

**UNIVERSIDAD PÚBLICA DE EL ALTO
ÁREA DE CIENCIAS AGRÍCOLAS, PECUARIAS
Y RECURSOS NATURALES
CARRERA DE INGENIERÍA AGRONÓMICA**



TESIS DE GRADO

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE UN SISTEMA DE PRODUCCIÓN
ASOCIADA BAJO ESTRÉS HÍDRICO EN LA COMUNIDAD
CARCANAVI MUNICIPIO DE ACHOCALLA**

Por:

Zulma Eva Quispe Guarachi

EL ALTO – BOLIVIA

Octubre, 2025

**UNIVERSIDAD PÚBLICA DE EL ALTO
ÁREA DE CIENCIAS AGRÍCOLAS, PECUARIAS
Y RECURSOS NATURALES
CARRERA DE INGENIERÍA AGRONÓMICA**

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE UN SISTEMA DE PRODUCCIÓN ASOCIADA BAJO
ESTRÉS HÍDRICO EN LA COMUNIDAD CARCANAVI MUNICIPIO DE ACHOCALLA**

*Tesis de Grado presentado
como requisito para optar el Título de
Ingeniera Agrónoma*

Zulma Eva Quispe Guarachi

Asesores:

M. Sc. Lic. Ing. Ramiro Raúl Ochoa Torrez

Lic. Ing. Mario Nicolas Enriquez Ralde

Lic. Ing. Anel Adriana Claire Herrera

Tribunal Revisor:

Lic. Ing. Guiber Guarachi Condori

M. Sc. Lic. Ing. Pastor Condori Mamani

M. Sc. Lic. Ing. Lic. Simar Fernando Catari Condori

Aprobada

Presidente Tribunal Examinador

DEDICATORIA:

A Dios, por darme la fortaleza y la oportunidad de recorrer este camino.

A mis docentes y mentores, quienes con su conocimiento y paciencia han iluminado mi camino académico y profesional.

A mis padres y hermanos quienes me dieron su apoyo y compañía.

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, agradezco a Dios por ser mi guía y protector, por su infinita misericordia y por darme la fortaleza necesaria para alcanzar un logro más en mi vida.

A la Universidad Pública de El Alto y a la Carrera de Ingeniería Agronómica, por brindarme la oportunidad de formarme profesionalmente y desarrollar mis capacidades en el ámbito agrícola.

A los docentes de la carrera, quienes con dedicación compartieron sus conocimientos científicos, contribuyendo de manera significativa a mi formación académica y personal.

Expreso mi más profundo agradecimiento a mis asesores de tesis, M. Sc. Lic. Ing. Ramiro Raúl Ochoa Torrez, Lic. Ing. Mario Nicolás Enríquez Ralde, en su calidad de Director de la Fundación PRODIASUR, y Lic. Ing. Anel Adriana Claire Herrera, por su valiosa orientación, paciencia, tiempo y experiencia, los cuales fueron fundamentales para la estructuración y desarrollo de esta investigación. Asimismo, extendiendo mi especial gratitud a la Fundación PRODIASUR por el respaldo institucional brindado, así como por el compromiso, la visión y el apoyo permanente que hicieron posible la correcta ejecución de este trabajo en campo.

Del mismo modo, agradezco al honorable tribunal revisor M. Sc. Lic. Ing. Simar Fernando Catari Condori, M. Sc. Lic. Ing. Pastor Condori Mamani, y Lic. Ing. Guiber Guarachi Condori, por sus observaciones, correcciones y sugerencias que enriquecieron este trabajo y permitieron mejorar su contenido académico y científico.

A mi familia, por su apoyo constante y confianza en cada paso que he dado. Gracias por ser mi pilar fundamental y por acompañarme en los momentos más difíciles de este camino.

A mis compañeros de estudio, por compartir este camino lleno de retos y aprendizajes. Su amistad y colaboración han hecho que esta experiencia sea aún más enriquecedora.

Finalmente, a todas las personas que, de una u otra manera, contribuyeron a la realización de este proyecto. Su apoyo ha sido invaluable y por ello estaré eternamente agradecida.

CONTENIDO

ÍNDICE DE TEMAS.....	i
ÍNDICE DE CUADROS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
ÍNDICE DE ANEXOS	x
ABREVIATURAS	xi
RESUMEN	xii
ABSTRACT	xiii

ÍNDICE DE TEMAS

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Planteamiento del problema	1
1.2. Justificación	2
1.3. Objetivos.....	3
1.3.1. Objetivo general	3
1.3.2. Objetivos específicos	3
1.4. Hipótesis.....	3
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1. Cultivos biointensivos	4
2.2. Principios del método de cultivo biointensivo	4
2.2.1. La doble excavación	4
2.2.2. Uso de composta y otros abonos	5
2.2.2.1. La composta.....	6
2.2.2.2. Estiércol	6
2.2.3. La siembra cercana.....	6
2.2.4. Asociación de cultivos y rotación de cultivos	7

2.2.5.	Cultivos eficientes en carbono.....	7
2.2.6.	Cultivos eficientes en calorías	7
2.3.	Ventajas del sistema de producción biointensivo	8
2.4.	Humedad en cultivos biointensivos	8
2.5.	Movimiento de agua en el suelo.....	8
2.6.	Necesidades hídricas.....	9
2.7.	Importancia del agua en la agricultura	9
2.8.	Estrés hídrico	10
2.9.	Descripción de los cultivos evaluados	10
2.10.	Cebolla (<i>Allium cepa</i>)	11
2.10.1.	Taxonomía de Cebolla (<i>Allium cepa</i>).....	11
2.10.2.	Características del cultivo de cebolla	11
2.10.3.	Fenología del cultivo de cebolla	11
2.11.	Haba (<i>Vicia faba</i>)	12
2.11.1.	Taxonomía de Haba (<i>Vicia faba</i>).....	12
2.11.2.	Características del cultivo de haba.....	12
2.11.3.	Fenología del cultivo de haba.....	13
2.12.	Papa (<i>Solanum tuberosum</i>)	14
2.12.1.	Taxonomía de papa (<i>Solanum tuberosum</i>)	14
2.12.2.	Características del cultivo de papa.....	14
2.12.3.	Fenología del cultivo de papa.....	14
2.13.	Centeno (<i>Secale cereale</i>)	15
2.13.1.	Taxonomía de centeno (<i>Secale cereale</i>)	15
2.13.2.	Características del cultivo de centeno	16
2.13.3.	Fenología del cultivo de centeno.....	16
2.14.	Plagas y enfermedades de los cultivos	17

3. MATERIALES Y MÉTODOS	18
3.1. Localización	18
3.1.1. Ubicación Geográfica	18
3.1.2. Características Ecológicas	18
3.1.2.1. Clima	18
3.1.2.2. Vegetación	19
3.1.2.3. Suelo	19
3.2. Materiales	19
3.2.1. Material de estudio	19
3.2.2. Material de escritorio	19
3.2.3. Material de campo	19
3.3. Metodología	20
3.3.1. Desarrollo del ensayo	20
3.3.1.1. Muestreo de suelo	20
3.3.1.2. Delimitación de la parcela experimental	21
3.3.1.3. Preparación de las camas biointensivas	21
3.3.1.4. Siembra	22
3.3.1.5. Riego y desmalezado	22
3.3.1.6. Control de la humedad durante las lluvias	23
3.3.1.7. Cosecha	24
3.3.2. Diseño experimental	25
3.3.3. Factor de estudio	25
3.3.3.1. Cultivos evaluados	26
3.3.3.2. Croquis Experimental	26
3.3.4. Variables de respuesta	27
3.3.4.1. Variables de respuesta agronómica de cebolla (<i>Allium cepa</i>)	27

3.3.4.1.1.	Porcentaje de prendimiento de cebolla (%)	27
3.3.4.1.2.	Altura de la planta de cebolla (cm).....	27
3.3.4.1.3.	Diámetro de bulbo de cebolla (cm)	27
3.3.4.1.4.	Peso de planta de cebolla (g)	27
3.3.4.2.	Variables de respuesta agronómica de haba (<i>Vicia faba</i>).....	27
3.3.4.2.1.	Porcentaje de germinación de haba (%).....	27
3.3.4.2.2.	Altura de la planta de haba (cm)	27
3.3.4.2.3.	Longitud de vainas por planta de haba (cm)	27
3.3.4.2.4.	Peso de vainas por plantas de haba (cm).....	28
3.3.4.3.	Variables de respuesta agronómica de papa (<i>Solanum tuberosum</i>).....	28
3.3.4.3.1.	Porcentaje de germinación de papa (%)	28
3.3.4.3.2.	Altura de la planta de papa (cm)	28
3.3.4.3.3.	Diámetro del tubérculo de papa (cm)	28
3.3.4.3.4.	Peso del tubérculo por planta de papa (g)	28
3.3.4.4.	Variables de respuesta agronómica de centeno (<i>Secale cereale</i>)	28
3.3.4.4.1.	Porcentaje de germinación de centeno (%)	28
3.3.4.4.2.	Altura de la planta de centeno (cm)	28
3.3.4.4.3.	Numero de granos por espiga de centeno	29
3.3.4.4.4.	Peso de granos por espiga de centeno (g)	29
3.3.4.5.	Rendimiento de cebolla, haba, papa y centeno	29
3.3.4.6.	Variables de presencia de plagas y enfermedades	29
3.3.4.7.	Análisis estadístico	29
3.3.4.7.1.	Análisis económico	29
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	31
4.1.	Precipitación (PP)	31
4.2.	Variables de respuesta agronómica de cebolla (<i>Allium cepa</i>)	32

4.2.1.	Porcentaje de prendimiento de cebolla (%)	32
4.2.2.	Altura de planta de cebolla bajo tres frecuencias de riego	33
4.2.3.	Altura de la planta de cebolla (cm)	33
4.2.4.	Diámetro de bulbo de cebolla (cm)	35
4.2.5.	Peso de planta de cebolla (g)	37
4.2.6.	Rendimiento de cebolla (t/ha)	39
4.2.7.	Regresión lineal del rendimiento de cebolla (t/ha) en función de la frecuencia de riego en el sistema biointensivo asociado.	41
4.3.	Variables de respuesta agronómica de haba (<i>Vicia faba</i>)	42
4.3.1.	Porcentaje de germinación de haba (%)	42
4.3.2.	Crecimiento en altura de planta de haba a lo largo del ciclo del cultivo	42
4.3.3.	Altura de la planta de haba (cm)	43
4.3.4.	Longitud de vainas por planta de haba (cm)	45
4.3.5.	Peso de vainas verde por planta de haba (g)	46
4.3.6.	Rendimiento en vaina verde de haba (t/ha)	48
4.3.7.	Regresión lineal del rendimiento de haba (t/ha) en función de la frecuencia de riego en el sistema biointensivo asociado	50
4.4.	Variables de respuesta agronómica de papa (<i>Solanum tuberosum</i>)	51
4.4.1.	Porcentaje de germinación de papa (%)	51
4.4.2.	Crecimiento en altura de planta de papa a lo largo del ciclo del cultivo	51
4.4.3.	Altura de la planta de papa (cm)	52
4.4.4.	Diámetro de tubérculo de papa (cm)	53
4.4.5.	Peso de tubérculo por planta de papa (g)	55
4.4.6.	Rendimiento de papa (t/ha)	57
4.4.7.	Regresión lineal del rendimiento de papa (t/ha) en función de la frecuencia de riego en el sistema biointensivo asociado	59
4.5.	Variables de respuesta agronómica de centeno (<i>Secale cereale</i>)	61
4.5.1.	Porcentaje de germinación de centeno (%)	61

4.5.2.	Crecimiento en altura de planta de centeno a lo largo del ciclo del cultivo	61
4.5.3.	Altura de la planta de centeno (cm).....	62
4.5.4.	Numero de granos por espiga de centeno.....	64
4.5.5.	Peso de granos por espiga de centeno (g).....	66
4.5.6.	Rendimiento de centeno (t/ha)	67
4.5.7.	Regresión lineal del rendimiento de centeno (t/ha) en función de la frecuencia de riego en el sistema biointensivo asociado.....	69
4.6.	Variable de presencia de plagas y enfermedades.....	71
4.6.1.	Incidencia de plagas en los cultivos bajo diferentes frecuencias de riego..	71
4.6.2.	Presencia y manejo de plagas y enfermedades	72
4.7.	Análisis económico	72
4.7.1.	Ingresos bruto	74
4.7.2.	Ingresos netos.....	75
4.7.3.	Relación Beneficio/Costo	76
5.	CONCLUSIONES.....	78
6.	RECOMENDACIONES.....	80
7.	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	81
8.	ANEXOS	85

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1.	Análisis de varianza de altura de planta de cebolla (cm)	34
Cuadro 2.	Análisis de varianza para diámetro de bulbo de cebolla (cm)	35
Cuadro 3.	Análisis de varianza del peso de planta de cebolla (g)	37
Cuadro 4.	Análisis de varianza del rendimiento de cebolla (t/ha)	39
Cuadro 5.	Análisis de varianza de altura de planta de haba (cm)	43
Cuadro 6.	Análisis de varianza para longitud de vainas por planta de haba (cm)	45
Cuadro 7.	Peso de vainas verde por planta (g)	46
Cuadro 8.	Rendimiento en vaina verde de haba (t/ha)	48
Cuadro 9.	Análisis de varianza de altura de planta de papa (cm)	52
Cuadro 10.	Análisis de varianza de diámetro de tubérculo de papa (cm)	54
Cuadro 11.	Análisis de varianza del peso de tubérculo por planta de papa (g)	55
Cuadro 12.	Rendimiento de papa (t/ha)	57
Cuadro 13.	Análisis de varianza de altura de planta de centeno (cm)	62
Cuadro 14.	Análisis de varianza de numero de granos por espiga de centeno	64
Cuadro 15.	Análisis de varianza de peso de granos por espiga de centeno (g)	66
Cuadro 16.	Rendimiento de centeno (t/ha)	68
Cuadro 17.	Calculo del rendimiento ajustado	73
Cuadro 18.	Ingreso bruto por tratamiento de cada cultivo (Bs/m ²)	74
Cuadro 19.	Ingreso neto por tratamiento de cada cultivo (Bs/m ²)	75
Cuadro 20.	Relación Beneficio/Costo por tratamiento	76

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Fenología del cultivo de cebolla, ajo (SENAMHI, 2017)	12
Figura 2.	Fenología del cultivo de haba (SENAMHI, 2017)	13
Figura 3.	Fenología del cultivo de papa (SENAMHI, 2017)	15
Figura 4.	Fenología del cultivo de trigo, centeno (SENAMHI, 2017).....	16
Figura 5.	Ubicación geográfica (Google Earth, 2024).....	18
Figura 6.	Obtención de muestra de suelos.....	20
Figura 7.	Delimitación de la parcela experimental	21
Figura 8.	Preparación de las camas biointensivas	22
Figura 9.	Siembra de los cultivos	22
Figura 10.	Control de la humedad durante las lluvias.....	24
Figura 11.	Cosecha de los cultivos.....	24
Figura 12.	Croquis experimental del experimento	26
Figura 13.	Precipitación de lluvia en la gestión 2024-2025.....	31
Figura 14.	Altura de planta cebolla (<i>Allium cepa</i>) bajo tres frecuencias de riego	33
Figura 15.	Prueba de Duncan altura de planta de cebolla (cm).....	34
Figura 16.	Prueba de Duncan diámetro de bulbo de cebolla (cm)	36
Figura 17.	Prueba de Duncan de peso de planta de cebolla (g).....	38
Figura 18.	Prueba de Duncan de rendimiento de cebolla (t/ha).....	40
Figura 19.	Regresión entre frecuencia de riego y rendimiento (t/ha) en cebolla	41
Figura 20.	Altura de planta de haba (<i>Vicia faba</i>) bajo tres frecuencias de riego	42
Figura 21.	Prueba de Duncan de altura de planta de haba (cm)	44
Figura 22.	Prueba de Duncan longitud de vainas por planta de haba (cm)	45
Figura 23.	Prueba de Duncan de peso de vainas verdes por planta de haba (g)	47
Figura 24.	Rendimiento en vaina verde de haba (t/ha).....	49
Figura 25.	Regresión entre frecuencia de riego y rendimiento (t/ha) en haba	50

Figura 26.	Altura de planta de papa (<i>Solanum tuberosum</i>) bajo tres frecuencias de riego	51
Figura 27.	Prueba de Duncan de altura de la planta de papa (cm).....	53
Figura 28.	Prueba de Duncan diámetro de tubérculo de papa (cm)	54
Figura 29.	Prueba de Duncan de peso de tubérculo por planta de papa (g).....	56
Figura 30.	Rendimiento de papa (t/ha)	58
Figura 31.	Regresión entre frecuencia de riego y rendimiento (t/ha) en papa	60
Figura 32.	Altura de planta de centeno (<i>Secale cereale</i>) bajo tres frecuencias de riego	61
Figura 33.	Prueba de Duncan de altura de la planta de centeno (cm)	63
Figura 34.	Prueba de Duncan de numero de granos por espiga de centeno	65
Figura 35.	Prueba de Duncan de peso de granos por espiga de centeno (g)	67
Figura 36.	Rendimiento de centeno (t/ha)	68
Figura 37.	Regresión entre frecuencia de riego y rendimiento (t/ha) en centeno	70
Figura 38.	Presencia de plagas y enfermedades	71

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1.	Análisis físico y químico del suelo antes de la implementación de camas biointensivas	86
Anexo 2.	Análisis físico y químico del suelo durante la implementación de camas biointensivas	87
Anexo 3.	Costo de producción	88
Anexo 4.	Promedio de las variables de respuesta de cada cultivo	88
Anexo 5.	siembra de las 3 camas biointensivas.	90
Anexo 6.	Germinado de los cultivos en camas biointensivas.	90
Anexo 7.	Control de humedad en camas biointensivas durante las lluvias.	90
Anexo 8.	Desmalezado de las camas biointensivas.	91
Anexo 9.	Riego manual a los cultivos de las camas biointensivas.....	91
Anexo 10.	Toma de datos del cultivo de haba (<i>Vicia faba</i>).	91
Anexo 11.	Toma de datos del cultivo de cebolla (<i>Allium cepa</i>).	92
Anexo 12.	Toma de datos del cultivo de papa (<i>Solanum tuberosum</i>).	92
Anexo 13.	Toma de datos del cultivo de centeno (<i>Secale cereale</i>).	92

