos de la clase textural franco arcilloso.

Como se puede apreciar los valores de infiltración variaran de acuerdo a la clase textural y al porcentaje de porosidad que presente el suelo, la textura del suelo en estudio es característico de un franco arcilloso

6.2 Los Parámetros Hidráulicos del Sistema de Riego

Se recabaron los datos de los siguientes parámetros hidráulicos del sistema de riego por pivote central.

Cuadro 11. *Parámetros del Sistema de Riego por Pivote Central*

Parámetros del Sistema de Riego al 100% de trabajo					
Rul	radio irrigado	80	m		
Vd	velocidad de desplazamiento	125,4	m/h	2,09	m/min
Tr	tiempo de revoluciones	4,00	h		
A	Área de cobertura	2,01	ha	20106,24	m ²
Qs	Caudal del sistema	27,34	m ³ /h		
Lm	lamina aplicada	5,44	mm		
presión de operación del sistema			6-7	bar	
Coeficiente de Uniformidad			80		%

Fuente: Elaboración Propia

Los parámetros hidráulicos de riego encontrados pueden diferir en un riego siempre en cuanto la presión y la velocidad de trabajo varíen, excepto el área regada. Si la presión de trabajo se incrementa la pluviometría será mayor o viceversa, en otro caso si la velocidad es lenta también la pluviometría será mayo o viceversa, entonces, un adecuado riego se realizará teniendo una presión y una velocidad de trabajo prudente, así mismo también puede revisar el manual de diseño.

6.3 Cálculo de la dosis de Riego

Según balance hídrico se calculó la dosis de riego desde la siembra hasta el segundo corte del forraje. en función a la lámina de aplicación del sistema de riego por pivote central con el objeto de cubrir toda el área de riego que tiene el sistema, en el presente cuadro se muestra la frecuencia de riego, numero de riegos al mes y el volumen de agua que requiere el sistema para cubrir con las necesidades del cultivo.

Cuadro 12 Dosis de riego para el Cultivo de avena

Fase	Mes	días	Pr	Ln	Lb	L apli	NR	Fr	Vol del pivot	vol req
			[m]	[mm]	[mm]	[mm]			[m3/2ha]	m3
PMP a CC	SEP	1	0,15	0	0,00	5,44	0,00	0,00	9500,00	0,00
Desarrollo	SEP	30	0,15	6,30	7,00	5,44	1,29	23,32	9500,00	12219,74
Mediana Estación	OCT	31	0,25	13,73	15,25	5,44	2,80	11,06	9500,00	26635,15
Ultima Estación	NOV	30	0,3	22,61	25,13	5,44	4,62	6,50	9500,00	43878,64
Desarrollo	DIC	31	0,4	0,00	0,00	5,44	0,00	0,00	0,00	0,00
Mediana Estación	ENE	31	0,4	0,00	0,00	5,44	0,00	0,00	0,00	0,00
Ultima Estación	FEB	28	0,4	0,00	0,00	5,44	0,00	0,00	0,00	0,00
Desarrollo	MAR	31	0,4	15,94	17,71	5,44	3,26	9,52	9500,00	30924,80
	ABR	30	0,4	9,47	10,52	5,44	1,93	15,51	9500,00	18374,23

Fuente: elaboración propia (2024)

Cuadro 13 Dosis de riego para el Cultivo de cebada

Fase	Mes	días	Pr	Ln	Lb	L apli	NR	Fr	Vol del pivot	vol req
			[m]	[mm]	[mm]	[mm]			[m3/2ha]	m3
PMP a CC	SEP	1	0,2	0	0	5,44	0,00	0,00	0,00	0,00
Desarrollo	SEP	30	0,2	6,69	7,43	5,44	1,37	21,96	9500,00	12976,48
Mediana Estación	OCT	31	0,25	13,95	15,50	5,44	2,85	10,88	9500,00	27065,23
Ultima Estación	NOV	30	0,3	22,61	25,13	5,44	4,62	6,50	9500,00	43878,64
Desarrollo	DIC	31	0,35	0,00	0,00	5,44	0,00	0,00	0,00	0,00
Mediana Estación	ENE	31	0,4	0,00	0,00	5,44	0,00	0,00	0,00	0,00
Ultima Estación	FEB	28	0,4	0,00	0,00	5,44	0,00	0,00	0,00	0,00
Desarrollo	MAR	31	0,4	15,94	17,71	5,44	3,26	9,52	9500,00	30924,80
	ABR	30	0,4	9,47	10,52	5,44	1,93	15,51	9500,00	18374,23

Fuente: elaboración propia (2024)

Cuadro 14 Dosis de riego para el Cultivo de triticales

Fase	Mes	dias	Pr	Ln	Lb	L apli	NR	Fr	Vol del pivot	vol req
			[m]	[mm]	[mm]	[mm]			[m3/2ha]	m3
PMP a CC	SEP	1	0,2	0,00	0,00	5,44	0,00	0,00	0,00	0,00
Desarrollo	SEP	30	0,2	6,69	7,43	5,44	1,37	21,96	9500,00	12976,48
Mediana Estación	OCT	31	0,25	9,96	11,07	5,44	2,03	15,24	9500,00	19323,78
Ultima Estación	NOV	30	0,3	22,39	24,88	5,44	4,57	6,56	9500,00	43440,12
Desarrollo	DIC	31	0,35	0,00	0,00	5,44	0,00	0,00	0,00	0,00
Mediana Estación	ENE	31	0,4	0,00	0,00	5,44	0,00	0,00	0,00	0,00
Ultima Estación	FEB	28	0,4	0,00	0,00	5,44	0,00	0,00	0,00	0,00
Desarrollo	MAR	31	0,4	15,75	17,50	5,44	3,22	9,64	9500,00	30557,88
	ABR	30	0,4	8,94	9,94	5,44	1,83	16,42	9500,00	17352,63

Fuente: elaboración propia (2024)

7 CONCLUSION

- El coeficiente de uniformidad de Heermann y Hein del 80.83% indica que los emisores utilizados, el espaciamiento de estos son adecuados y trabajan correctamente en las condiciones de clima del altiplano, por consiguiente, se tiene una adecuada distribución de agua al momento de regar. Por otra parte, se tiene una eficiencia de riego menor a lo recomendado ya que tiene como defecto una mala eficiencia de almacenamiento, lo cual reduce el % de eficiencia al regar con el sistema de pivote central.

- Los datos de los parámetros hidráulicos del sistema de riego por pivote central con el 100% de trabajo del sistema, con una velocidad de 2,09 m/min. Un tiempo de 4 horas de una vuelta completa, un caudal de 27,34 m³/h y una lámina aplicada de 5,44 mm. datos que sirven para poder ponderar el trabajo de sistema en distintos porcentajes. Teniendo una variación en: la velocidad de desplazamiento, lamina de aplicación, caudal y tiempo de riego. Si se quisiera incrementar el riego con mayor intensidad.

- La superficie de 1,52 hectáreas a regar mediante el pivote central con un volumen de 686,65 m³ de agua disponible en el reservorio, cubriendo solo el 75,82% del área total que abarca el sistema de riego. Como también se calculó el volumen de 1000 m³ para un buen funcionamiento.

8 RECOMENDACIONES

- Se recomienda ampliar el reservorio del pivote central, que contenga un volumen de 1000 m³ de agua. Para cubrir las necesidades de riego del sistema. En cultivos forrajeros.
- Se recomienda instalar una bomba de agua sumergible, que traslade el agua hasta el reservorio, y que se echa a perder el agua del pozo.
- Se recomienda no usar el sistema de riego por pivote central en lluvias y/o granizos.
- Se recomienda leer el manual de funcionamiento del sistema de riego del pivote central para un buen funcionamiento.
- Se recomienda manipular bien las llaves de paso de agua que direccionan el agua hacia el pivote central.
- Se recomienda no dar funcionamiento al sistema cuando haya fuertes vientos, afectaría la uniformidad de riego.

9 BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez, J. R. 1985. Curso de Riego y Drenaje ed. MACA-IICA. Oruro-Bolivia. p 5 - 11.
- Amurrio, F. Principios básicos de la ingeniería de Riego y Drenaje y su Aplicación. UMSS, Facultad de Ciencias Agrícolas, Forestales y Veterinaria. Cochabamba, Bolivia. 2002.
- Barcellos, M. (2006). Avaliação da irrigação por pivô central na cultura do café (*Coffea canephora* L.) e na cultura do mamoeiro (*Carica papaya* L.) no município de Pinheiros – ES. Universidade de São Paulo.
- BOHORQUEZ, F. 2001. Manual de fertilidad de suelos. 8va. reimpression. 26 -35.
- Borquez, E. S. (1999). Programación de Riego. Talca.
- Calvache. (2014). VII Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo. Manejo del agua, Principios fundamentales.
- Cardozo, A. 2000. Valor de los alimentos para la ganadería andina. Boletín del mes de septiembre. La Paz, Bolivia. Serie Técnico IBTA
- Chambi, O. 2005. Comportamiento Agronómico de Variedades Forrajeras Introducidas en Avena, Cebada Y Triticale en la Subcuenca Media del Rio Keka Provincia Omasuyos. Tesis Ing. Agr. La Paz, Bolivia. Universidad Mayor de San Andrés. p 1.
- Cisneros, R. 2010. “Apuntes de la materia de Riego y Drenaje”. San Luis Potosí: Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Cordova, J.A. 1998. Segunda Reunión de Especialistas Nacionales en Avena, Cebada y Triticale del Cono Sur. (2ª 27 – 30 sept., 122 p. Dialogo / IICA. PROCISUR).
- Corpoica, 2007. (Corporación Colombiana de investigación agropecuario). *Hordeum vulgare* L. (Cebada). Universidad Nacional de Colombia. 1p.
- De la cruz, M. (2015). Evaluación del coeficiente de uniformidad y eficiencia de aplicación en el sistema de riego por aspersión Pacuri- Socos - Ayacucho. Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga.
- Diez de Medina, R. 2011. La Ganadería de Leche en el Altiplano Boliviano. Boletín Informativo. La Paz – Bolivia. p 19.
- en la finca Bolivia del Ingenio Santa Ana, Escuintla. Universidad de San Carlos de