ABREVIATURAS

cm	Centímetro
FAO	Organización para la Agricultura y la Alimentación
g	Gramos
ha	Hectárea
km	Kilometro
kg	Kilogramos
msnm	Metros sobre el nivel del mar
m	Metros
ml	Mililitro
pH	potencial de hidrógeno
t	Tonelada

RESUMEN

La presente investigación se desarrolló en la comunidad de Carcanavi, municipio de Achocalla, en respuesta a los impactos negativos del modelo de agricultura convencional basado en monocultivos, uso intensivo de fertilizantes químicos y ausencia de rotación de cultivos, lo cual ha provocado degradación del suelo y baja resiliencia ante el cambio climático. Frente a ello, se evaluó el sistema de producción biointensivo asociado como alternativa sostenible en condiciones de estrés hídrico. El estudio siguió un enfoque cuantitativo con un diseño experimental completamente al azar, evaluando tres tratamientos de riego: cada 5, 10 y 15 días, con tres repeticiones por tratamiento. La población experimental estuvo conformada por cultivos de cebolla (*Allium cepa*), haba (*Vicia faba*), papa (*Solanum tuberosum*) y centeno (*Secale cereale*), con un muestreo probabilístico de seis plantas por tratamiento. Se evaluaron variables agronómicas como altura de planta, diámetro de bulbo y tubérculo, peso tubérculo de vaina por planta, rendimiento por hectárea, longitud de vaina, número, peso de grano por espiga y presencia de plagas y enfermedades. La sistematización y análisis de datos se realizó mediante el software infoStat, utilizando la prueba de medias de Duncan, y los resultados se representaron en tablas ANOVA, cuadros de medias, histogramas y figuras comparativas. Los cultivos mostraron respuestas diferenciadas según la frecuencia de riego: la cebolla alcanzó un mejor desarrollo con riego cada 5 días, logrando un mayor diámetro de bulbo (5,8 cm) y rendimiento (15 t/ha), mientras que el riego cada 15 días afectó negativamente todas las variables. El haba también respondió positivamente al riego frecuente (5 días), alcanzando una mayor altura (144,5 cm), longitud y peso de vaina, así como un rendimiento de 16,3 t/ha. Por su parte, la papa obtuvo su mejor rendimiento con riego cada 10 días, evitando los efectos negativos del exceso de humedad y del déficit hídrico; el riego cada 15 días causó tubérculos deformados, menor altura y bajo rendimiento. El centeno mostró mayor tolerancia al estrés hídrico, destacando su rendimiento con riego cada 10 días, aunque el riego cada 5 días incrementó levemente su altura y peso de grano. En sanidad vegetal, el riego frecuente aumentó la incidencia de enfermedades fúngicas, mientras que el riego más espaciado favoreció plagas como minadores. El tratamiento intermedio (10 días) presentó el mejor equilibrio entre producción y sanidad. El sistema biointensivo asociado mostró ser una alternativa resiliente y eficiente, donde el riego cada 10 días representó un punto de equilibrio en rendimiento, uso del agua y control de plagas, reafirmando su potencial para mejorar la seguridad alimentaria en zonas altoandinas.

ABSTRACT

This research was developed in the community of Carcanavi, Achocalla municipality, in response to the negative impacts of the conventional agricultural model based on monocultures, intensive use of chemical fertilizers and lack of crop rotation, which has caused soil degradation and low resilience to climate change. In response, the associated biointensive production system was evaluated as a sustainable alternative under conditions of water stress. The study followed a quantitative approach with a completely randomized experimental design, evaluating three irrigation treatments: every 5, 10 and 15 days, with three replicates per treatment. The experimental population consisted of onion (*Allium cepa*), broad bean (*Vicia faba*), potato (*Solanum tuberosum*) and rye (*Secale cereale*) crops, with a probabilistic sampling of six plants per treatment. Agronomic variables such as plant height, bulb and tuber diameter, tuber pod weight per plant, and yield per hectare were evaluated, pod length, number, weight of grain per ear and presence of pests and diseases. Data systematization and analysis was carried out with infoStat software, using Duncan's test for means, and the results were represented in ANOVA tables, mean tables, histograms and comparative figures. The crops showed differentiated responses according to irrigation frequency: onion achieved better development with irrigation every 5 days, achieving a greater bulb diameter (5.8 cm) and yield (15 t/ha), while irrigation every 15 days negatively affected all variables. Broad bean also responded positively to frequent irrigation (5 days), achieving a greater height (144.5 cm), pod length and weight, as well as a yield of 16.3 t/ha. Potato obtained its best yield with irrigation every 10 days, avoiding the negative effects of excess moisture and water deficit; irrigation every 15 days caused deformed tubers, reduced height and low yield. Rye showed greater tolerance to water stress, with an outstanding yield with irrigation every 10 days, although irrigation every 5 days slightly increased its height and grain weight. In plant health, frequent irrigation increased the incidence of fungal diseases, while more frequent irrigation favored pests such as leafminers. The intermediate treatment (10 days) showed the best balance between production and plant health. The associated biointensive system proved to be a resilient and efficient alternative, where irrigation every 10 days represented a point of equilibrium in yield, water use and pest control, reaffirming its potential to improve food security in high Andean areas.

1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático es una realidad que afecta a todos los países del mundo, y Bolivia no es la excepción. Actualmente, el país experimenta impactos crecientes como la inseguridad alimentaria, la escasez de agua y desastres naturales cada vez más intensos y frecuentes, como sequías prolongadas e inundaciones.

Uno de los factores que contribuyen a la vulnerabilidad del sistema agrícola actual es la degradación progresiva de los suelos productivos. La expansión de la frontera agrícola, impulsada por prácticas de labranza intensiva, ha permitido aumentar las áreas de cultivo, pero a costa del deterioro de la capa arable del suelo, acelerando los procesos de erosión y reduciendo la productividad agrícola a largo plazo (Gómez, 2018).

La agricultura biointensiva surge como una alternativa sostenible frente a la labranza intensiva, la cual busca aumentar la producción mediante un laboreo frecuente y el uso de fertilizantes químicos, pero que a largo plazo puede degradar la estructura y fertilidad del suelo, incrementar la erosión y disminuir la capacidad productiva (CoCampo, 2020). En contraste, la agricultura biointensiva, basada en principios agroecológicos, promueve un manejo sostenible del suelo, incorporando materia orgánica, optimizando el uso del agua y conservando los nutrientes, lo que permite mantener e incrementar los rendimientos agrícolas sin comprometer la fertilidad del suelo (Simón, 2020).

En este contexto, resulta fundamental validar y difundir conocimientos sobre innovaciones tecnológicas biointensivas que sean climáticamente resilientes y adaptables a los sistemas productivos tradicionales. Estas innovaciones deben fortalecer la capacidad de adaptación al cambio climático, incrementar la productividad, contribuir a la seguridad alimentaria y nutricional, y mejorar los ingresos de las familias dedicadas a la agricultura.

1.1. Planteamiento del problema

La agricultura en el municipio de Achocalla enfrenta una serie de desafíos que amenazan su sostenibilidad a largo plazo. Entre los principales problemas se encuentran la degradación progresiva del suelo, la escasez de agua y la baja productividad en pequeñas parcelas. Esta situación afecta de manera directa la seguridad alimentaria, el bienestar económico de las familias agricultoras y la resiliencia de los sistemas productivos locales.

Agravado por los efectos del cambio climático como el aumento de eventos climáticos extremos, la irregularidad de las lluvias y la reducción de fuentes hídricas, se hace necesario explorar alternativas sostenibles que permitan a los productores locales mejorar la productividad en espacios reducidos, restaurar la salud del suelo y optimizar el uso del agua.

Ante esta problemática, la agricultura biointensiva se presenta como una opción viable, este sistema de cultivo, está basado en principios agroecológicos, busca maximizar la producción en espacios reducidos mediante el uso eficiente del agua, la reincorporación de nutrientes a través del compostaje y el manejo de residuos orgánicos, así como la mejora continua del suelo. Su enfoque promueve prácticas que reducen el uso de fertilizantes químicos, restauran la estructura y fertilidad del suelo que permiten mantener o incluso incrementar los rendimientos agrícolas, especialmente en contextos de estrés hídrico

1.2. Justificación

Los factores adversos que afectan a la agricultura familiar campesina e indígena en contextos altoandinos son cada vez más frecuentes y alarmantes. Entre ellos destacan los cambios en el comportamiento climático, que se manifiestan en la disminución de las precipitaciones, la variabilidad de las estaciones y el incremento de fenómenos extremos como heladas o sequías prolongadas. Estos cambios han puesto en riesgo la seguridad alimentaria e hídrica de miles de familias campesinas, principalmente de origen aymara.

Asimismo, en la región del altiplano se ha acelerado la degradación de los suelos agrícolas, evidenciada en la pérdida de fertilidad, la disminución de la capacidad de retención de agua y la reducción de la agrobiodiversidad, como consecuencia del uso inadecuado del suelo, la aplicación intensiva de agroquímicos y la falta de rotación de cultivos.

En este contexto de crisis climática, económica y alimentaria, resulta imprescindible adoptar sistemas productivos alternativos y resilientes. Los cultivos biointensivos surgen como una alternativa agroecológica eficaz, ya que promueven la regeneración y conservación de los suelos mediante prácticas como el doble excavado, la incorporación de compost orgánico, la rotación diversificada de cultivos y la cobertura vegetal. Estas técnicas no solo mejoran la estructura del suelo y su capacidad de retención de agua, sino que también fortalecen la biodiversidad microbiana, asegurando una fertilidad sostenida y reduciendo la dependencia de insumos externos.

El sistema de cultivo biointensivo, por tanto, representa una solución viable, eficiente y sostenible, especialmente para las familias campesinas y comunidades periurbanas que disponen de espacios reducidos y enfrentan condiciones de escasez hídrica. Su implementación contribuye a la adaptación de los sistemas agrícolas tradicionales frente al cambio climático y a la construcción de soberanía alimentaria a nivel local.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

- Evaluar el comportamiento agronómico de un sistema de producción biointensiva asociada bajo estrés hídrico en la comunidad Carcanavi del municipio de Achocalla.

1.3.2. Objetivos específicos

- Evaluar el comportamiento agronómico y productivo de hortalizas, leguminosas, tubérculos y cereales producidos dentro de un sistema biointensivo asociado.
- Analizar y comparar el comportamiento agronómico de camas altas del sistema biointensivo en condiciones de estrés hídrico.
- Identificar presencia de plagas y enfermedades en los cultivos bajo sistema biointensivo asociados.
- Determinar el beneficio costo de la producción de hortalizas, leguminosas, tubérculos y cereales en un sistema biointensivo asociado.

1.4. Hipótesis

- El comportamiento agronómico de un sistema de producción biointensiva asociada bajo estrés hídrico en la comunidad Carcanavi del municipio de Achocalla no presentan diferencias significativas.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. Cultivos biointensivos

El método biointensivo se fundamenta en estrategias agrícolas tradicionales de civilizaciones como China, Grecia y Europa, modificados y organizados en los años 70 por John Jeavons y la entidad Ecology Action en California, Estados Unidos. Este método incorpora fundamentos de la agricultura biodinámica y agroecológica, fomentando la regeneración del suelo y la autosuficiencia alimentaria. Se enfoca en acciones como la preparación profunda del suelo a través de la doble excavación, la formación de camas elevadas o camellones, la aplicación intensiva de composta, la plantación próxima en esquemas hexagonales, el trasplante desde almácigos, el riego eficaz y la extracción manual (Ourproject, 2023).

Se fundamenta en diferentes principios que se pueden ajustar a cualquier tipo de clima y llevar a cabo con métodos manuales utilizando herramientas simples. El resultado es una agricultura sostenible que no solo genera alimentos sanos y orgánicos, sino que también restaura y enriquece la fertilidad del suelo (CII-ASDENIC, 2016).

2.2. Principios del método de cultivo biointensivo

Los principios del método de cultivo biointensivo nos ayudan a cultivar más en menos espacio y con menor esfuerzo estos principios son:

2.2.1. La doble excavación

En condiciones favorables, las raíces de los cultivos pueden desarrollarse a profundidades mucho mayores de lo que normalmente se aprovecha en la agricultura convencional, donde la maquinaria y las herramientas suelen trabajar el suelo hasta un promedio de 30 cm. Esta profundidad es insuficiente si se considera el potencial de desarrollo radicular y la necesidad de un mayor volumen de suelo fértil. En contraste, el método biointensivo propone la preparación de camas de cultivo de 1,20 a 1,50 m de ancho por 5,0 a 6,5 m de largo y hasta 60 cm de profundidad, lo que favorece un crecimiento radicular más extenso, mejora la capacidad de retención de agua y optimiza la disponibilidad de nutrientes para los cultivos (Vida, 2015).

Según Niebla (2008), el ancho óptimo de 1,20 m en las camas de cultivo permite realizar labores como deshierbe, siembra, trasplante y riego de manera eficiente, trabajando siempre desde fuera para evitar pisar y compactar el suelo. Esta práctica mantiene una estructura del suelo suelta, lo que favorece el desarrollo radicular profundo y saludable de las plantas, mejorando su crecimiento y aumentando su resistencia natural frente a plagas y enfermedades.

Vida (2015), indica que la técnica está diseñada para obtener el mejor rendimiento con el menor esfuerzo posible, siguiendo este procedimiento:

1. Se traza la cama y se fijan estacas permanentes en las cuatro esquinas; si el suelo es seco o arcilloso, se humedece lo suficiente para ayudar en la excavación.
2. Se comienza cavando una zanja a lo largo de un lado de la cama con un ancho de 30 centímetros y 30 centímetros de profundidad. La tierra extraída se coloca en cubetas.
3. Se afloja la tierra del fondo de la zanja otros treinta centímetros.
4. Si el suelo es muy deficiente, se puede añadir un poco de estiércol o compost en esta zanja; si está seco, se riega el fondo de la zanja.
5. En los siguientes 30 centímetros de la cama, se hace otra zanja, y la tierra extraída de esta se utiliza para cubrir la anterior.
6. Se repiten los pasos anteriores hasta terminar la cama.
7. Se nivela la cama con un rastrillo una o dos veces durante la excavación.

2.2.2. Uso de composta y otros abonos

Según SEMARNAT (2013), el uso de abonos en la agricultura tiene como objetivo mejorar progresivamente la calidad del suelo, fertilizando las camas de cultivo de forma continua. Estos abonos, ya sean naturales o en forma de composta, aportan minerales y nutrientes esenciales que enriquecen el suelo, favoreciendo un entorno óptimo para el desarrollo saludable de los cultivos.

2.2.2.1. La composta

Es el abono orgánico por excelencia, la solución y el secreto para tener un huerto saludable y productivo. La composta biointensiva es lo más cercano a la manera en que la naturaleza fertiliza los bosques y los campos (Vida, 2015).

2.2.2.2. Estiércol

El estiércol es un abono que proviene del proceso digestivo de los animales y constituye una fuente importante de nutrientes para el suelo. Entre los más empleados en la agricultura biointensiva se encuentran los de animales herbívoros domésticos, como la vaca, el caballo, el cordero y la cabra, destacando estos últimos por su equilibrio y riqueza en nutrientes. También pueden utilizarse otras fuentes como el estiércol porcino y la gallinaza. Sin embargo, para emplearlo de forma segura y eficaz, es indispensable que esté completamente fermentado y seco, ya que el estiércol fresco produce gran cantidad de calor que podría quemar las plantas. Para asegurar una correcta fermentación y evitar riesgos, se recomienda un periodo de reposo de cinco meses antes de su aplicación (Vida, 2015).

2.2.3. La siembra cercana

El método biointensivo, según Vida (2015), se asemeja a la naturaleza y utiliza de manera más eficiente el espacio, lo que explica una de sus elevadas eficiencias. Las distancias sugeridas difieren de las empleadas en la agricultura convencional, ya que facilitan el contacto con las hojas de las plantas cuando alcanzan su etapa de madurez, sin dejar ningún espacio en la cama descubierto. Esta siembra próxima ofrece numerosos beneficios, entre los más destacados se incluyen:

1. Se limita la evaporación del agua.
2. La producción es mayor.
3. Se limita el crecimiento de hierbas indeseables, como las malezas.
4. Se crea un microclima bajo las plantas.
5. Se reducen los ataques de insectos.
6. Las raíces aprovechan mejor los nutrientes.

2.2.4. Asociación de cultivos y rotación de cultivos

Según SEMA (2008), menciona que la asociación de cultivos conlleva la elección de las plantas que se plantarán junto a otras, dado que se ha notado que ciertas plantas se desarrollan de manera más eficiente si se cultivan en conjunto con otras. Dado que las raíces se expanden en un espacio más amplio de lo que podemos percibir visualmente, es posible que interactúen entre sí bajo la tierra, estimulando o restringiendo su desarrollo. Al buscar la unión correcta de plantas, conseguimos potenciar su sabor, tamaño y resistencia. El método biointensivo clasifica las plantas en:

- **Donantes:** Son vegetales que contribuyen a enriquecer el terreno, tales como las leguminosas. Ejemplo: frijoles, habas, alfalfa, y lentejas.
- **Consumidoras ligeras:** Precisan pocos nutrientes del suelo. Ejemplo: lechugas, rábanos, remolachas, zanahorias, hierbas aromáticas, y otras plantas con fragancia.
- **Voraces:** Requieren un alto contenido de nutrientes para crecer y pueden agotar los recursos del suelo. Ejemplo: papa, tomates, maíz, calabacines, ajos, girasoles, avena, sorgo, cebollas y granos como el trigo y el centeno.

Con el paso del tiempo, la rotación de cultivos contribuye a preservar el equilibrio de nutrientes en la tierra. Las plantas poseen variados patrones de nutrición y desarrollo, algunas requieren gran cantidad de nutrientes, y si se cultivan dos veces consecutivas en el mismo terreno, perderán sus componentes minerales. Para una correcta rotación es imprescindible entender las plantas y sus hábitos (SEMARNAT, 2013).