- Epifânio, C. (2009). Avaliação do desempenho e manejo de sistemas de irrigação por pivô central. Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri.
- FAO. (2006). Evapotranspiración del Cultivo. Roma
- FAO. (2014). Estudio FAO riego y drenaje. Evapotranspiración del cultivo. Recuperado el 8 de febrero de 2018, de:
- Fernández, R., Oyonarte, N., García, J., Yruela, M., Milla, M., Ávila, R., & Gavilán, P. (2010). Riego por Aspersión. In Secretaría General Técnica Servicio de Publicaciones y Divulgación (Signatura). Sevilla.
- Fong, P. D. (2010). Determinación del coeficiente de uniformidad en los sistemas de <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/009/x0490s/x0490s.pdf>
- Fuentes, J. L., & Garcia, G. (2010). Tecnicas de Riego - Sistemas de riego en la agricultura (MUNDI-PREN). México: Mundi-Prensa México, S.A. de C.V.
- Gabriel, M. L. (2015). Determinación del Momento Óptimo de Riego en Pimiento (*Capsicum annum* L.). Calceta: ESPAM MFL.
- Gil, P. (2009). Manual de riego para paltos y cítricos. V Region -Chile: INIA.
- Gomez, R. F. (2010). Fundamentos de Riego. Sevilla, España: Junta de Andalucía.
- Guatemala.
- INE. (14 de agosto de 2022). Bolivia Ato Ganado Ovino por Departamento, Edad y Sexo. Obtenido de <https://www.ine.gob.bo/index.php/estadisticas-economicas/ganaderia-yavicultura-ganaderia-cuadrosestadisticos/>
- INFOAGRO. 2007. Los fertilizantes (en línea). Consultado 5 de jul. 2007. Disponible en: www.infoagro.com.
- Mamani & Cespedes, F. (2012). Estación Experimental choquenaira. Facultad de Agronomía. La Paz: (D.L.C-FG- 6008), 32P.
- Mamani Q.S. 2017, tesis de maestría evaluación de recursos hídricos y suelo para riego en la Estación Experimental Choquenaira, 77
- Mantilla, J. 1995. Evaluación de 10 variedades de forrajes. Tesis Ing. Agr. La Paz, Bolivia. Universidad Mayor de San Andrés. p 25 – 28.

- Marin, W. 2002. Distanciamiento entre surcos y plantas en dos Ecotipos de Kannawa (*Chenopodium pallidicaule* Aellen) en el altiplano norte. Tesis Lic. Ing. Agr. La Paz, Bolivia Universidad Mayor de San Andrés. p 32-33.
- Mendoza, A. E. (2014). Riego por Goteo. El Salvador: Centa.
- Mendoza, A. E. (2015). Riego por Goteo. El Salvador.
- Minagri. (2015). Manual Para El Cálculo De Eficiencia Para Sistemas De Riego.
- Moreno, G. (2013). Evaluación hidráulica del riego mecanizado tipo pivote central.
- Ortíz, J. N., de Juan, J. A., & Tarjuelo, J. M. (2010). Analysis of water application uniformity from a centre pivot irrigator and its effect on sugar beet (*Beta vulgaris* L.) yield. *Biosystems Engineering*, 105(3), 367–379. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.12.007>
- Ortiz, V. B.; Ortiz, S. C. 1984. Edafología. 4ta ed. México. 374 p.
- Pardos. (2011). Diseño de módulo tipo de riego por goteo para cultivo hortícolas en San Vicente de Loja. Santa Elena.
- Parsons, D., (2005). Manual para educación agropecuaria. Trigo, cebada, avena. Área de producción vegetal 2da. Ed. Editorial Trillas. México. pp. 10 – 14.
- PDLA (Programa de Desarrollo Lechero del Altiplano) 1999. Rendimiento de Variedades de Avena, Cebada y Triticale. Boletín agropecuario para el sector lechero. Boletín 1 p 2 – 3
- Peña, E. (2012). El riego por aspersión Enfoques agronómico, estadístico, hidráulico y económico (primera ed). México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Prieto, G; Alcoser, B; Laura, J; Alzerrera, H. 1991. Evaluación de Forrajes Introducidos en Localidades del Altiplano Norte de Potosí. Informe IBTA, Potosí, Bolivia. p 16 – 18.
- Quispe, N. 1999. Estudio Comparativo de Variedades de Avena (*Avena Sativa*), Cebada (*Hordeum vulgare*) y triticale (*Triticum sativum*) en la localidad de Choquenaira. Tesis. Ing. Agr. La Paz, Bolivia. Universidad Mayor de San Andrés. p. 35 – 40.
- Ramírez, O. D. (2014). Efecto de la Aplicación del Fertirriego con la Incorporación de Biol-Bovino en el Cultivo de Cañahua (*Chenopodium pallidicaule aellen*) en la Estación Experimental Choquenaira. La Paz – Bolivia: pp. 26-27

- riego por pivotes en caña de azúcar (*saccharum officinarum*) y servicios prestados
- Roger, J., 2004. El cultivo de la cebada y el trigo, Ed. Trillas Buenos Aires Argentina,
- Rojas, J. M. (2013). Densidad Aparente. Regional el Chaco: Estación Experimental Agropecuaria Zaéns Peña.
- Santos, L., Arturo, J., Picornell, M. R., & Tarjuelo, J. M. (2010). El riego y sus tecnologías (Editora Eu).
- Senamhi. (2022). Boletín Agrometeorológico: Macro Región Altiplano: Decena del 24 de mayo al 3 de junio. Bolivia: Ministerio de Medio Ambiente y Agua
- Senninger Irrigation | A High-Performance Irrigation Company -
<https://www.senninger.com/es/news/2023/11/1/explorando-sistemas-riego-pivote-central-introduccion-reveladora#:~:text=El%20riego%20por%20pivote%20central%20es%20un%20m%C3%A9todo%20de%20irrigaci%C3%B3n,denominado%20%22punto%20de%20pivote%22.>
- Tarjuelo, J. M. (2005). El riego por aspersión y su tecnología (3ra ed.). México: MundiPrensa. Universidad Autónoma Agraria “Antonio Narro.”
- Valvidia, P. B. (2011). Manejo de Riego en Citricos. Santiago - Chile: INIA.
- Vásquez, A., Vásquez, I., Vásquez, C., & Cañamero, M. (2017). Fundamentos de la Ingeniería de Riego. Lima, Perú.
- Villafáfila, E. (2009). Riego en Horticultura. Santo Pipó - Misiones: INTA.
- Villarroel, N 2001. Evaluación de Tres Especies Forrajeras Anuales (avena, cebada y triticale) en Diferentes Épocas y Densidades de Siembra en la Estación Experimental de Belén, Altiplano Norte, Universidad Mayor de San Andrés, La Paz – Bolivia p 4.

ANEXOS

Anexo 1. Temperatura máxima

TEMPERATURA MÁXIMA (C°)												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2005	17	16,2	18	18,3	17,1	17,5	16,9	17,9	15,9	17,6	17,7	17,9
2006	16,1	17,3	17,3	17	17,8	17	17,1	17,8	18,3	18,9	18,1	18,6
2007	18,1	17,6	16,2	17,3	17,2	18,4	15,7	18,3	16,8	19,1	18,2	17,8
2008	15,8	17,2	16,6	18,2	17,6	17	17,5	18,2	18,8	18,1	19,7	16,8
2009	16,6	16,6	16,4	17,1	17,1	16,1	15,4	17,1	18,9	19,5	19	17,8
2010	16,4	17,1	17,6	18,9	17,4	17,3	16,9	18,5	18,5	18,1	19,7	18,4
2011	17,6	15,1	15,8	17,6	17,2	16,6	15,7	17,7	17,9	18,6	18,8	16,5
2012	15,7	14,8	15,5	15,9	16,6	15,8	16,2	17	18,7	19,2	18,9	16,9
2013	15,5	15,7	18	18,2	17	14,9	15,8	16,6	18,3	18,5	19,2	16,6
2014	15,2	17,1	17,9	17,9	17,7	16,8	16	16,4	17,3	18,1	18,8	18,1
PROMEDIO	16,58	16,54	16,97	17,73	17,46	16,78	16,57	17,51	17,97	18,45	18,69	17,69