2.2.5. Cultivos eficientes en carbono

Según Niebla (2008), cultivos como el maíz, el trigo, el centeno, el amaranto, el haba y los girasoles, además de proporcionar alimentos, generan suficiente materia para la elaboración de composta. Por su parte, SEMA (2008) señala que el trigo y el centeno desarrollan sistemas radiculares extensos que mejoran la estructura del suelo, mientras que el haba contribuye a la fijación de nitrógeno en el mismo.

2.2.6. Cultivos eficientes en calorías

Según Niebla (2008), los cultivos eficientes en calorías son aquellos que producen alimentos en espacios reducidos, como la papa, el camote, la yuca, la malanga y el ajo. Por su parte, SEMA (2008) recomienda destinar aproximadamente un 30% de la superficie

cultivada a plantas radicales como la papa, el camote y el ajo, ya que generan una alta cantidad de calorías para la dieta por unidad de superficie.

2.3. Ventajas del sistema de producción biointensivo

Según Siñani y Enríquez (2015), las ventajas del sistema de producción biointensivo son:

- Facilita la conservación de hasta un 70% de agua para irrigación, siempre que los terrenos estén correctamente preparados.
- Además, este sistema tiene la capacidad de reemplazar la condición ideal del terreno en un periodo de tiempo reducido (40 veces más rápido que un proceso natural).
- También, favorece el reciclaje de nutrientes y la circulación de energía en el suelo, dado que todo lo que se extrae del sistema tiene la capacidad de regresar a él. No obstante, esto depende de una correcta gestión y uso de los desechos de cosecha, residuos de animales y otros.

2.4. Humedad en cultivos biointensivos

La humedad del suelo en los cultivos biointensivos es un factor determinante para el crecimiento y desarrollo de las plantas, ya que influye directamente en la disponibilidad de agua y nutrientes. En este sistema, que se caracteriza por el uso intensivo de pequeñas áreas y alta diversidad de cultivos, el manejo adecuado de la humedad es esencial para mantener un equilibrio hídrico óptimo que favorezca la germinación, el desarrollo radicular y la producción. La conservación de la humedad se logra mediante prácticas como la doble excavación, la incorporación de materia orgánica y la cobertura vegetal, lo que mejora la capacidad de retención de agua y reduce las pérdidas por evaporación, siendo especialmente importante en condiciones de estrés hídrico (Reagtools, 2023).

2.5. Movimiento de agua en el suelo

La circulación del agua a través del suelo es un proceso esencial en el ciclo hidrológico y juega un rol vital en la disponibilidad de agua para las plantas. El agua se desplaza por el terreno de diversas maneras, entre las que destacan la infiltración y la permeabilidad. La infiltración es el proceso por el cual el agua penetra en el suelo desde la superficie, es decir, se refiere al desplazamiento vertical del agua. La capacidad de infiltración depende principalmente de la porosidad del terreno, determinada por la textura y estructura del mismo. Por otra parte, la permeabilidad del suelo hace referencia a su capacidad para

permitir el paso del agua en condiciones de saturación, y también está influenciada por la textura, estructura y porosidad del suelo. Además, factores como la compactación y el contenido de materia orgánica afectan tanto la infiltración como la permeabilidad, lo que repercute directamente en la capacidad de drenaje del suelo, la gestión del riego y la disponibilidad de agua (FONTAGRO, 2023).

2.6. Necesidades hídricas

Las necesidades hídricas de los cultivos se definen como la cantidad total de agua que una planta requiere para completar adecuadamente su ciclo de crecimiento y desarrollo, manteniendo un balance hídrico óptimo entre el suelo, la planta y la atmósfera. Estas necesidades dependen de factores como el tipo de cultivo, la etapa fenológica, las condiciones climáticas, el tipo de suelo y las prácticas de manejo agrícola.

La cebolla es un cultivo muy sensible al déficit hídrico, especialmente durante el engrosamiento del bulbo. Su requerimiento total de agua varía entre 350 y 550 mm por ciclo, dependiendo del clima. Necesita humedad constante, pero no excesiva, ya que el exceso puede favorecer enfermedades fúngicas (FAO, 2002).

El haba demanda una alta disponibilidad de agua durante las etapas de floración y formación de vainas, presentando estrés si el riego es escaso o irregular. Su requerimiento hídrico estimado es de 400 a 600 mm por ciclo (Grove, 2019).

La papa necesita agua moderada pero constante. Tolera algo de estrés hídrico en la etapa vegetativa, pero es altamente sensible durante la tuberización y el llenado de tubérculos. Su necesidad hídrica es de 500 a 700 mm en promedio, dependiendo de la variedad y clima (FAO, 2002).

El centeno es un cereal rústico y tolerante al déficit hídrico, especialmente en comparación con otras especies. Sin embargo, la disponibilidad de agua durante el llenado de grano mejora el rendimiento. Su requerimiento hídrico es de 300 a 500 mm por ciclo (Agtfoods, 2018).

2.7. Importancia del agua en la agricultura

Según FONTAGRO (2023), el agua juega un rol crucial en la producción de alimentos, ya que se necesita en todas las fases del ciclo vital de las cosechas, desde la germinación de

las semillas hasta la producción de alimentos. Además, resulta crucial para el progreso de las comunidades rurales. La escasez de agua puede causar estrés hídrico en las plantas, lo que induce a un crecimiento insuficiente, disminución de la producción de cultivos y pérdida de la calidad. En cambio, el abastecimiento correcto de agua en cantidades y calidad ideales puede incrementar la producción de cultivos y elevar su calidad.

2.8. Estrés hídrico

Según FONTAGRO (2023), el estrés hídrico hace referencia a un estado en el que las plantas sufren una escasez de agua suficiente para cubrir sus requerimientos fisiológicos habituales. Esto ocurre cuando la necesidad de agua de la planta supera la cantidad de agua disponible en el suelo o cuando las condiciones ambientales limitan la absorción de agua por las raíces. La falta de agua constante o durante largos periodos puede provocar marchitez; sin embargo, si el déficit no es tan prolongado, puede ocasionar una disminución en el crecimiento y rendimiento, ya que el estrés por falta de agua restringe el desarrollo de las plantas, reduce la productividad de los cultivos y afecta la calidad de los productos agrícolas. Además, las plantas sometidas a este tipo de estrés se vuelven más susceptibles a enfermedades y plagas.

Uno de los efectos más relevantes desde el punto de vista productivo es la inducción de la floración temprana y, en consecuencia, una producción adelantada, como respuesta adaptativa de la planta para asegurar su reproducción antes de que las condiciones se tornen letales. Este fenómeno se ha documentado en diversos cultivos, donde la planta, al percibir condiciones adversas prolongadas, acelera la transición de la fase vegetativa a la reproductiva. Esta respuesta, aunque útil en ecosistemas naturales, en sistemas agrícolas puede resultar en estructuras florales y reproductivas poco desarrolladas, afectando negativamente el rendimiento y la calidad del producto final (FAO, 2006b).

2.9. Descripción de los cultivos evaluados

La presente investigación se centra en el estudio de un sistema de cultivo asociado que integra las especies de cebolla, haba, papa y centeno. Mediante esta combinación, se busca comprender cómo estas plantas interactúan en el mismo espacio agrícola, maximizando el uso del espacio, los recursos hídricos y los nutrientes del suelo. Según SEMA (2008), menciona que el cultivo asociado permite observar las interacciones

positivas entre especies de distintos requerimientos y hábitos de crecimiento, favoreciendo el control biológico de plagas, mejorando la estructura del suelo y optimizando la producción

2.10. Cebolla (*Allium cepa*)

2.10.1. Taxonomía de Cebolla (*Allium cepa*)

Según FAO (2023) la taxonomía del haba es la siguiente:

Nombre común: Cebolla

Nombre científico: *Allium cepa*

Familia: *Amaryllidaceae*

Clase: *Liliopsida*

Orden: *Asparagales*

División: *Magnoliophyta*

Reino: *Plantae*

2.10.2. Características del cultivo de cebolla

La cebolla está descrita como una planta herbácea cuya parte comercial es un bulbo subterráneo compuesto por capas envolventes superpuestas (hojas modificadas), que presenta variaciones en su forma, color, sabor picante característico, tamaño y capacidad de conservación pos cosecha. La cebolla se desarrolla bien en suelos de textura media, preferentemente franco arenoso, con buen drenaje y rico en materia orgánica, que favorecen el buen desarrollo de las raíces y de los bulbos. Suelos muy arcillosos no son recomendados por dificultar la formación de bulbos (Ramón, 2019).

2.10.3. Fenología del cultivo de cebolla

El desarrollo fenológico de la cebolla (*Allium cepa*) comprende etapas definidas: germinación (7 a 14 días tras la siembra), fase de plántula (formación de raíces y primeras hojas), crecimiento vegetativo (desarrollo de hojas y pseudotallo), formación y engrosamiento del bulbo (influenciada por fotoperiodo y temperatura) y maduración (senescencia foliar y preparación para cosecha), (Figura 1). Un manejo adecuado del riego y la fertilización durante la formación del bulbo es clave para lograr un buen rendimiento (AgronoBlog, 2023). En la figura 1 se observa las fases fenológicas de la cebolla.

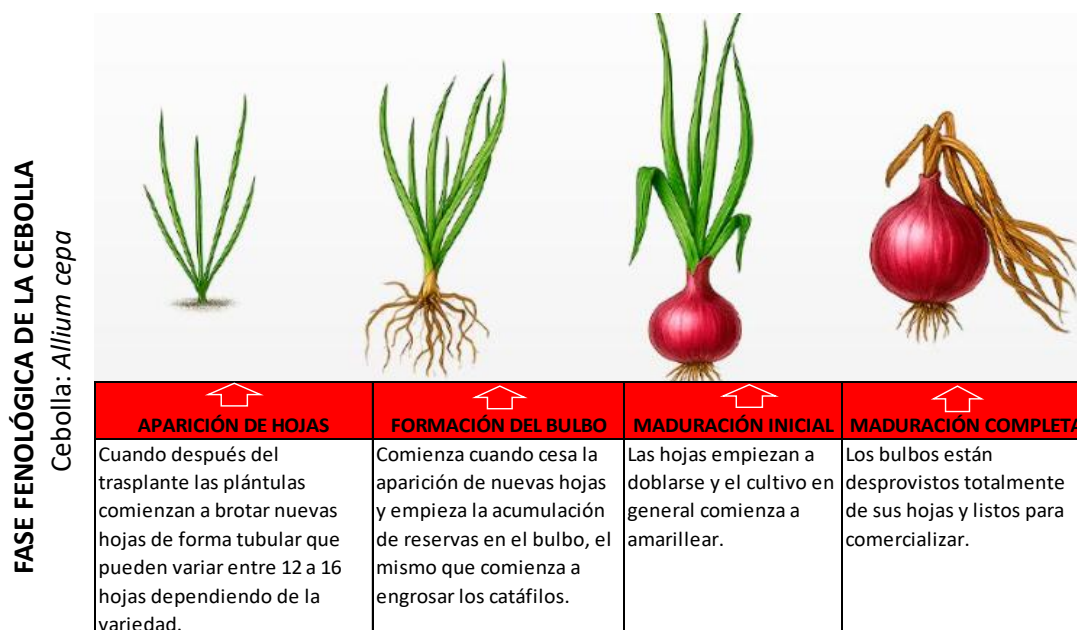


Figura 1. Fenología del cultivo de cebolla, ajo (SENAMHI, 2017)

2.11. Haba (*Vicia faba*)

2.11.1. Taxonomía de Haba (*Vicia faba*)

Según FAO (2023), la taxonomía del haba es la siguiente:

Nombre común: Haba

Nombre científico: *Vicia faba*

Familia: *Fabaceae*

Clase: *Magnoliopsida*

Orden: *Fabales*

División: *Magnoliophyta*

Reino: *Plantae*

2.11.2. Características del cultivo de haba

El haba es un cultivo que se cultiva en pequeñas parcelas con pocos y bajos insumos. Es por este motivo que su cultivo en los sistemas de *suka qullus* llega a ser una alternativa muy importante. Desde el punto de vista agronómico constituye una inmejorable alternativa para la rotación de cultivos por su función mejoradora del suelo en la fijación del nitrógeno

atmosférico que se obtiene de la simbiosis radicular con bacterias del género *Rhizobium*. Por este motivo, el haba es considerada como un cultivo de cola de rotación ya que gracias a su capacidad de fijar el nitrógeno atmosférico en el suelo, permite proporcionar un suelo mucho más nutrido para el siguiente cultivo (PROIMPA, 2009).

2.11.3. Fenología del cultivo de haba

El desarrollo fenológico del haba sigue una secuencia ordenada de etapas que determinan su crecimiento y rendimiento. Inicia con la emergencia, donde aparecen las plántulas tras la siembra. Luego sigue el macollaje, caracterizado por la formación de brotes laterales. En la fase de formación de botones florales, se desarrollan las estructuras reproductivas que dan paso a la floración, etapa crítica en la que ocurre la fecundación. Posteriormente se produce el fructificación, con el desarrollo y llenado de las vainas, culminando en la maduración, momento en que las semillas y vainas reducen su contenido de humedad, preparándose para la cosecha (Figura 2). Un manejo agronómico adecuado durante cada una de estas fases es esencial para asegurar una buena productividad del cultivo (Meier, 2001).

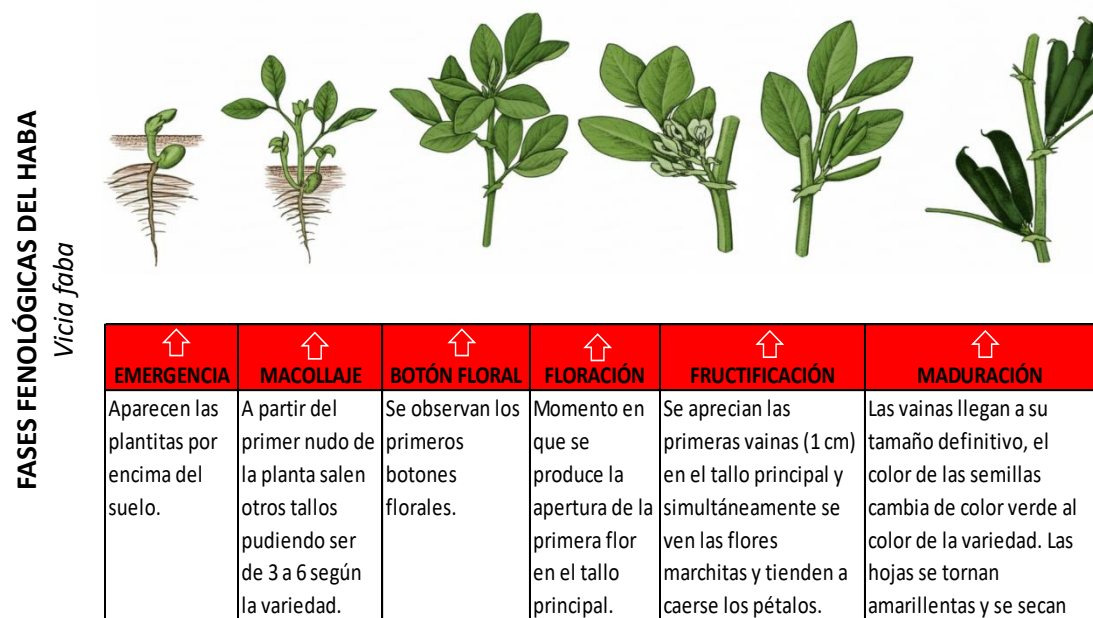


Figura 2. Fenología del cultivo de haba (SENAMHI, 2017)

2.12. Papa (*Solanum tuberosum*)

2.12.1. Taxonomía de papa (*Solanum tuberosum*)

Según CONABIO (2022), la taxonomía de la papa es la siguiente:

Nombre común: Papa

Nombre científico: *Solanum tuberosum*

Familia: *Solanaceae*

Clase: *Magnoliopsida*

Orden: *Solanales*

División: *Magnoliophyta*

Reino: *Plantae*

2.12.2. Características del cultivo de papa

La papa es un cultivo herbáceo anual con un tallo horizontal, que puede llegar a tener una medida alrededor de un metro. Bajo el suelo produce estolones que se engrosan dando lugar a los tubérculos. Estos almacenan nutrientes (principalmente almidón) y actúan como órganos de reserva para la reproducción de las plantas. Las hojas se forman y el sistema de raíces surge de los tubérculos. La creación de tubérculos se basa en la presencia de agua y nutrientes; al concluir su ciclo, el tejido aéreo se marchita y los tubérculos se mantienen en el suelo, posibilitando un nuevo brote bajo condiciones propicias (FAO, 2008).

2.12.3. Fenología del cultivo de papa

La fenología de la papa involucra cinco fases bien diferenciadas: brotación, crecimiento vegetativo, iniciación de tubérculos, desarrollo y engrosamiento de tubérculos, y maduración (Figura 3). Estas etapas están influenciadas por factores ambientales como la temperatura, la humedad del suelo y la disponibilidad de nutrientes. La etapa crítica es la iniciación de los tubérculos, momento en el que las condiciones adversas como el estrés hídrico pueden disminuir drásticamente el número y tamaño de los tubérculos formados.

Comprender estas fases permite una mejor planificación del riego, fertilización y control de plagas (Meier, 2001).