Fuente: SENAMHI

Anexo 2 Temperatura mínima

TEMPERATURA MÍNIMA (C°)												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2005	4,4	4,4	2,7	-0,4	-6,2	-9,6	-7,8	-8	-1,8	1,7	2,7	3,7
2006	4,4	3,6	3,9	1,3	-6,3	-7,5	-9,8	-5,1	-3,1	1,2	3,9	4,3
2007	4,3	3,2	3,9	1,3	-3,2	-6,8	-5,9	-4,8	0,2	0,7	1,2	3,6
2008	4,5	3,4	2,3	-1,1	-7	-7,3	-9	-6,9	-3,6	0,5	2,2	4,1
2009	4,2	3,5	2,6	-0,2	-5,1	-11,2	-7,6	-7,7	-2,6	0,1	3,8	4,7
2010	4,9	5,3	3,1	-0,5	-3,4	-5,8	-7,9	-5,9	-2,6	1	0,3	4
2011	4,5	4,8	3,9	-0,3	-4,4	-6,9	-5,9	-4,8	-1,8	0,2	2	3,9
2012	4,2	4	2,9	1,4	-6,2	-7,2	-7,5	-7,7	-3,1	0,6	2,9	4,4
2013	4	4,6	3	-2,1	-2,9	-5,2	-4,9	-5,7	-3,7	0,4	1,7	4,4
2014	4,4	3,5	2,1	0,5	-4,1	-6,9	-7,5	-4	1,1	1,6	1,5	3,4
PROMEDIO	4,33	4,12	3,21	0,31	-4,70	-7,09	-7,19	-5,39	-1,85	0,85	2,01	3,70

Fuente: SENAMHI

Anexo 3. Humedad Relativa por Año

HUMEDAD RELATIVA MEDIA DEL AIRE (%)												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2005	59,6	73,1	62,8	63,1	45,9	43,3	46,6	44,1	56,9	57,9	57,4	57,7
2006	72,4	67,8	67,5	68,6	52,4	53,1	46,5	50,1	50,1	52,2	60,1	59,9
2007	69,2	65,3	74	65,4	55,2	47,3	53,8	48,5	60,1	51,4	57,9	63,7
2008	74,6	68,9	71,3	58,7	49,1	47,1	50,3	51,1	49,3	53	50,2	63
2009	64,4	77,3	77,5	72,6	67,8	39,4	45,4	44,3	49	52	59	62
2010	70,2	72,1	68	59,2	50,6	48	42,2	41,8	47,7	53,1	47,7	60
2011	64,6	73,5	72,1	60,9	52,7	44,8	52,6	45,6	53,5	54,1	56,1	66
2012	68,7	75,1	71,4	67,5	50,1	51,3	47,6	47,1	46,8	51,9	53	62,4
2013	70,7	71,2	64,2	58,1	53,2	53,3	53,3	50,1	50,7	53,5	50,7	64,2
2014	70,5	59,7	58,1	57,8	55,5	48,5	47,2	49,6	54,2	54,3	53	57,1
PROMEDIO	63,79	65,79	64,52	59,99	53,17	49,48	50,34	49,33	52,22	53,11	53,28	58,58

Fuente: SENAMHI

Anexo 4 Velocidad del viento

VELOCIDAD DEL VIENTO m/s												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2005	17,9	19,3	17,6	16,6	17,1	18	19,5	17,3	19,3	18,2	17,5	17,4
2006	17,2	17,1	17	17	16,1	17,4	16,4	17,6	16,6	17,4	17,1	18,1
2007	16,3	18,1	16,7	16,9	17,9	16	17,3	16,7	17	16,6	16,8	17,8
2008	17,1	17,4	15,1	14,6	15,8	16,4	15,4	14,2	14,3	15,1	14,6	15,7
2009	15,1	15,1	14,4	13,6	12,7	12,8	16,4	13,5	13,5	14,3	13,1	13,6
2010	15,1	14,6	12,7	12,2	16,3	17,2	18,3	16	15,3	16,6	13,6	15,1
2011	16	17,7	16,9	15,5	16,3	18	19,4	18,8	16,7	17,1	8,6	18,1
2012	17,8	17	15,6	16,4	16,4	17	15,8	15,8	15,8	13,8	15	16,2
2013	16	15,7	14,8	15	15,7	16,6	17,2	16	15,5	15,6	14,8	15,6
2014	15,9	15,1	15	14,5	15,6	15,7	15,2	15,1	14,9	14,9	15	14,2
PROMEDIO	17,33	17,41	16,39	15,53	16,14	16,63	17,25	16,46	16,53	16,41	15,80	16,93