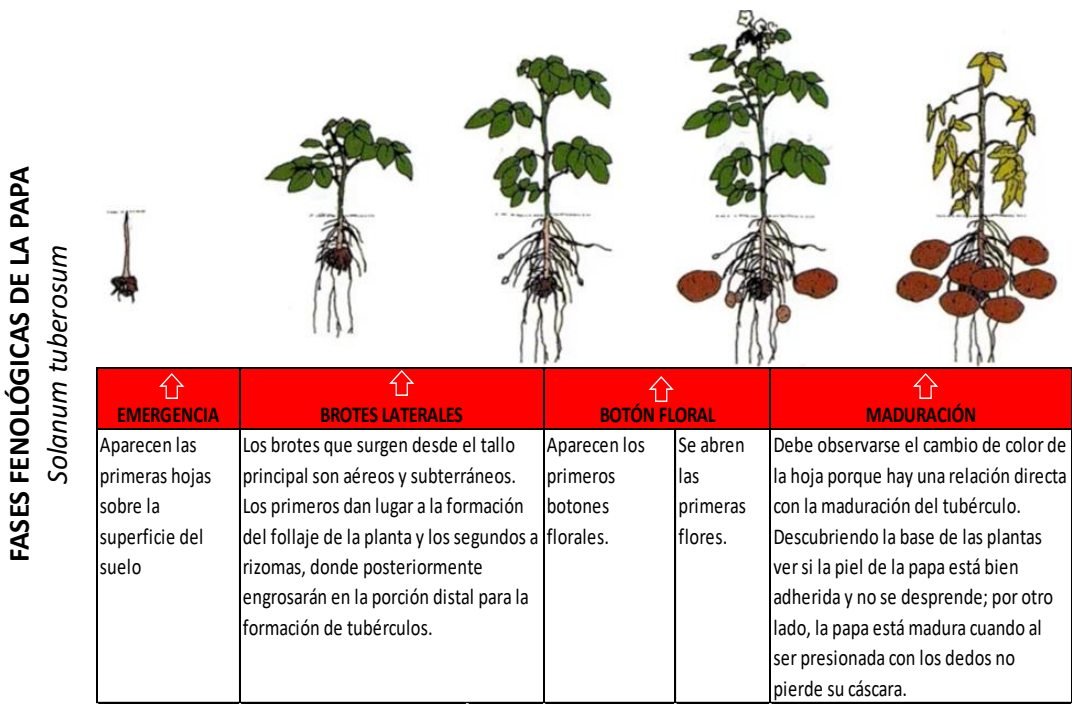


Figura 3. Fenología del cultivo de papa (SENAMHI, 2017)

2.13. Centeno (*Secale cereale*)

2.13.1. Taxonomía de centeno (*Secale cereale*)

Según FAO (2023), la taxonomía del centeno es la siguiente:

Nombre común: Centeno

Nombre científico: *Secale cereale*

Familia: *Poaceae*

Clase: *Liliopsida*

Orden: *Poales*

División: *Magnoliophyta*

Reino: *Plantae*

2.13.2. Características del cultivo de centeno

El centeno se cultiva principalmente por su grano y puede intercalarse con otros cultivos para diversificar los sistemas de producción, especialmente cuando las condiciones de cultivo son malas. Es un cultivo de pastura y se utiliza para prevenir la erosión eólica del suelo. El cultivo del centeno para grano o pasto es especialmente apropiado debido a su resistencia al invierno y a su rápido crecimiento a principios de la primavera en los climas fríos (Dreyer, 2018).

2.13.3. Fenología del cultivo de centeno

El centeno presenta un ciclo fenológico característico de los cereales de invierno, comenzando con la germinación y el macollamiento. Luego sigue la elongación del tallo, espigado, floración, llenado de grano y maduración (Figura 4). Estas etapas están estrechamente ligadas al fotoperiodo y temperatura, y su comprensión es vital para optimizar el manejo agronómico. La etapa de espigado y floración es particularmente sensible al déficit hídrico, el cual puede afectar la formación del grano. El centeno es tolerante al frío, por lo que es ideal para cultivos en zonas altas o de invierno (Meier, 2001).

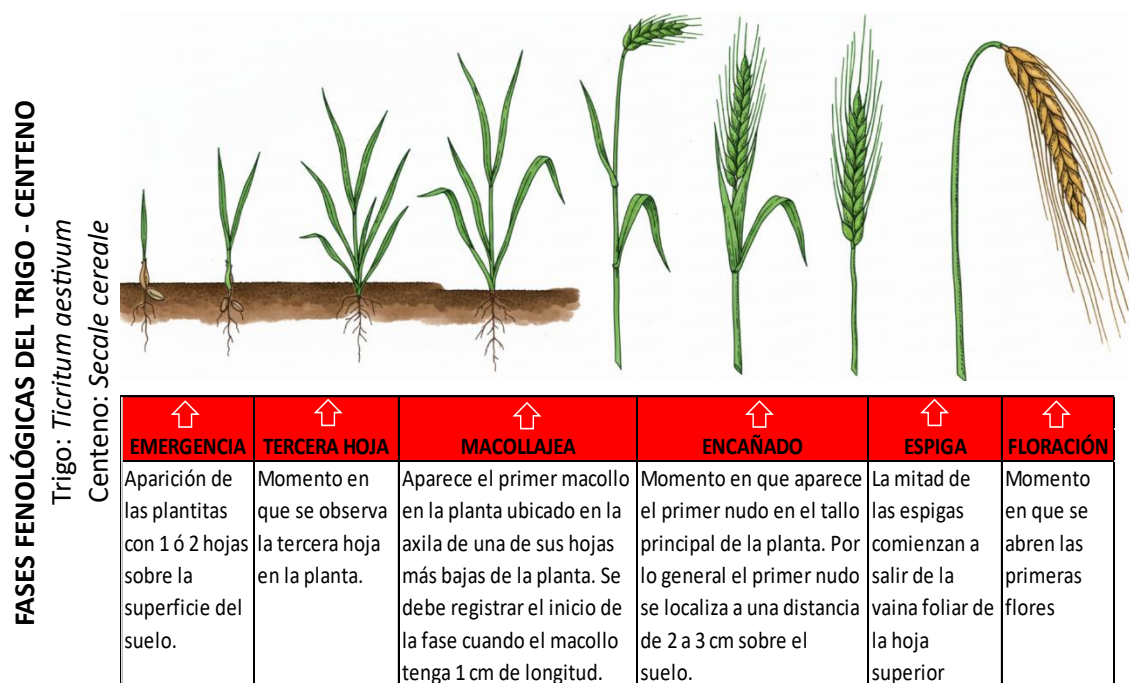


Figura 4. Fenología del cultivo de trigo, centeno (SENAMHI, 2017)

2.14. Plagas y enfermedades de los cultivos

El método biointensivo sostiene que los insectos son un componente del orden natural y que, antes de utilizar cualquier compuesto químico para su control, es necesario buscar métodos de control natural que únicamente eliminen a la plaga y preserven el balance de la vida en el campo. Esto se logra manteniendo la rotación de cultivos, las asociaciones y aprovechando los beneficios de las plantas aromáticas (Niebla, 2008).

No obstante, aunque el diseño biointensivo reduce significativamente los riesgos, no elimina por completo la posibilidad de afectación por plagas o enfermedades. Entre las plagas comunes en hortalizas se pueden encontrar pulgones, trips y minadores de hoja, mientras que enfermedades como mildiu, roya o manchas foliares pueden presentarse si existen condiciones de humedad o manejo inadecuado. El manejo en estos sistemas se basa en principios ecológicos y se prioriza el uso de extractos naturales, control mecánico o biológico antes que productos sintéticos. De esta forma, el sistema mantiene su sostenibilidad y protege tanto la biodiversidad como la salud del suelo y de los cultivos (Vida, 2015).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Localización

3.1.1. Ubicación Geográfica

La presente investigación se realizó en la comunidad de Carcanavi, perteneciente al municipio de Achocalla, provincia Murillo del departamento de La Paz, Bolivia. Esta comunidad se encuentra a aproximadamente 20 kilómetros de la plaza Murillo, en la ciudad de La Paz. Ubicación geográfica, está situada a una latitud de $16^{\circ}21'10.4''$ Sur y una longitud de $68^{\circ}4'56.6''$ Oeste, a una altitud de 3.682 msnm (Google Earth, 2024).

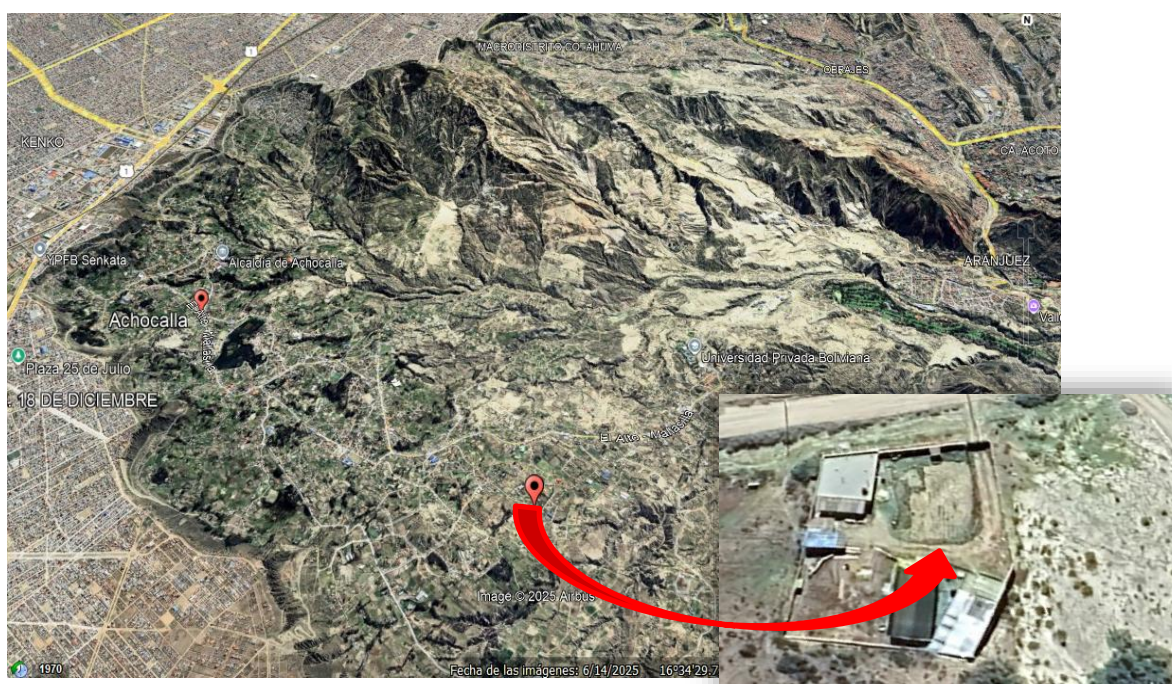


Figura 5. Ubicación geográfica (Google Earth, 2024)

3.1.2. Características Ecológicas

3.1.2.1. Clima

Presenta una temperatura promedio anual alcanza los $16,5^{\circ}\text{C}$, con un promedio de máximas de 17°C . y un promedio de mínimas de 14°C ; la precipitación promedio anual alcanza los 600 mm (GAMA, 2021).

3.1.2.2. Vegetación

La unidad de vegetación con mayor presencia en el Municipio se halla compuesto por cultivos extensos, barbechos y prados extensos, acompañado de matorrales y pajonales altimontanos de la Puna y Altiplano xerofíticos sobre suelos bien drenados y matorrales xeromórficos con gramíneas y cactácea, mismo que representa el 22,3%, se extiende sobre la franja este del municipio (GAMA, 2021).

3.1.2.3. Suelo

Son suelos de textura variable, desde suelos de textura fina o arcillosa, a moderada y suelos franco arenosos con presencia de gravas angulares en los horizontes internos del perfil del suelo en los suelos de pie de monte, la reacción del suelo (pH) fluctúa de neutro a moderada y fuertemente alcalino (GAMA, 2021).

3.2. Materiales

3.2.1. Material de estudio

Los materiales que se emplearán para el estudio fueron semillas y plantines:

- Cebolla (plantines) perilla
- Haba (semillas) local
- Papa (tubérculos) waycha
- Centeno (semillas)

3.2.2. Material de escritorio

- Balanza
- Cámara fotográfica
- Libreta de campo
- Planilla de registro de datos
- Lápices y marcadores

3.2.3. Material de campo

- Picota Pala
- Rastrillo

- Estacas
- Lienzo
- Barreno
- Un medidor de humedad manual de aguja
- Wincha y flexómetro

3.3. Metodología

La investigación fue desarrollada con el apoyo de la Fundación PRODIASUR, en el predio de Wali Sumita II, ubicado en la comunidad de Carcanavi, Municipio de Achocalla. El estudio se enmarcó dentro de un enfoque agroecológico, orientado a generar alternativas productivas sostenibles que contribuyan a mitigar los efectos del cambio climático en la agricultura familiar. Las camas biointensivas fueron implementadas mediante técnicas tradicionales, utilizando el método de doble excavación manual, sin el uso de maquinaria, respetando así los principios de manejo ecológico y conservación del suelo.

3.3.1. Desarrollo del ensayo

3.3.1.1. Muestreo de suelo

Se recolectaron muestras de suelo antes de iniciar la preparación de las camas biointensivas para el análisis físico químico de suelos (Anexo 1). Una vez delimitadas y preparadas las camas, incluyendo la doble excavación y la incorporación de turba y guano, se tomaron muestras a una profundidad de 20 cm (Anexo 2). Estas muestras fueron enviadas al Laboratorio de Suelos y Aguas (LAFASA) de la Facultad de Agronomía de la Universidad Mayor de San Andrés para su análisis físico-químico, considerando las siguientes variables: pH, potasio intercambiable, materia orgánica, fósforo disponible y nitrógeno total (Figura 6).



Figura 6. Obtención de muestra de suelos

Se realizó un muestreo de suelo en el área experimental con la finalidad de caracterizar las condiciones iniciales del mismo, con el propósito de determinar su fertilidad base y evaluar la disponibilidad de nutrientes para los cultivos bajo investigación (papa, cebolla, haba y centeno). Los valores obtenidos en el análisis sirvieron como referencia para interpretar el comportamiento agronómico y productivo de los cultivos.

3.3.1.2. Delimitación de la parcela experimental

La parcela experimental fue establecida bajo el sistema de producción biointensiva, conformada por tres camas altas de cultivo. Cada cama biointensiva presentó dimensiones de 1,20 metros de ancho por 5 metros de largo, separadas entre sí por pasillos de 80 centímetros de ancho (Figura 7).



Figura 7. Delimitación de la parcela experimental

3.3.1.3. Preparación de las camas biointensivas

Para la preparación del suelo se usó el método de doble excavación a una profundidad de 60 cm se agregó estiércol de oveja y turba, fue mezclado homogéneamente utilizando turba como mejorador de retención de humedad y estiércol de oveja como fuente de nutrientes, esta mezcla permitió aumentar la fertilidad del suelo y mejorar su capacidad de retención de agua (Figura 8).



Figura 8. Preparación de las camas biointensivas

3.3.1.4. Siembra

En el sistema biointensivo, se emplearon camas de 1,20 m de ancho por 5 m de largo, en las cuales se organizaron 7 surcos. La densidad de siembra se ajustó a los principios del sistema biointensivo: se establecieron 2 surcos de cebolla en los extremos, con 20 cm entre plantas y 15 cm entre surcos; seguidos por 2 surcos de haba en la zona central, respetando la misma distancia entre plantas y surcos; en el eje medio se ubicó 1 surco de centeno sembrado al boleó; mientras que 2 surcos de papa se distribuyeron a ambos lados del centeno, con 40 cm entre plantas y 20 cm entre surcos (Figura 9).



Figura 9. Siembra de los cultivos

3.3.1.5. Riego y desmalezado

Desde la siembra hasta la germinación de los cultivos, el riego se realizó de manera uniforme manteniendo la humedad del suelo. Para determinar este punto, se utilizó el método de observación directa con apoyo del medidor de humedad de aguja,

complementado con análisis de textura del suelo, que en este caso corresponde a un suelo franco arcilloso. La profundidad de control fue de 10 a 15 cm, permitiendo observar que el punto de capacidad de campo se encontraba entre 7 y 9 en la escala del medidor (escala 1 a 10). Una vez completada la etapa de germinación, se aplicaron los tratamientos experimentales, correspondientes a tres frecuencias de riego diferenciadas.

Estas frecuencias de riego se seleccionaron basadas en criterios fisiológicos propios de los cultivos evaluados haba (*Vicia faba*), cebolla (*Allium cepa*) papa (*Solanum tuberosum*) y el centeno (*Secale cereale*), se realizó utilizando una regadera manual de 5 litros, asegurando una distribución uniforme del agua en toda la superficie de las camas biointensivas. La cantidad total de agua aplicada por tratamiento fue de 120 litros, determinada con base en las necesidades hídricas promedio de los cultivos.

Cada riego tuvo una duración promedio de una hora por cama, tiempo que permitió una infiltración completa del agua aplicada, evitando escurrimientos y favoreciendo una humectación profunda del perfil. Este tiempo se consideró adecuado para la estructura del suelo de las camas biointensivas, preparadas con doble excavación, técnica que mejora la aireación y la capacidad de infiltración, optimizando así el aprovechamiento del agua

La aplicación de riego se ejecutó en las fechas programadas para cada tratamiento, permitiendo evaluar el comportamiento agronómico de los cultivos bajo las diferentes frecuencias de riego.

El desmalezado se realizó una única vez durante todo el ciclo de producción, retirando manualmente las malezas presentes en la cama.

3.3.1.6. Control de la humedad durante las lluvias

Para el control de la humedad del suelo durante los eventos de precipitación, se implementó un sistema de recolección de lluvia mediante pluviómetros caseros. Se utilizaron tarros reciclados de 16 cm de diámetro y 24 cm de altura, los cuales se colocaron en el área experimental para captar el agua de lluvia.

El volumen acumulado se extrajo con una probeta de 100 ml, registrando en cada evento la cantidad recolectada. Conociendo el área de la superficie del tarro, se convirtió el volumen recolectado en milímetros de lluvia (mm), lo que permitió estimar la cantidad total de agua que efectivamente llegó a las camas biointensivas de 6 m².

Además, se empleó un medidor de humedad manual de aguja, insertado a una profundidad de 10 a 15 cm, cuya lectura (escala 1–10) permitió verificar el estado del suelo: seco (1–3), húmedo moderado (4–7) o húmedo (8–10). La combinación de ambas técnicas permitió definir si era necesario aplicar riego o suspenderlo después de las lluvias, garantizando la consistencia entre tratamientos y evitando variaciones no controladas en la disponibilidad de agua para los cultivos (Figura 10).