Fuente: SENAMHI

Anexo 5 Uniformidad de Riego en base a la ecuación (2) Herermann Hein

N	L2 (ml)	L1 (ml)	PROMEDIO	Si (m)	Li(mm)	Si * Li	$Li - (\sum(Si * Li) / \sum Si)$	$ Li - (\sum(Si * Li) / \sum Si) $	$Si * Li - (\sum(Si * Li) / \sum Si) $
1	30	15	22,5	2,22	5,12	11,36	-34,47	34,47	76,53
2	120	40,5	80,25	4,72	18,25	86,12	-21,34	21,34	100,73
3	288	177	232,5	6,94	52,86	366,86	13,28	13,28	92,13
4	162	351	256,5	9,16	58,32	534,20	18,73	18,73	171,58
5	210	170	190	11,38	43,20	491,61	3,61	3,61	41,11
6	260	168	214	13,6	48,66	661,72	9,07	9,07	123,34
7	208	285	246,5	15,82	56,05	886,64	16,46	16,46	260,37
8	228	238	233	18,04	52,98	955,68	13,39	13,39	241,54
9	262	260	261	20,26	59,34	1202,27	19,76	19,76	400,24
10	248	270	259	22,48	58,89	1323,79	19,30	19,30	433,87
11	275	179	227	24,7	51,61	1274,81	12,02	12,02	297,01
12	162	148	155	26,92	35,24	948,70	-4,35	4,35	116,98
13	115	85	100	29,14	22,74	662,54	-16,85	16,85	491,03
14	82	90	86	31,36	19,55	613,19	-20,03	20,03	628,26
15	135	186	160,5	33,58	36,49	1225,40	-3,10	3,10	103,93
16	170	160	165	35,8	37,52	1343,04	-2,07	2,07	74,17
17	119	135	127	38,02	28,88	1097,84	-10,71	10,71	407,26
18	180	142	161	40,24	36,61	1473,01	-2,98	2,98	119,97
19	118	147	132,5	42,46	30,13	1279,14	-9,46	9,46	401,72
20	180	132	156	44,68	35,47	1584,75	-4,12	4,12	184,00
21	130	194	162	46,9	36,83	1727,47	-2,75	2,75	129,16
22	153	192	172,5	49,12	39,22	1926,50	-0,37	0,37	18,01
23	75	78	76,5	51,34	17,39	892,98	-22,19	22,19	1139,42
24	192	165	178,5	53,56	40,58	2173,71	1,00	1,00	53,43
25	168	152	160	55,78	36,38	2029,18	-3,21	3,21	178,98
26	208	210	209	58	47,52	2756,11	7,93	7,93	460,06
27	115	120	117,5	60,22	26,72	1608,80	-12,87	12,87	775,13
28	142	174	158	62,44	35,92	2243,07	-3,66	3,66	228,75
29	182	212	197	64,66	44,79	2896,17	5,20	5,20	336,47
30	145	141	143	66,88	32,51	2174,47	-7,07	7,07	473,10
31	169	190	179,5	69,1	40,81	2820,10	1,22	1,22	84,64
32	210	168	189	71,32	42,97	3064,75	3,38	3,38	241,41
33	179	194	186,5	73,54	42,40	3118,35	2,82	2,82	207,12
34	174	209	191,5	75,76	43,54	3298,61	3,95	3,95	299,50
35	238	211	224,5	77,98	51,04	3980,35	11,46	11,46	893,36
36	241	218	229,5	80,2	52,18	4184,84	12,59	12,59	1009,97
totales				1488,32		58918,11			11294,28

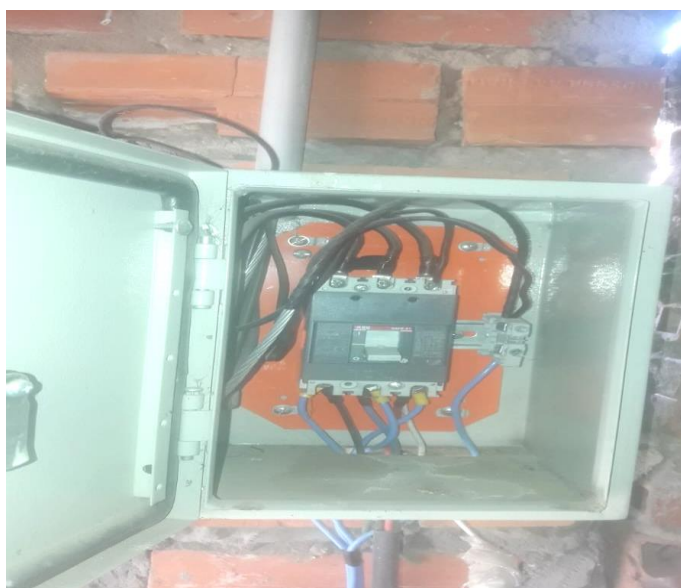
fuentes: Elaboración Propia

Anexo 6. Caja de control del Sistema de Riego por Pivote Central



Fuente: Reporte Fotográfico 2022

Anexo 7. Caseta - Paso de Energia



Fuente: Reporte Fotográfico 2022

Anexo 8. Aforo del Pozo que alimenta el Reservorio



Fuente: Reporte Fotográfico (2022)