Figura 10. Control de la humedad durante las lluvias

3.3.1.7. Cosecha

La cosecha de todos los cultivos se realizó en la primera semana de abril de 2025, completando un total de 160 días desde la siembra. Durante este tiempo, los cultivos completaron su ciclo fenológico bajo condiciones de estrés hídrico controlado. En el caso del haba verde, se realizaron dos cosechas escalonadas, iniciando alrededor del día 130 después de la siembra y concluyendo con la última cosecha (Figura 11).



Figura 11. Cosecha de los cultivos

3.3.2. Diseño experimental

La investigación estará sujeta al diseño completamente al azar (DCA). El estudio consistió en evaluar el crecimiento y rendimiento de cuatro cultivos asociados (papa, haba, cebolla y centeno) bajo estrés hídrico en la producción biointensiva. La investigación estará sujeta al diseño completamente al azar DCA, distribuidos en 3 camas cuyas dimensiones se realizó de $1.20\text{ m} \times 5\text{ m}$ que el área llega ser de 6 m^2 .

Según Ochoa (2016), el modelo lineal aditivo para un DCA es el siguiente:

$$Y_{ij} = \mu + \alpha_i + \varepsilon_{ij}$$

Dónde:

Y_{ij} = Valor observado de la variable de respuesta.

μ = Media general.

α_i = Efecto fijo del i-ésimo tratamiento.

ε_{ij} = Error experimental

3.3.3. Factor de estudio

Los tratamientos en estudio fueron:

T_1 = cada 5 días de riego

T_2 = cada 10 días de riego

T_3 = cada 15 días de riego

3.3.3.1. Cultivos evaluados

C1 = Cebolla (Y)

H2 = Haba (O)

P3 = Papa (P)

C4 = Centeno (C)

3.3.3.2. Croquis Experimental

Diseño Completamente al Azar, conformado con un total de 3 tratamientos y 9 repeticiones.

En la Figura 12 se presenta la distribución de los tratamientos.

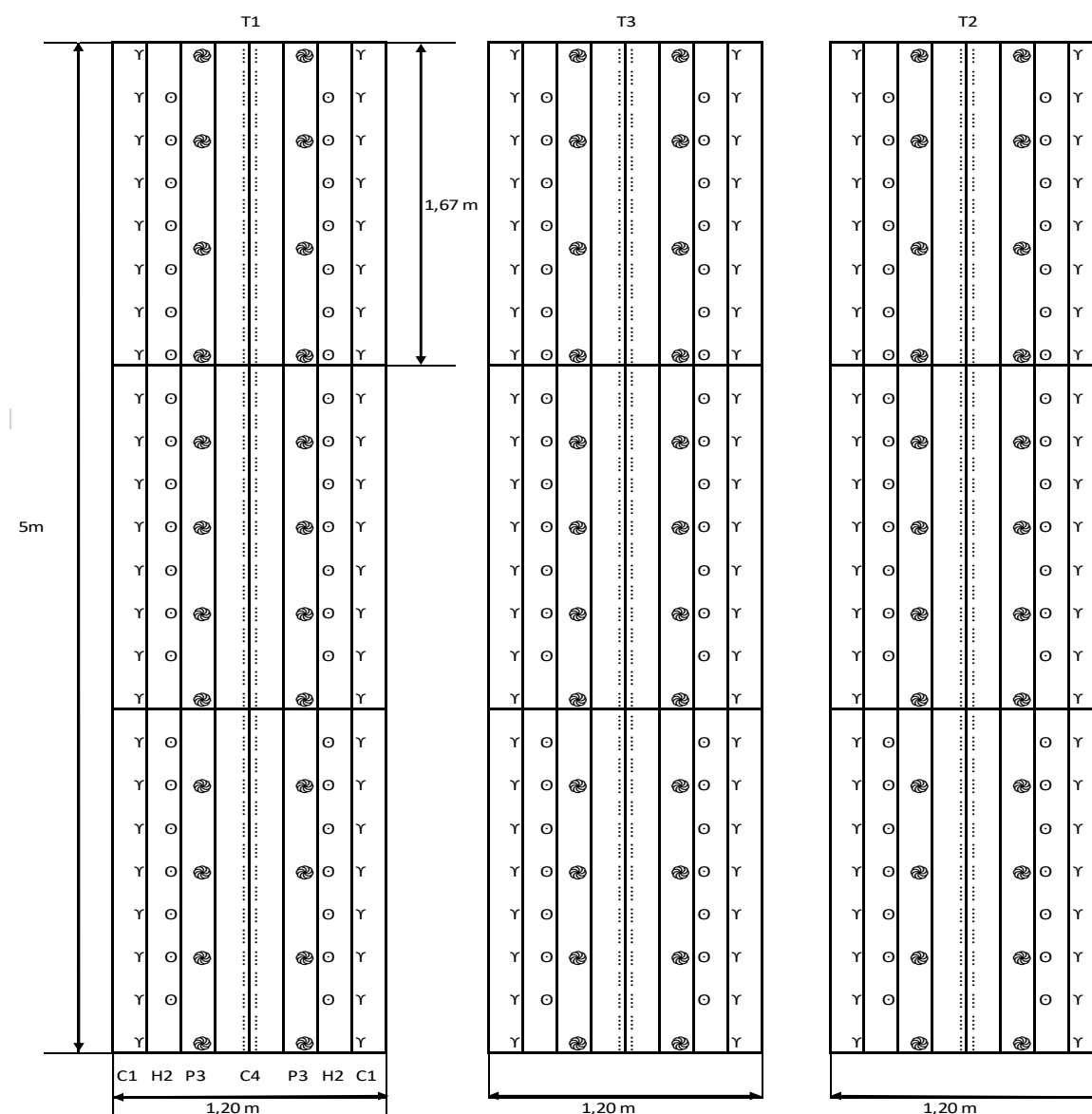


Figura 12. Croquis experimental del experimento

3.3.4. Variables de respuesta

3.3.4.1. Variables de respuesta agronómica de cebolla (*Allium cepa*)

3.3.4.1.1. Porcentaje de prendimiento de cebolla (%)

La cuantificación se realizó a los diez días del trasplante; tomando el número de plantas vivas sobre el número total de plantas por unidad experimental.

3.3.4.1.2. Altura de la planta de cebolla (cm)

Se estimaron cada 21 días durante todo el ciclo del cultivo, con la ayuda del flexómetro desde el cuello del bulbo hasta la punta de la hoja más larga.

3.3.4.1.3. Diámetro de bulbo de cebolla (cm)

Se obtuvieron de la parte media con la ayuda de un vernier, al momento de la cosecha.

3.3.4.1.4. Peso de planta de cebolla (g)

Se pesó con la ayuda de una balanza en el momento de la cosecha.

3.3.4.2. Variables de respuesta agronómica de haba (*Vicia faba*)

3.3.4.2.1. Porcentaje de germinación de haba (%)

La cuantificación se realizó a los 20 días de la siembra; tomando el número de plantas vivas sobre el número total de plantas por unidad experimental.

3.3.4.2.2. Altura de la planta de haba (cm)

Se midió cada 21 días por unidad experimental durante todo el ciclo del cultivo, con la ayuda del flexómetro desde el la base de la planta al ápice del tallo principal.

3.3.4.2.3. Longitud de vainas por planta de haba (cm)

Con una cinta métrica se midió la longitud de cada vaina, dicha medida expresada en centímetros (cm).

3.3.4.2.4. Peso de vainas por plantas de haba (cm)

Se realizó con ayuda de una balanza al momento de la cosecha.

3.3.4.3. Variables de respuesta agronómica de papa (*Solanum tuberosum*)

3.3.4.3.1. Porcentaje de germinación de papa (%)

La cuantificación se realizó a los 25 días de la siembra; tomando el número de plantas vivas sobre el número total de plantas por unidad experimental.

3.3.4.3.2. Altura de la planta de papa (cm)

Se estimaron cada 21 días por unidad muestral durante todo el ciclo del cultivo, con la ayuda del flexómetro desde el cuello del tubérculo hasta el ápice de la planta.

3.3.4.3.3. Diámetro del tubérculo de papa (cm)

Se realizó con la ayuda de un vernier al momento de la cosecha.

3.3.4.3.4. Peso del tubérculo por planta de papa (g)

Se realizó con ayuda de una balanza al momento de la cosecha.

3.3.4.4. Variables de respuesta agronómica de centeno (*Secale cereale*)

3.3.4.4.1. Porcentaje de germinación de centeno (%)

Se realizó una prueba previa a la siembra que indica cuántas semillas son viables, mostrando cuántas logran brotar en condiciones controladas la cuantificación se realizó a los diez días de la siembra tomando el número de semillas germinadas sobre el número total de semillas.

3.3.4.4.2. Altura de la planta de centeno (cm)

Se realizó cada 21 días por unidad experimental durante todo el ciclo del cultivo, con la ayuda del flexómetro desde la base de la planta al ápice floral.

3.3.4.4.3. Numero de granos por espiga de centeno

Se procedió a trillar y ventear de forma manual cada una de las espigas de las plantas muestreadas y se juntaron todos los granos de cada espiga y se contabilizaron de manera individual, determinando así el promedio de granos de las espigas evaluadas.

3.3.4.4.4. Peso de granos por espiga de centeno (g)

De la variable número de granos por espiga, se realizó el pesaje de los granos por cada espiga.

3.3.4.5. Rendimiento de cebolla, haba, papa y centeno

La obtención del rendimiento se realizó t/ha sacado de los promedios del peso de cada cultivo y por cada tratamiento.

3.3.4.6. Variables de presencia de plagas y enfermedades

Se evaluaron muestras de planta de cada unidad, verificando a simple vista la presencia o no de la enfermedad en las hojas de cada planta. El resultado será una proporción de hojas enfermas (NHE) sobre hojas totales evaluadas (NHT), expresado en porcentaje siendo la relación:

$$PHE = \frac{NHE}{NHT} \times 100\%$$

3.3.4.7. Análisis estadístico

Se realizó el análisis de varianza para un diseño y la prueba de Duncan al 5% de confiabilidad, se realizaron con el programa estadístico InfoStat.

3.3.4.7.1. Análisis económico

De acuerdo con la metodología propuesta por el CIMMYT (1988), el análisis económico en sistemas agrícolas asociados debe considerar no solo la productividad individual de cada cultivo, sino también la interacción y complementariedad entre ellos dentro del sistema. En el presente estudio sobre producción biointensiva con cebolla, haba, papa y centeno, este enfoque permitió evaluar la rentabilidad del sistema en conjunto mediante indicadores como el ingreso bruto, ingreso neto y la relación beneficio/costo.

- **Ingreso bruto**

$$IB = R * P$$

Dónde:

IB = Ingreso bruto

R = Rendimiento ajustado por tratamiento

P = Precio

- **Ingreso neto**

$$IN = IB - CP$$

Dónde:

IN = Ingreso neto

IB = Ingreso bruto

CP = Costo de producción

- **Relación beneficio/costo**

$$B/C = IB / CP$$

Dónde:

B/C = Beneficio Costo (Bs)

IB = Ingresos Brutos (Bs)

CP = Costos de Producción (Bs)

Donde se evaluará:

(B / C) > 1 Aceptable

(B / C) = 1 Dudoso

(B / C) < 1 Rechazado

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Precipitación (PP)

Los datos de precipitación fueron obtenidos mediante la implementación de pluviómetros artesanales, elaborados con tarros reciclados, colocados en el área experimental. Tras cada evento de lluvia, el agua acumulada fue medida utilizando una probeta de 100 ml, registrando así el volumen de precipitación de forma manual. Este método permitió llevar un registro continuo y confiable de las lluvias ocurridas durante el periodo de evaluación, facilitando el análisis del comportamiento hídrico en relación con el desarrollo de los cultivos bajo condiciones de estrés hídrico.

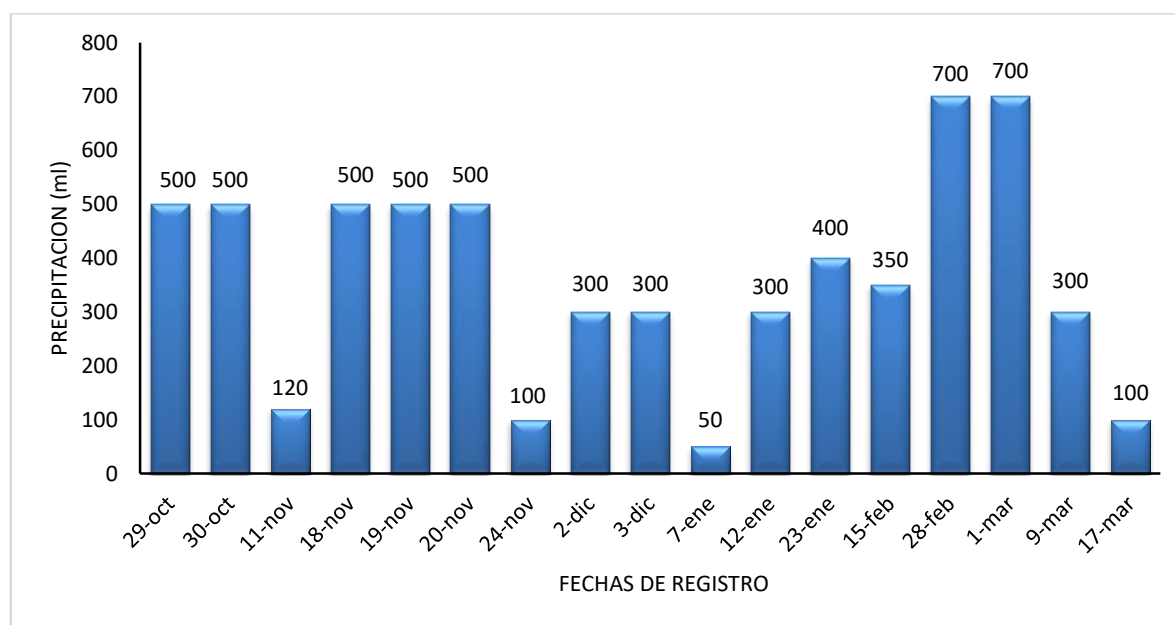


Figura 13. Precipitación de lluvia en la gestión 2024-2025

Durante el periodo de monitoreo en la figura 13 se muestra que entre finales de octubre y mediados de marzo, se registró una precipitación variable, con eventos de lluvia de distinta intensidad según el mes. En octubre, las lluvias iniciaron con eventos intensos, alcanzando 500 ml en dos días consecutivos. Noviembre presentó una distribución irregular, con varios días de alta precipitación (hasta 500 ml) y otros con valores más bajos (100 a 120 ml). En diciembre, las precipitaciones fueron moderadas y constantes, con 300 ml registrados en dos fechas. Enero mostró una marcada variabilidad, con el valor más bajo del periodo (50 ml) y también eventos más significativos, como los 400 ml del 23 de enero. Los meses con mayor intensidad de lluvias fueron febrero y marzo, alcanzando el pico máximo de 700 ml

el 28 de febrero y 1 de marzo, respectivamente. Finalmente, hacia mediados de marzo las lluvias disminuyeron, registrándose 100 ml como el valor más bajo del mes.

Durante el periodo de monitoreo comprendido entre finales de octubre y mediados de marzo, se registró un total acumulado de 6.220 ml de precipitación. El comportamiento de las lluvias fue altamente irregular, con eventos de alta intensidad concentrados en fechas específicas, especialmente en noviembre, febrero y marzo, donde se superaron los 700 ml en un solo día.

FAO (2013) enfatiza que, para una gestión eficiente del recurso hídrico, es fundamental considerar la lluvia efectiva como parte de la oferta total de agua disponible para el cultivo. En este sentido, los resultados obtenidos demuestran la necesidad de ajustar la frecuencia de riego en función de los patrones de precipitación, a fin de evitar tanto deficiencias como excesos de humedad.

Esta distribución no uniforme revela una tendencia hacia la variabilidad climática, característica del contexto de cambio climático, donde se alternan periodos de lluvias extremas con lapsos de baja precipitación, lo cual influyó directamente en el desarrollo de papa, cebolla, haba y centeno, generando en algunos casos exceso de humedad y en otro estrés hídrico que condicionaron su crecimiento y rendimiento.

4.2. Variables de respuesta agronómica de cebolla (*Allium cepa*)

Se tomó en cuenta las siguientes variables: porcentaje de prendimiento altura de planta, diámetro de bulbo, peso de bulbo y rendimiento.

4.2.1. Porcentaje de prendimiento de cebolla (%)

El porcentaje de prendimiento de los plantines de cebolla fue del 90,1%, lo que refleja un alto nivel de éxito en el establecimiento de las plántulas tras el trasplante. Este resultado sugiere que las condiciones iniciales de siembra y el manejo, especialmente el riego constante durante los primeros días, fueron adecuadas para favorecer el prendimiento. Cabe destacar que, durante esta etapa, la frecuencia de riego fue uniforme para todos los tratamientos, por lo que los diferentes intervalos de riego establecidos en los tratamientos no influyeron en esta variable.

4.2.2. Altura de planta de cebolla bajo tres frecuencias de riego

Durante el ciclo fenológico del cultivo de cebolla, se evaluó el comportamiento en altura de planta bajo tres frecuencias de riego: cada 5 días, cada 10 días y cada 15 días. Se evidenció un crecimiento diferenciado en función del tratamiento aplicado en camas biointensiva (Figura 13).