Anexo 9. Medición del Caudal de Cada Aspersor



Fuente: Reporte Fotográfico (2022)

Anexo 10. Determinación de la Pluviometría del Sistema de Riego



Fuente: Reporte Fotográfico (2022)

Anexo 11. Medición de la Infiltración por los Cilindros infiltrómetros



Fuente: Reporte Fotográfico (2022)

Anexo 12. Tipo de Boquilla en Sprint de uno de los emisores del Pivote Central



Fuente: Reporte Fotográfico (2022)

Anexo 13. Toma de muestra de suelo con el barreno de muestreo a una Prof. de 50 cm



Fuente: Reporte Fotográfico (2022)

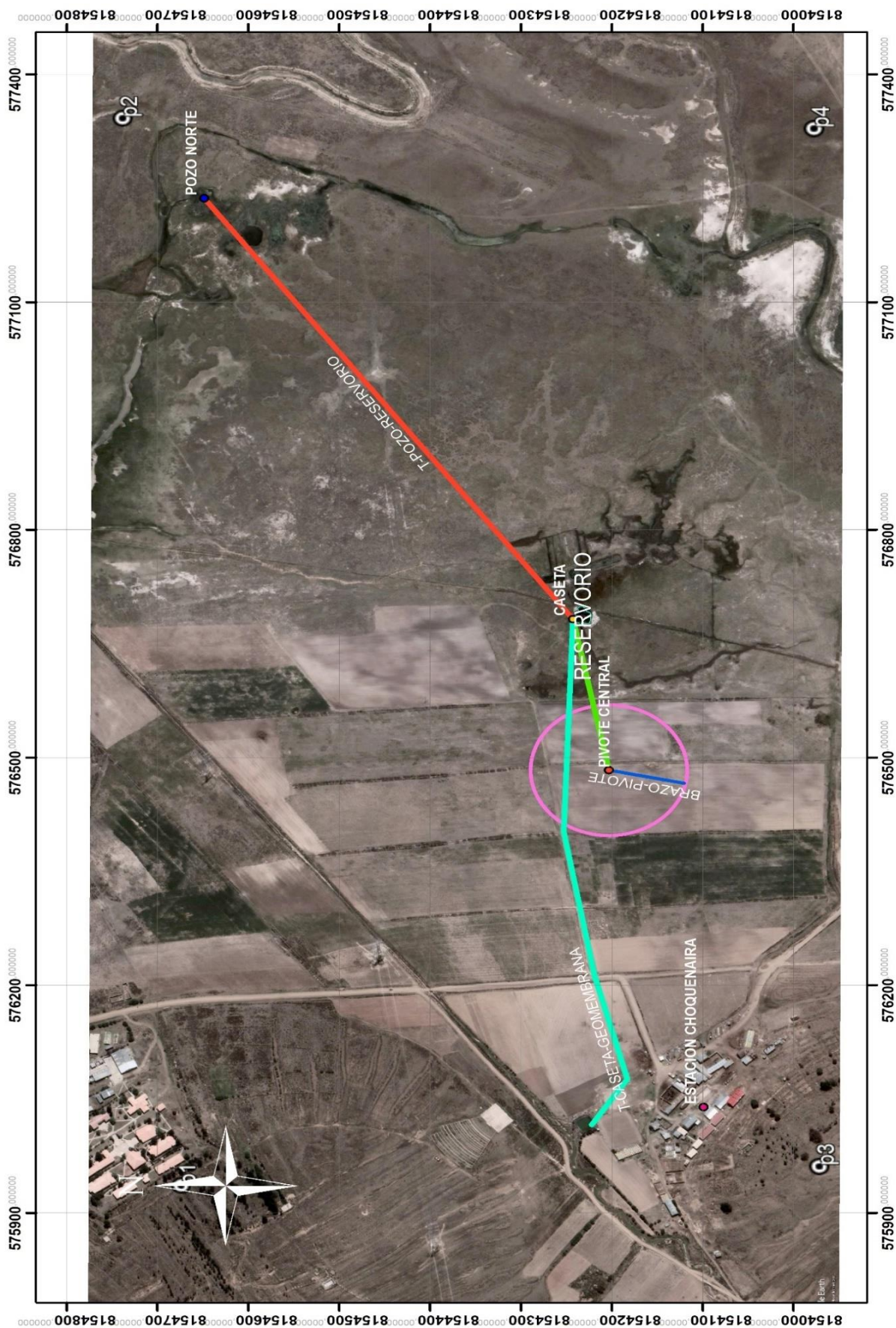
Anexo 14 Identificación de cada Aspersor del Sistema de Riego