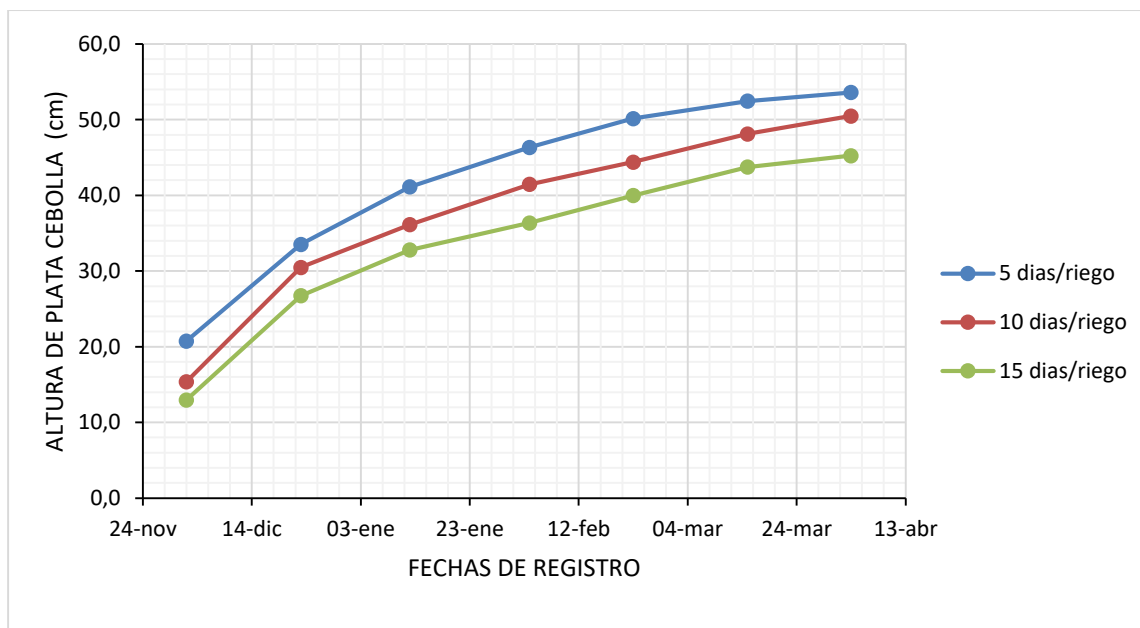


Figura 14. Altura de planta cebolla (*Allium cepa*) bajo tres frecuencias de riego

De acuerdo con la figura 14, se observa que el tratamiento de riego cada 5 días presentó un crecimiento constante, alcanzando un máximo de 53.4 cm, en el tratamiento de riego cada 10 días mostró un desarrollo progresivo con una altura máxima de 50.2 cm, mientras que el tratamiento de riego cada 15 días, a pesar de iniciar con menor altura, alcanzó el valor final del ciclo 46.5 cm.

4.2.3. Altura de la planta de cebolla (cm)

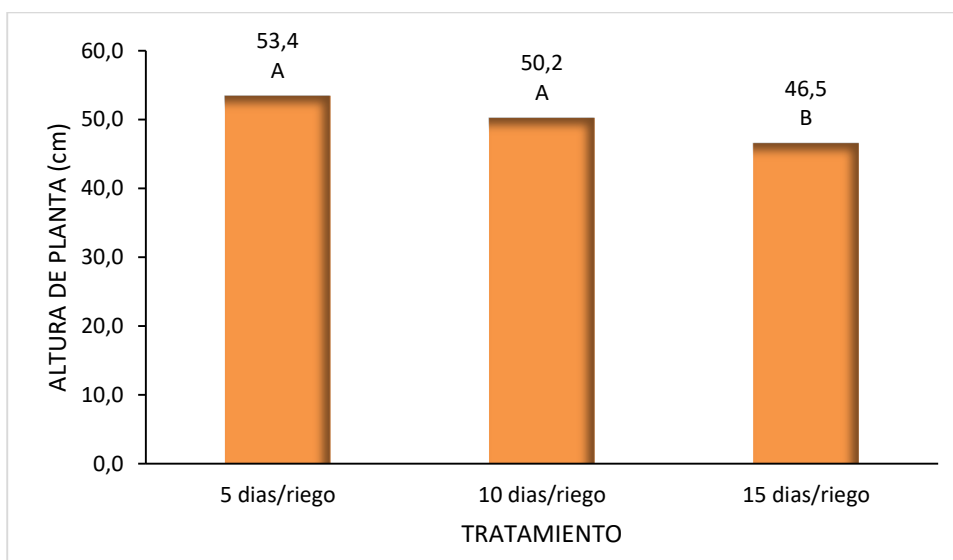
En el Cuadro 1 se observa el análisis de varianza para la variable altura de planta de cebolla, mostró que existe diferencias significativas ($p = 0,0162$), entre los tratamientos en el que se realizó el estudio, para obtener la variable de respuesta de altura de planta. Además, el coeficiente de variación fue de 4,01%, lo que refleja un adecuado control experimental y confiabilidad en los datos obtenidos.

Cuadro 1. Análisis de varianza de altura de planta de cebolla (cm)

F.V.	SC	GL	CM	F	p-valor
Días de riego	71,54	2	35,77	8,85	0,0162 *
Error	24,24	6	4,04		
Total	95,78	8			

* $p < 0,05$

La prueba de comparación de medias de Duncan (Figura 15) mostró la formación de dos grupos significativamente diferentes en la altura de planta de cebolla. El primer grupo estuvo representado por los tratamientos con riego cada 5 y 10 días, que registraron las mayores alturas promedio, evidenciando que una mayor estabilidad en la humedad del suelo favoreció el crecimiento vegetativo en el sistema biointensivo. En contraste, el tratamiento con riego cada 15 días se ubicó en el segundo grupo, con la menor altura, debido a que los intervalos prolongados de riego generaron períodos de déficit hídrico que limitaron la elongación celular y redujeron el desarrollo vegetativo. Estos resultados confirman que, aun cuando las camas fueron preparadas con doble excavación e incorporaron guano para mejorar la fertilidad y estructura del suelo, la frecuencia de riego sigue siendo un factor determinante para el crecimiento de la cebolla en condiciones biointensivas.

**Figura 15. Prueba de Duncan altura de planta de cebolla (cm)**

Este resultado coincide con la investigación de Gonzales *et al.* (2022), quienes demostraron que los sistemas biointensivos, mediante la preparación de camas elevadas, incorporación

de materia orgánica y manejo eficiente del riego, incrementan significativamente la altura y vigor de las hortalizas en comparación con sistemas tradicionales. En este sentido, la interacción entre la frecuencia de riego y la capacidad de retención de humedad de las camas biointensivas constituye un factor determinante para optimizar la absorción de agua y nutrientes, promoviendo un crecimiento uniforme y saludable de las plantas.

El tratamiento cada riego cada 15 días, generó condiciones de estrés hídrico, evidenciadas en una menor altura de planta. Estos resultados coincide con Estrada *et al.* (2015), quienes observaron que la disminución de la humedad en el suelo afectó negativamente el crecimiento vegetativo y el tamaño de los bulbos de cebolla, confirmando que el déficit hídrico compromete el desarrollo de la planta en su conjunto. Sin embargo, es importante señalar que dicho estudio no fue realizado en un sistema biointensivo, lo cual marca una diferencia relevante. En el presente trabajo, pese a que las camas biointensivas mejoran la retención de humedad y la aireación del suelo, el riego cada 15 días no fue suficiente para evitar el estrés hídrico.

4.2.4. Diámetro de bulbo de cebolla (cm)

Según el análisis de varianza presentado en el Cuadro 2, se encontró una diferencia altamente significativa ($p < 0,0001$) entre los tratamientos, lo que demuestra que el método biointensivo tuvo un efecto notable sobre el diámetro del bulbo de cebolla. Además, el coeficiente de variación fue de 2,94%, lo que confirma que los datos obtenidos son consistentes y confiables para este estudio.

Cuadro 2. Análisis de varianza para diámetro de bulbo de cebolla (cm)

F.V.	SC	GL	CM	F	p-valor
Días de riego	4,05	2	2,02	97,55	<0,0001 **
Error	0,12	6	0,02		
Total	4,17	8			

** $p < 0,01$

En la (Figura 16), la prueba de comparación de medias de Duncan, evidenció la formación de tres grupos significativamente diferentes en el diámetro de bulbo de cebolla. El tratamiento con riego cada 5 días se ubicó en el grupo superior, alcanzando el mayor diámetro, lo que refleja que una mayor frecuencia de riego mantuvo condiciones de

humedad estables que favorecieron el llenado y expansión del bulbo. El tratamiento con riego cada 10 días conformó un grupo intermedio, con un diámetro moderado, producto de un suministro hídrico menos constante pero aún suficiente para sostener el desarrollo del cultivo. En contraste, el riego cada 15 días se clasificó en el grupo inferior, con el menor diámetro, ya que los periodos de déficit hídrico redujeron la turgencia celular y limitaron el crecimiento del bulbo. Estos resultados demuestran que, aun bajo un manejo biointensivo con camas de doble excavación y aplicación de guano, la frecuencia de riego es determinante para la formación y calidad del bulbo de cebolla.

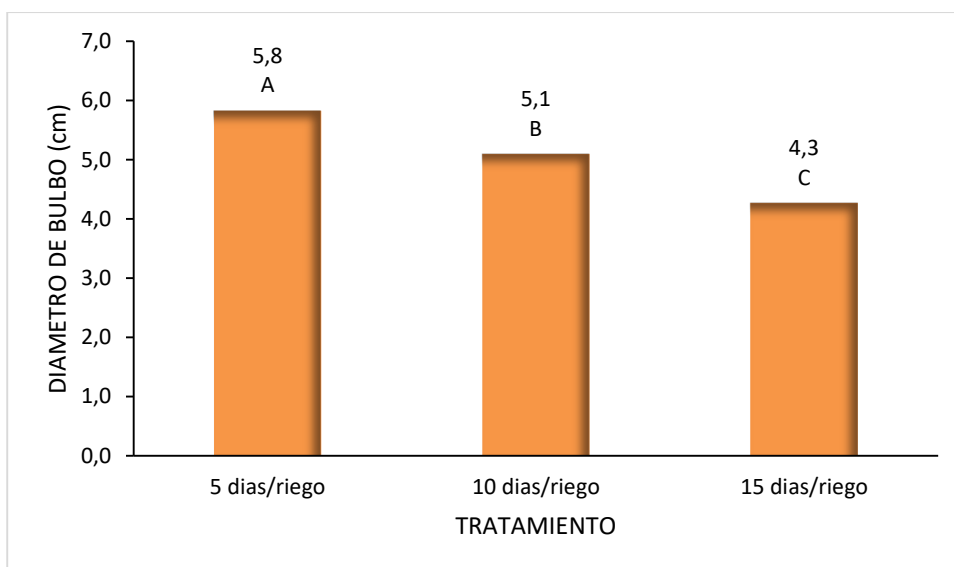


Figura 16. Prueba de Duncan diámetro de bulbo de cebolla (cm)

Según la investigación realizada por Gonzales *et al.* (2022), la producción en sistemas biointensivos, con camas elevadas y materia orgánica, permitió alcanzar diámetros de bulbo superiores 6,4 cm frente a los sistemas tradicionales 4,3 cm. Este comportamiento resalta que la combinación de prácticas de manejo de suelo y frecuencia de riego adecuada favorece significativamente el crecimiento y desarrollo de los bulbos, evidenciando que los sistemas biointensivos maximizan el potencial productivo de la cebolla.

Por otro lado, estos resultados también encuentran respaldo en Estrada *et al.* (2015), quienes señalaron que la disminución de la humedad del suelo afecta de forma negativa tanto el crecimiento vegetativo como el tamaño de bulbos de cebolla. No obstante, cabe destacar que dicho estudio no se desarrolló en sistemas biointensivos, lo que refuerza la importancia de este tipo de manejo, ya que aun cuando el riego fue espaciado a 15 días,

las camas biointensivas mostraron cierta capacidad de amortiguación frente al déficit hídrico, aunque insuficiente para evitar la reducción en el diámetro del bulbo.

4.2.5. Peso de planta de cebolla (g)

Según los resultados presentados en el Cuadro 3, se observaron diferencias altamente significativas ($p < 0,0001$) en el peso de planta de cebolla entre los tratamientos, evidenciando que el manejo bajo camas biointensivas influyó directamente en la acumulación de biomasa vegetal. El coeficiente de variación fue de 5,06%, lo que demuestra que los datos obtenidos son consistentes y confiables para este estudio.

Cuadro 3. Análisis de varianza del peso de planta de cebolla (g)

F.V.	SC	GL	CM	F	p-valor
Días de riego	6583,71	2	3291,85	94,93	<0,0001**
Error	208,05	6	34,68		
Total	6791,76	8			

** $p < 0,01$

Por su parte la prueba de comparación de medias de Duncan en la (Figura 17), evidenció diferencias significativas en el peso de planta de cebolla, conformando tres grupos significativamente diferentes. El tratamiento con riego cada 5 días se ubicó en el grupo superior, alcanzando el mayor peso, lo que se asoció a un follaje verde y vigoroso acompañado de bulbos con buen diámetro. El tratamiento con riego cada 10 días conformó el grupo intermedio, donde los bulbos se desarrollaron adecuadamente, pero las hojas mostraron signos de senescencia, indicando el inicio de la fase de maduración y, por tanto, un peso ligeramente menor al del primer grupo. Finalmente, el riego cada 15 días se situó en el grupo inferior, evidenciando síntomas de estrés hídrico que redujeron la altura de planta y limitaron la acumulación de biomasa, lo que resultó en un menor diámetro de bulbo y menor peso total de planta. Estos resultados confirman que la frecuencia de riego tiene un efecto determinante en la productividad de la cebolla dentro del sistema biointensivo.

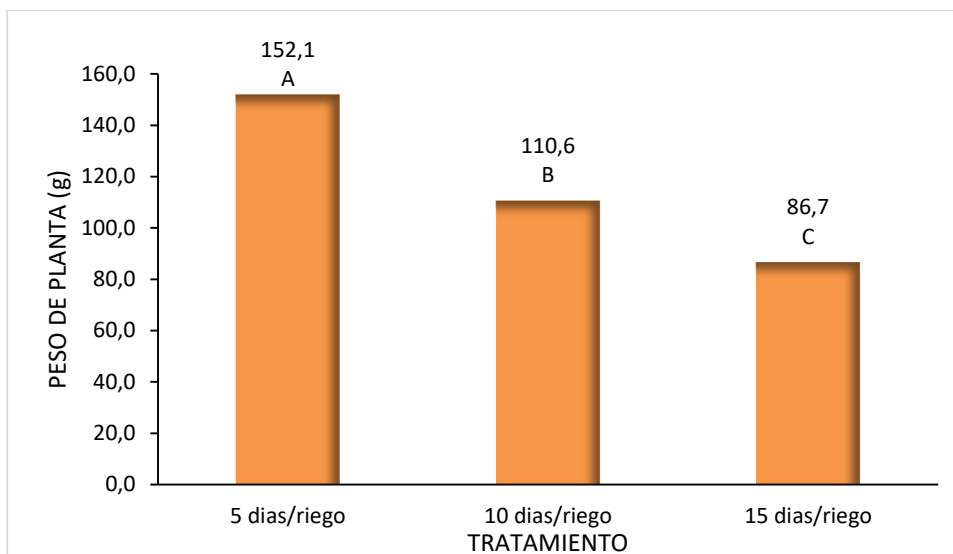


Figura 17. Prueba de Duncan de peso de planta de cebolla (g)

Gonzales *et al.* (2022), señala que en el sistema biointensivo alcanzó un peso promedio de planta de 157 g, valor considerablemente superior al registrado en el sistema tradicional 63g. De igual forma, reporta que el diámetro de bulbo y el rendimiento total también fueron mayores en el sistema biointensivo, lo que confirma que las prácticas de preparación del suelo, el aporte de materia orgánica y la asociación de cultivos en camas biointensivas contribuyen a un mejor desempeño agronómico en cebolla en comparación con el sistema convencional.

El comportamiento observado en los tratamientos con riego cada 10 y 15 días mostró una reducción en el peso de planta, aunque por diferentes mecanismos fisiológicos. En el tratamiento con riego cada 10 días, las plantas alcanzaron bulbos bien desarrollados, pero presentaron senescencia anticipada del follaje. Por su parte, el tratamiento con riego cada 15 días evidenció síntomas más severos de estrés hídrico, como menor altura de planta, reducción de biomasa.

Estos resultados concuerdan con lo reportado por Estrada *et al.* (2015), quienes demostraron que la disminución de la humedad en el suelo afecta negativamente tanto el crecimiento vegetativo como el tamaño de los bulbos de cebolla. Si bien en el presente estudio las camas biointensivas mitigaron parcialmente los efectos del déficit hídrico gracias a su capacidad de retención de humedad, se confirma que un suministro insuficiente de

agua limita el desarrollo del cultivo y compromete la productividad en condiciones de estrés hídrico.

4.2.6. Rendimiento de cebolla (t/ha)

En el Cuadro 4, correspondiente al análisis de varianza para el rendimiento de cebolla, se evidenciaron diferencias altamente significativas ($p < 0,00078$) entre los tratamientos, lo que confirma que la aplicación del método de sistema de producción biointensivo influyó de manera significativa en el rendimiento de cebolla. El coeficiente de variación fue de 6,55 % indica una baja dispersión de los datos, reflejando precisión y confiabilidad en los datos obtenidos.

Cuadro 4. Análisis de varianza del rendimiento de cebolla (t/ha)

F.V.	SC	GL	CM	F	p-valor
Días de riego	39,34	2	19,67	31,05	0,00078
Error	3,8	6	0,63		
Total	43,14	8			

** $p < 0,01$

De acuerdo con los resultados de la prueba de comparación de medias de Duncan (Figura 18), el rendimiento del cultivo de cebolla se organizó en tres grupos significativamente diferentes. El primer grupo, correspondiente al riego cada 5 días, alcanzó el mayor rendimiento. El segundo grupo, con riego cada 10 días, presentó un rendimiento intermedio, reflejando una limitación moderada de agua que, aunque permitió completar el ciclo del cultivo, redujo ligeramente la eficiencia en la formación de bulbos y biomasa. Finalmente, el riego cada 15 días conformó el tercer grupo, con el menor rendimiento, debido a periodos prolongados de déficit hídrico que afectaron la elongación y expansión de las plantas, disminuyendo tanto el peso de bulbos como la acumulación total de biomasa. Estos resultados evidencian que, aun bajo un manejo biointensivo con suelo mejorado y fertilización orgánica, la frecuencia de riego es un factor determinante para maximizar el rendimiento del cultivo.

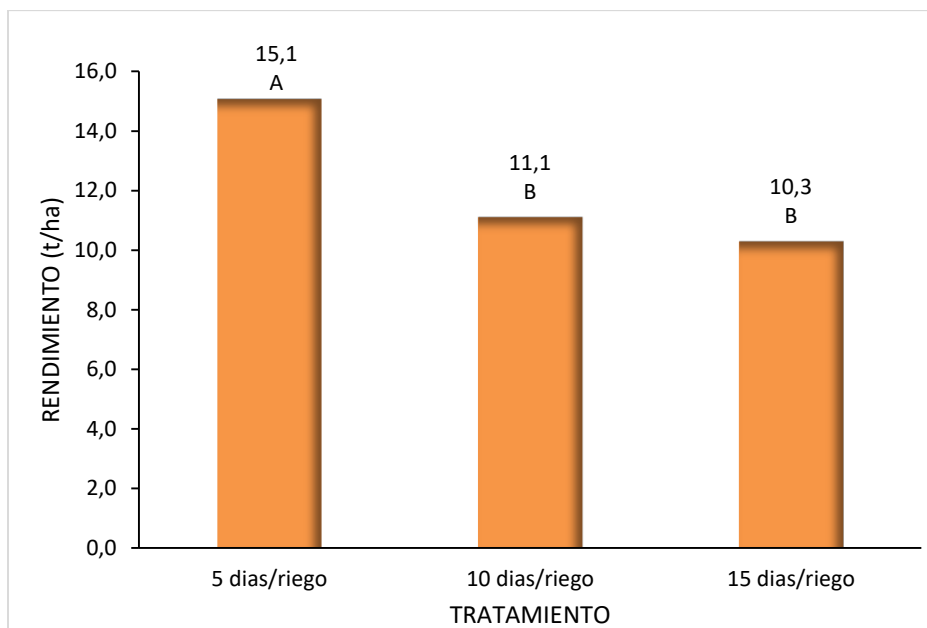


Figura 18. Prueba de Duncan de rendimiento de cebolla (t/ha)

Los resultados obtenidos en los tratamientos riego cada 5 días y riego cada 10 días evidencian que el sistema biointensivo permitió mantener un adecuado desarrollo vegetativo y un buen tamaño de bulbo en cebolla, lo cual concuerda con lo reportado por Gonzales *et al.* (2022). Dichos autores encontraron que, bajo manejo biointensivo, el peso de planta de cebolla alcanzó valores altos, significativamente superiores a los registrados en el sistema tradicional lo que repercutió en un rendimiento.

El tratamiento 3, con riego cada 15 días, generó condiciones de estrés hídrico en el cultivo de cebolla, evidenciadas en una menor altura de planta, reducción del peso de planta y diámetro de bulbo, conformando el tercer grupo significativamente diferente. Estos resultados coinciden con lo reportado por Estrada *et al.* (2015), quienes demostraron que déficits de humedad en el suelo reducen significativamente parámetros morfológicos como peso y tamaño de bulbos, limitando el crecimiento vegetativo general de la planta.

Comparando estos valores con los datos nacionales reportados por el OAP (2021) del Ministerio de Desarrollo Rural y Tierras (2019), se observa que el rendimiento promedio nacional de cebolla fue de 15,56 t/ha. En este contexto, el tratamiento con riego cada 5 días mantiene el rendimiento nacional promedio, mientras que el tratamiento con riego cada 10 días se mantiene por debajo.

4.2.7. Regresión lineal del rendimiento de cebolla (t/ha) en función de la frecuencia de riego en el sistema biointensivo asociado.

Se realizó una regresión para evaluar la relación entre la frecuencia de riego y el rendimiento del cultivo de cebolla. Este análisis permitió identificar la tendencia de respuesta del cultivo frente a las diferentes láminas de agua aplicadas en los tratamientos.

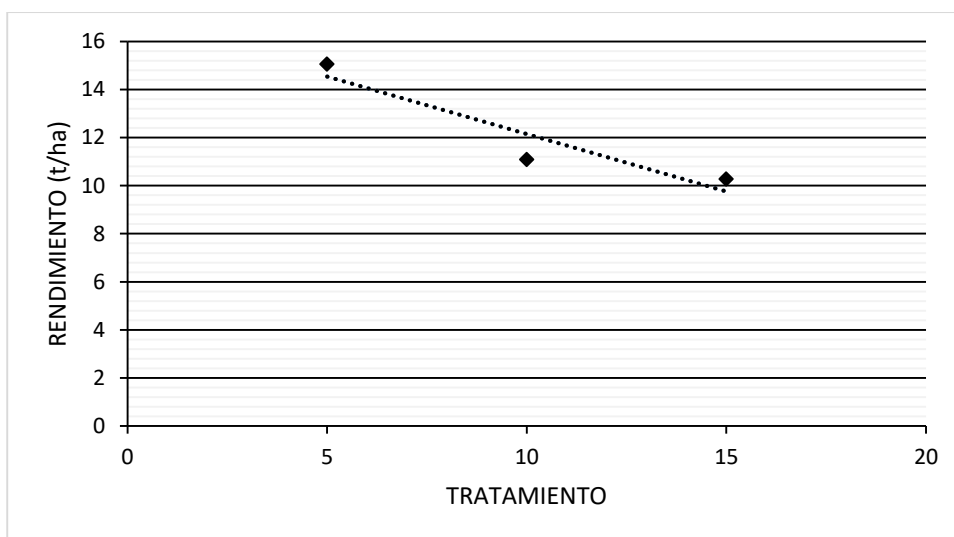


Figura 19. Regresión entre frecuencia de riego y rendimiento (t/ha) en cebolla

La figura 19 muestra la relación entre la frecuencia de riego y el rendimiento promedio de los cultivos dentro del sistema biointensivo ($r = 0.8728$). Esto señala que, conforme se extiende el tiempo entre riegos, la producción disminuye notablemente. El coeficiente de determinación ($R^2 = 0.76$), que se calcula al elevar r^2 (0.8728^2), indica que el 76 % de la variabilidad en el rendimiento puede explicarse directamente por la frecuencia de riego utilizada, mientras que el 24 % restante podría deberse a otros elementos.

El tratamiento con riego cada 5 días presentó los valores más altos superiores a 15 t/ha, en contraste, el tratamiento con riego cada 15 días fue el rendimiento más bajo a 10 t/ha, reflejando el efecto negativo. El tratamiento intermedio, con riego cada 10 días, mostró rendimientos moderados, ubicándose entre los dos extremos la regresión confirma que una menor frecuencia de riego está asociada a una pérdida progresiva de rendimiento.

Los resultados de la regresión reflejan que, a mayor intervalo de riego, menor es el rendimiento de los cultivos biointensivos asociados. Este comportamiento coincide con lo señalado por Sifuentes *et al.* (2020), quienes mencionan que el estrés hídrico reduce

significativamente la formación de biomasa y, por ende, la acumulación de rendimiento de cultivos sensibles a la disponibilidad de agua.

4.3. Variables de respuesta agronómica de haba (*Vicia faba*)

Se tomó en cuenta las siguientes variables: porcentaje de germinación, altura de planta, longitud de vaina, peso de vainas por planta y rendimiento.

4.3.1. Porcentaje de germinación de haba (%)

El porcentaje de germinación no estuvo influenciado por los tratamientos de riego, ya que la aplicación de riego fue constante y homogénea para todos los tratamientos hasta que se completó la germinación con un 85,7% de germinación.

4.3.2. Crecimiento en altura de planta de haba a lo largo del ciclo del cultivo

Durante el ciclo fenológico del cultivo de haba, se evaluó el comportamiento en altura de planta bajo tres frecuencias de riego: cada 5 días, cada 10 días y cada 15 días. Se evidenció un crecimiento diferenciado en función del tratamiento aplicado, lo que refleja que, dentro de un sistema de producción biointensivo, la frecuencia de riego interactúa con la capacidad de retención hídrica y con las propiedades mejoradas del suelo para favorecer un desarrollo vegetativo más vigoroso y sostenido (Figura 20).

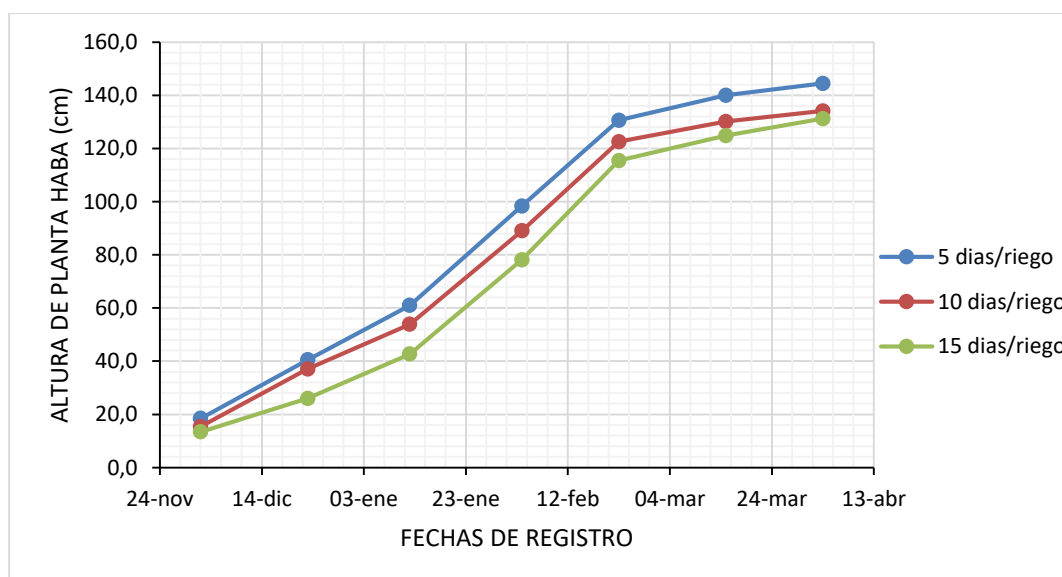


Figura 20. Altura de planta de haba (*Vicia faba*) bajo tres frecuencias de riego

El cultivo de haba mostró un crecimiento significativo en respuesta a la frecuencia de riego en camas biointensivas. El tratamiento de riego cada 5 días, evidenció el mayor desarrollo, alcanzando una altura final de 144.5 cm, lo que indica un crecimiento vigoroso y sostenido durante todo el ciclo. El tratamiento riego cada 10 días, también presentó un buen comportamiento, con una altura máxima de 134.1 cm, aunque con menor intensidad. En cambio, riego cada 15 días registró la menor altura final 131.2 cm, con un desarrollo más lento en las primeras etapas del cultivo.

4.3.3. Altura de la planta de haba (cm)

Según los resultados del análisis de varianza presentados en el Cuadro 5, se observaron diferencias altamente significativas ($p = 0,0003$) entre los tratamientos, evidenciando que la frecuencia de aplicación de agua tuvo un efecto determinante sobre el crecimiento en altura del cultivo de haba dentro del sistema de producción biointensiva asociada. El coeficiente de variación fue de 1,38% indica una baja variabilidad permitió obtener resultados consistentes y confiables.

Cuadro 5. Análisis de varianza de altura de planta de haba (cm)

F.V.	SC	GL	CM	F	p-valor
Días de riego	291,88	2	145,94	40,91	0,0003 **
Error	21,41	6	3,57		
Total	313,29	8			

** $p < 0,01$

De acuerdo con la (Figura 21), la prueba de comparación de medias de Duncan evidenció la formación de dos grupos significativamente diferentes en cuanto a la altura promedio de planta de haba. El tratamiento con riego cada 5 días conformó el primer grupo, registrando la mayor altura, lo que demuestra que en un sistema biointensivo asociado la disponibilidad continua de agua es un factor clave para potenciar el desarrollo vegetativo. En contraste, los tratamientos con riego cada 10 y 15 días conformaron un segundo grupo con alturas significativamente menores, reflejando los efectos del déficit hídrico sobre el crecimiento de haba, cultivo que depende de un suministro regular de agua durante sus primeras etapas de desarrollo.

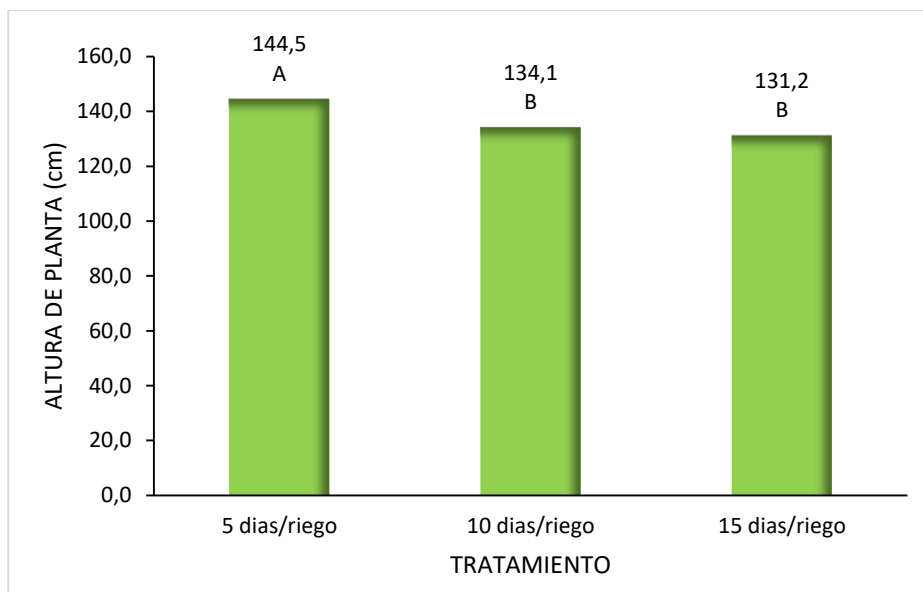


Figura 21. Prueba de Duncan de altura de planta de haba (cm)

Los resultados obtenidos evidencian que, incluso en un sistema biointensivo asociado donde la interacción entre cultivos contribuye a mejorar el microclima y la eficiencia en el uso de recursos la frecuencia de riego sigue siendo un factor decisivo para el desarrollo óptimo del cultivo de haba.

Estos hallazgos se relacionan con lo reportado por Machaca (2022), quien en un sistema de siembra convencional observó alturas promedio menores a 130 cm. En contraste, en el presente ensayo, bajo condiciones de camas biointensivas y con riegos más frecuentes, las plantas alcanzaron entre 134,1 cm y 144,5 cm de altura. Esta diferencia se explica por la mejora de las propiedades físicas y biológicas del suelo a través de la incorporación de materia orgánica y el manejo de camas elevadas, prácticas clave del sistema biointensivo que favorecen un crecimiento vegetativo más vigoroso y sostenido.

Además, la investigación de Ammar *et al.* (2015), destaca que los cultivos fijadores de nitrógeno, como el haba, responden positivamente a la disponibilidad de agua y a suelos bien aireados, incrementando la altura de planta y la biomasa total. Esto respalda que, dentro de un sistema biointensivo, el manejo del suelo y la frecuencia de riego interactúan para optimizar el crecimiento vegetativo y la eficiencia productiva de los cultivos aportantes de nutrientes al suelo.

4.3.4. Longitud de vainas por planta de haba (cm)

El análisis de varianza Cuadro 6 mostró un efecto altamente significativo ($p = 0,0011$) de las frecuencias de riego sobre la longitud de vaina en el sistema biointensivo de haba. Este resultado indica que la estrategia de manejo hídrico dentro del método biointensivo influyó en el cultivo de haba. Asimismo, el coeficiente de variación 2,23 % evidencia la confiabilidad de los datos y la precisión experimental alcanzada.

Cuadro 6. Análisis de varianza para longitud de vainas por planta de haba (cm)

F.V.	SC	GL	CM	F	p-valor
Días de riego	3,5	2	1,75	27,27	0,0011 **
Error	0,39	6	0,06		
Total	3,89	8			

** $p < 0,01$

De acuerdo con la Figura 22, la prueba de comparación de medias de Duncan mostró la formación de dos grupos significativamente diferentes en cuanto a la longitud de vaina del cultivo de haba dentro del sistema de producción biointensivo. El primer grupo estuvo conformado por el tratamiento con riego cada 5 días, que alcanzó la mayor longitud de vaina, evidenciando que un suministro hídrico adecuado favorece el llenado de vainas y la expresión del potencial productivo del cultivo. En contraste, los tratamientos con riego cada 10 y 15 días conformaron un segundo grupo, reflejando los efectos del estrés hídrico sobre el desarrollo reproductivo de la planta.

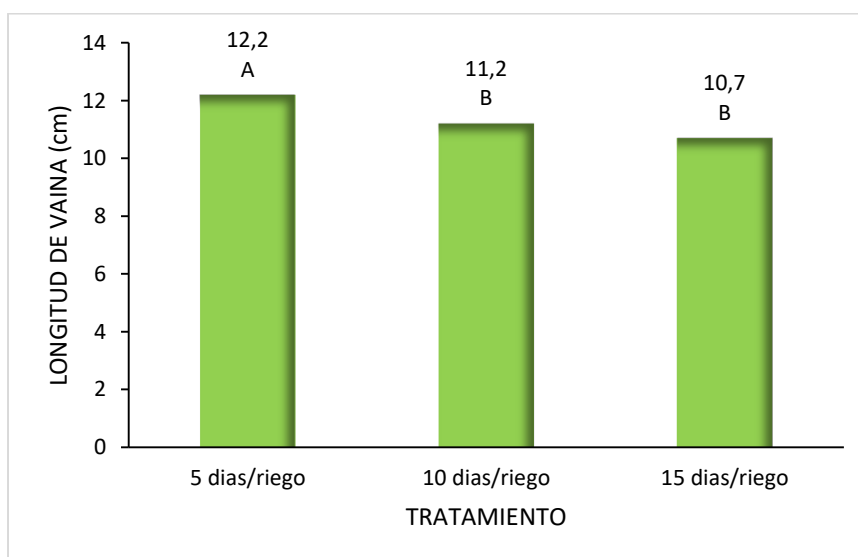


Figura 22. Prueba de Duncan longitud de vainas por planta de haba (cm)

Estos resultados sugieren que, aun cuando el sistema biointensivo mejora la fertilidad y estructura del suelo mediante la doble excavación y el aporte de materia orgánica, la frecuencia del riego sigue siendo determinante para la formación y llenado de vainas en el cultivo de haba. La menor disponibilidad de agua en los tratamientos con riegos más espaciados redujo la hidratación y firmeza de los tejidos de la planta, además de limitar el traslado de los nutrientes producidos en las hojas hacia las vainas. Esto ocasionó que las vainas fueran más cortas y, en consecuencia, disminuyera el potencial productivo

De manera diferente, en el estudio realizado por Machaca (2022), el haba cultivada en condiciones convencionales, se obtuvo una longitud de vaina promedio de 10,4 cm. En comparación, los resultados de la presente investigación muestran que, bajo el sistema biointensivo asociado y sometido a diferentes frecuencias de riego, la longitud de vaina alcanzó valores superiores.