N.	COLOR DE BOQUILLA	CODIGO	TAMAÑO DE BOQUILLA (mm)	DESCARGA Lt/sg
1	Azul claro	04	1,59	0,050
2	Azul claro	04,5	1,78	0,063
3	Oro	06,0	2,38	0,113
4	Oro	06,5	2,59	0,133
5	Lima	07,0	2,78	0,154
6	Lima	07,5	2,97	0,177
7	Lavanda	08,0	3,18	0,202
8	Lavanda	08,0	3,18	0,202
9	Lavanda	08,5	3,38	0,228
10	Gris	09,0	3,57	0,256
11	Gris	09,5	3,76	0,285
12	Gris	09,5	3,76	0,285
13	Turquesa	10,0	3,97	0,316
14	Turquesa	10,5	4,17	0,349
15	Turquesa	10,5	4,17	0,349
16	Amarillo	11,0	4,37	0,384
17	Amarillo	11,5	4,57	0,419
18	Rojo	12,0	4,76	0,457
19	Rojo	12,5	4,95	0,496
20	Blanco	13,0	5,16	0,537
21	Blanco	13,5	5,36	0,579
22	Azul	14,0	5,56	0,623
23	Azul	14,5	5,77	0,669
24	Naranja	16,5	6,55	0,868
25	Verde Oscuro	17,0	6,75	0,921
26	Purpura	18,5	7,34	1,090
27	Verde Oscuro	17,0	6,75	0,921
28	Turquesa Oscuro	20,0	7,94	1,273

Fuente: Elaboración Propia

SISTEMA DE RIEGO POR PIVOTE CENTRAL

La estación experimental de choquenaira, dependiente de la UMSA, está ubicada en la comunidad de Choquenaira, a 8 km de la población de Viacha, Provincia Ingavi y a 38 km de la ciudad de La Paz. situada a una altitud de 3870 m.s.n.m., geográficamente se halla a 16°41'39,25" latitud Sur y a 65°17'14,31" longitud Oeste.



UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE AGRONOMÍA
CARRERA DE INGENIERÍA AGRONÓMICA
LABORATORIO DE LA FACULTAD DE AGRONOMÍA
EN SUELOS Y AGUAS (LAFASA)

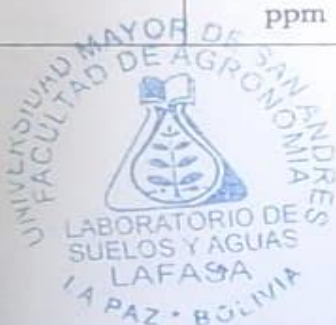


RES: FAC.AGRO.LAB. N°239

ANÁLISIS FÍSICO QUÍMICO DE SUELOS

INTERESADO: Veimar Crespo Tiñini tambo
SOLICITUD: LAF 239_21
FECHA DE ENTREGA: 05/10/21
PROCEDENCIA: Departamento La Paz
 Municipio Viacha
 Provincia Ingavi
 Comunidad Choquenaira
 Estación Experimental de Choquenaira
 Código 01-PIVOT-CHOQUENAIRA PENDIENTE 0%

PARAMETRO		UNIDAD	RESULTADO	MÉTODO
TEXTURA	Arena	%	32	Bouyoucos
	Limo	%	38	
	Arcilla	%	30	
	Clase Textural	-	Franco Arcilloso	
Densidad Real		g/cm ³	2.283	Picnómetro
Densidad Aparente		g/cm ³	1.287	Probeta
Humedad CC		%	32	Ollas a presión de Richards
Humedad volumétrica		%	5.148	Volumétrico
Humedad gravimétrica		%	4.00	Gravimétrico
pH en H ₂ O relación 1:5		-	8.73	Potenciometria
Conductividad eléctrica en agua 1:5		mmho/cm	0.66	Potenciometria
Potasio intercambiable		meq/100g S.	3.51	Acetato de amonio 1N (Espectrofotómetro de emisión atómica)
Capacidad de Intercambio Catiónico		meq/100g S.	36.62	Acetato de amonio 1N (Espectrofotómetro de emisión y absorción atómica) Volumetria
Nitrógeno total		%	0.28	Kjendahl
Materia orgánica		%	3.91	Walkley y Black
Fósforo disponible		ppm	2.61	Espectrofotometria UV-Visible



Roberto Miranda Casas
 Ph.D. Roberto Miranda Casas
LABORATORIO DE SUELOS