Lo que evidencia que el manejo ecológico y la diversificación de cultivos en camas biointensivas no solo optimizan el uso del agua, sino que también promueven un crecimiento más favorable del haba. Estos hallazgos sugieren que el sistema biointensivo es una opción más eficaz que el método convencional, particularmente en condiciones donde la disponibilidad de agua es restringida

4.3.5. Peso de vainas verde por planta de haba (g)

Según el análisis de varianza presentado en el Cuadro 7, se evidenciaron diferencias altamente significativas ($p < 0,0001$) entre los tratamientos, indicando que el método biointensivo tuvo un efecto notable sobre el peso de vaina por planta. El coeficiente de variación fue de 1,21 %, lo que indica una alta confiabilidad y precisión en los datos experimentales.

Cuadro 7. Peso de vainas verde por planta (g)

F.V.	SC	GL	CM	F	p-valor
Días de riego	187102,83	2	93551,41	2057,78	<0,0001 **
Error	272,77	6	45,46		
Total	187375,6	8			

** $p < 0,01$

La prueba de comparación de medias de Duncan (Figura 23) mostró la formación de tres grupos estadísticamente diferentes en la variable de peso de vainas verdes por planta. El primer grupo, correspondiente al riego cada 5 días, con el mayor peso, reflejando que la disponibilidad continua de agua favoreció el llenado y desarrollo óptimo de las vainas en el sistema biointensivo asociado. El segundo grupo, con riego cada 10 días, mostrando una reducción moderada frente al primer grupo, lo que indica que una frecuencia de riego ligeramente menor todavía permitió mantener una producción significativa. Finalmente, el tercer grupo, con riego cada 15 días, registró un peso promedio, evidenciando que la limitada disponibilidad de agua afectó drásticamente la acumulación de biomasa y redujo considerablemente el rendimiento.

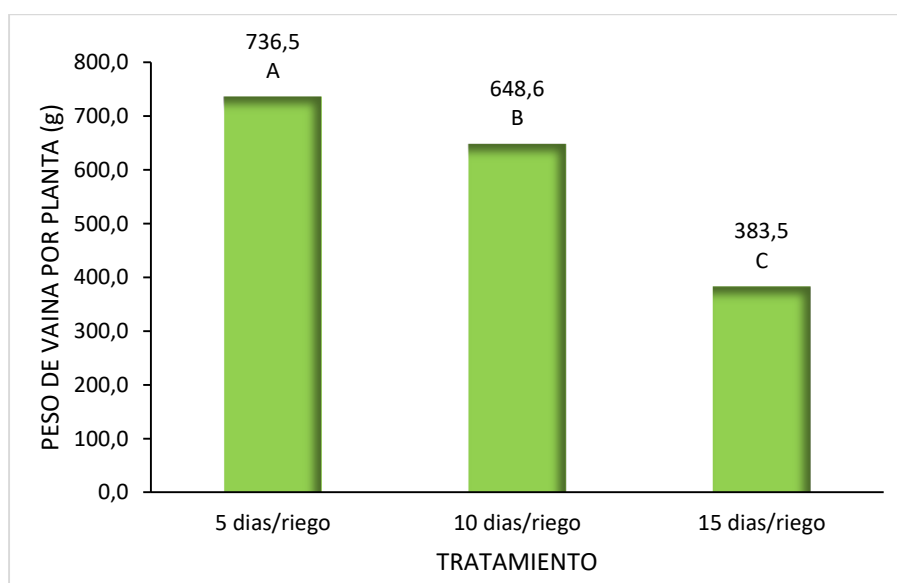


Figura 23. Prueba de Duncan de peso de vainas verdes por planta de haba (g)

Estos resultados demuestran que, incluso bajo un sistema biointensivo que mejora la fertilidad y estructura del suelo, la frecuencia de riego es determinante para maximizar la productividad del haba, siendo los tratamientos con riego frecuente los que mejor expresan el potencial del cultivo.

Al contrastar este resultado con investigaciones en el sistema convencional, Machaca (2022) reportó que en el tratamiento sin aplicación de bioinsumos, únicamente bajo riego, se alcanzó un promedio de 28,67 vainas por planta, lo que refleja una producción limitada en comparación con sistemas mejorados. Aunque las variables no coinciden exactamente (número de vainas vs. peso de vainas), la tendencia es clara, en el sistema tradicional la

producción de haba se ve restringida, mientras que en el sistema biointensivo, con una adecuada frecuencia de riego, se logran mayores valores de peso de vaina por planta.

Este comportamiento coincide con los hallazgos de Ammar *et al.* (2015), quienes señalaron que el déficit hídrico afecta negativamente la producción de vainas, su número y peso. El estrés hídrico prolongado, como el observado en el tratamiento de riego cada 15 días, puede provocar una reducción en el tamaño de las vainas y una menor acumulación de materia seca, traduciéndose en un menor peso total por planta.

4.3.6. Rendimiento en vaina verde de haba (t/ha)

El análisis de varianza presentado en el Cuadro 8 mostró diferencias altamente significativas ($p = 0,0002$) en el rendimiento del cultivo de haba según la frecuencia de riego en el sistema de producción biointensivo, lo que evidencia que esta variable influyó de manera determinante en la productividad. El coeficiente de varianza encontrado fue de 6,07%, lo que significa que el trabajo fue manejado de manera adecuada.

Cuadro 8. Rendimiento en vaina verde de haba (t/ha)

F.V.	SC	GL	CM	F	p-valor
Días de riego	60,7	2	30,35	45,26	0,0002**
Error	4,02	6	0,67		
Total	64,72	8			

** $p < 0,01$

Según la prueba de comparación de medias de Duncan (Figura 24), se formaron tres grupos significativamente diferentes en el rendimiento del cultivo de haba. El primer grupo, correspondiente al riego cada 5 días, alcanzó un rendimiento mayor, reflejando la eficacia del suministro hídrico frecuente para favorecer la acumulación de biomasa y la formación óptima de vainas en el sistema biointensivo asociado. El segundo grupo, con riego cada 10 días, presentó un rendimiento intermedio, mostrando una ligera reducción frente al primer grupo, pero aun manteniendo valores productivos relativamente altos. Finalmente, el tercer grupo, con riego cada 15 días, registró el menor rendimiento. Estos resultados destacan que el manejo biointensivo, al optimizar la utilización de recursos y mejorar la fertilidad del suelo, permite obtener rendimientos superiores, pero la frecuencia de riego sigue siendo un factor determinante para maximizar la producción de haba.

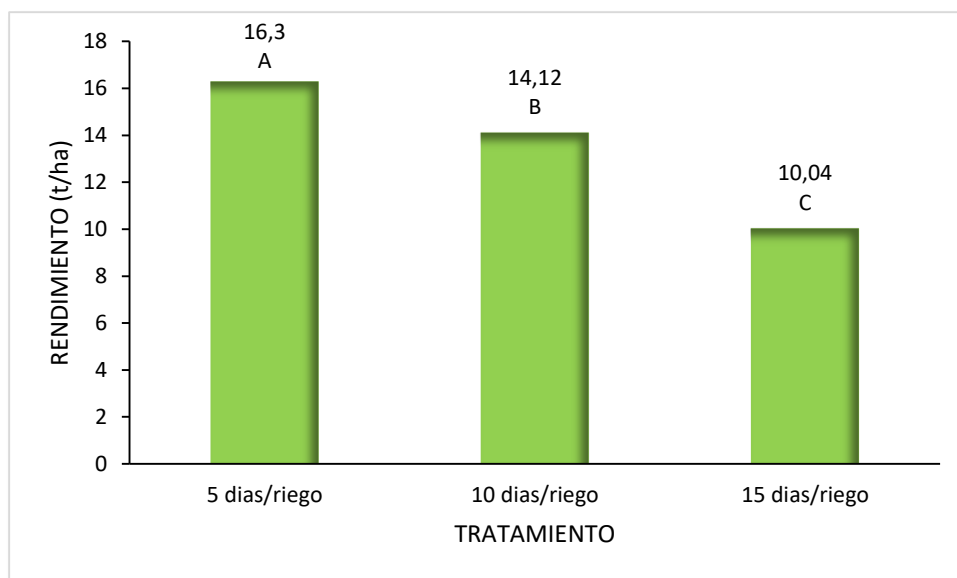


Figura 24. Rendimiento en vaina verde de haba (t/ha)

Machaca (2022) encontró que en condiciones tradicionales de siembra únicamente bajo riego básico, los rendimientos de haba fueron menores. Por su parte, PROINPA (2019) señala que la productividad del haba en el Altiplano bajo prácticas tradicionales se ubica por debajo de su potencial, principalmente por limitaciones de agua y nutrientes.

Estos antecedentes refuerzan que el método biointensivo, con un manejo integrado del agua y de los recursos del suelo, permite alcanzar rendimientos superiores frente a los obtenidos en los sistemas tradicionales, donde la baja eficiencia del riego y la ausencia de prácticas complementarias reducen significativamente la productividad.

Al comparar estos resultados con el promedio nacional reportado por el OAP (2021), en Bolivia para el ciclo 2019, donde el rendimiento promedio de haba fue de 1,53 t/ha se observa que incluso el tratamiento de riego más espaciado (15 días) multiplicó más el rendimiento nacional. Este contraste evidencia el enorme potencial de incrementar la producción de haba mediante un manejo hídrico controlado y técnico, especialmente en sistemas biointensivos.

4.3.7. Regresión lineal del rendimiento de haba (t/ha) en función de la frecuencia de riego en el sistema biointensivo asociado

Se realizó la regresión para evaluar la relación entre la frecuencia de riego y el rendimiento del cultivo de haba. Este análisis permite identificar la tendencia de respuesta del cultivo frente a diferentes láminas de agua aplicadas en los tratamientos.

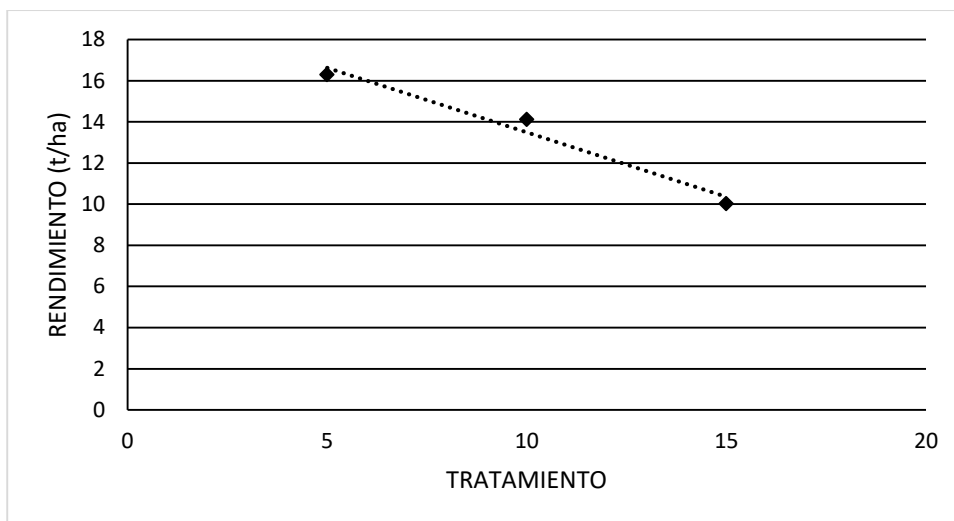


Figura 25. Regresión entre frecuencia de riego y rendimiento (t/ha) en haba

Los resultados de la regresión del cultivo de haba (Figura 25) muestran que el rendimiento disminuye significativamente a medida que aumenta el intervalo entre riegos, con un coeficiente de correlación ($r = 0.9702$) que revela una relación negativa muy fuerte entre ambas variables. El coeficiente de determinación ($R^2 = 0.94$) indica que el 94 % de la variación del rendimiento puede explicarse directamente por la frecuencia de riego aplicada, mientras que solo un 6 % se atribuye a otros factores.

El mayor rendimiento obtenido con riego cada 5 días sugiere que la humedad constante favorece los procesos fisiológicos de la planta, especialmente en etapas críticas como la floración y el llenado de vainas, donde la falta de agua puede provocar reducción en el número de flores cuajadas y, en la producción final.

Estos resultados concuerdan con lo señalado por Martínez y Sandoval (2020), quienes destacan que en sistemas biointensivos asociados, cultivos como las leguminosas requieren un manejo hídrico oportuno para evitar la competencia radicular con otras especies, lo que puede limitar su rendimiento.

4.4. Variables de respuesta agronómica de papa (*Solanum tuberosum*)

Se tomó en cuenta las siguientes variables: porcentaje de germinación, altura de planta, diámetro de tubérculo, peso de tubérculo por planta y rendimiento

4.4.1. Porcentaje de germinación de papa (%)

El porcentaje de germinación de los tubérculos de papa fue del 96%, lo cual indica un excelente establecimiento inicial del cultivo. Este alto prendimiento se atribuye a las condiciones favorables de siembra y al riego uniforme aplicado durante la etapa inicial. La frecuencia de riego constante en esta fase permitió un desarrollo homogéneo, sin que los tratamientos de riego aplicados posteriormente influyeran en esta variable.

4.4.2. Crecimiento en altura de planta de papa a lo largo del ciclo del cultivo

Durante el ciclo fenológico del cultivo de papa, se evaluó el comportamiento en altura de planta bajo tres frecuencias de riego: cada 5 días, cada 10 días y cada 15 días. Se evidenció un crecimiento diferenciado en función del tratamiento aplicado, reflejando la influencia del régimen hídrico sobre el desarrollo vegetativo (Figura 26).

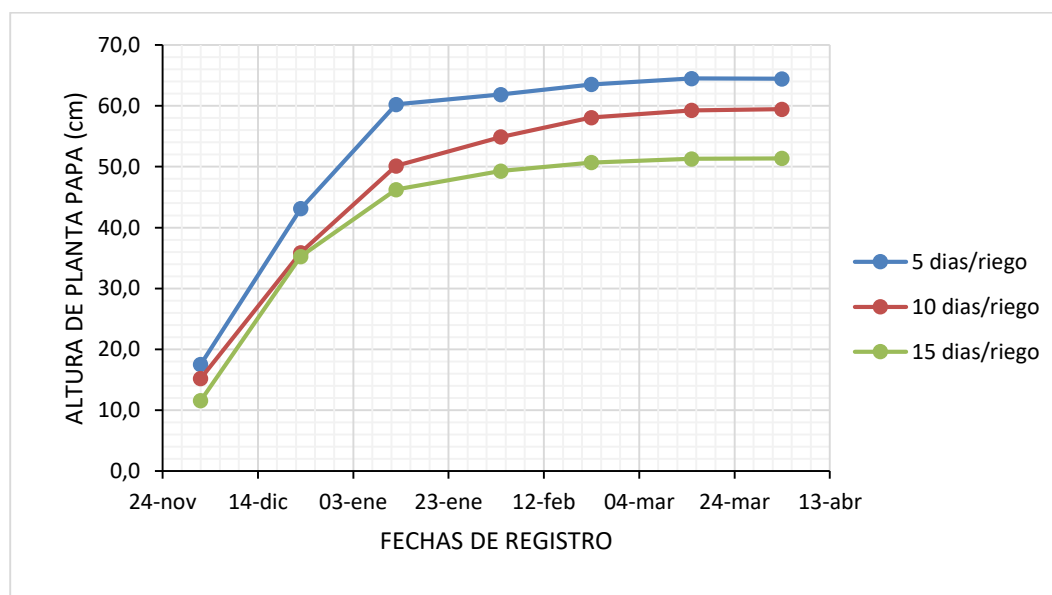


Figura 26. Altura de planta de papa (*Solanum tuberosum*) bajo tres frecuencias de riego

El crecimiento de la altura de la papa también fue sensible a la frecuencia de riego en camas biointensivas. El tratamiento de riego cada 5 días presentó el mayor desarrollo vegetativo, alcanzando 64.9 cm al final del ciclo en el tratamiento de riego cada 10 días mostró un crecimiento intermedio, con una altura final de 59.5 cm, mientras que el tratamiento de riego cada 15 días tuvo el menor crecimiento, alcanzando solo 51.4 cm.

4.4.3. Altura de la planta de papa (cm)

El análisis de varianza que se observa en el Cuadro 9 para la variable altura de planta de papa indica que existen diferencias altamente significativas ($p < 0,0001$) entre los tratamientos de riego, lo que evidencia que la frecuencia de riego tuvo un efecto significativo sobre el crecimiento de la planta dentro de un sistema de producción biointensiva. En cuanto al valor de coeficiente de varianza fue de 1,19%, lo que significa que el trabajo fue manejado de manera adecuada.

Cuadro 9. Análisis de varianza de altura de planta de papa (cm)

F.V.	SC	GL	CM	F	p-valor
Días de riego	260,93	2	130,47	268,6	<0,0001**
Error	2,91	6	0,49		
Total	263,85	8			

** $p < 0,01$

De acuerdo con la prueba de comparación de medias de Duncan (Figura 27), los tratamientos de riego dentro del sistema de producción biointensivo mostraron diferencias significativas en la altura promedio de las plantas de papa, conformando tres grupos estadísticamente diferentes. El tratamiento con riego cada 5 días alcanzó la mayor altura, el riego cada 10 días formó un grupo intermedio, mostrando que la planta tolera un intervalo moderado de riego, aunque el crecimiento se ve ligeramente limitado por la menor disponibilidad de agua. Finalmente, el riego cada 15 días registró la menor altura, evidenciando que la escasez de agua y la competencia por recursos afectan de manera significativa el vigor de las plantas.

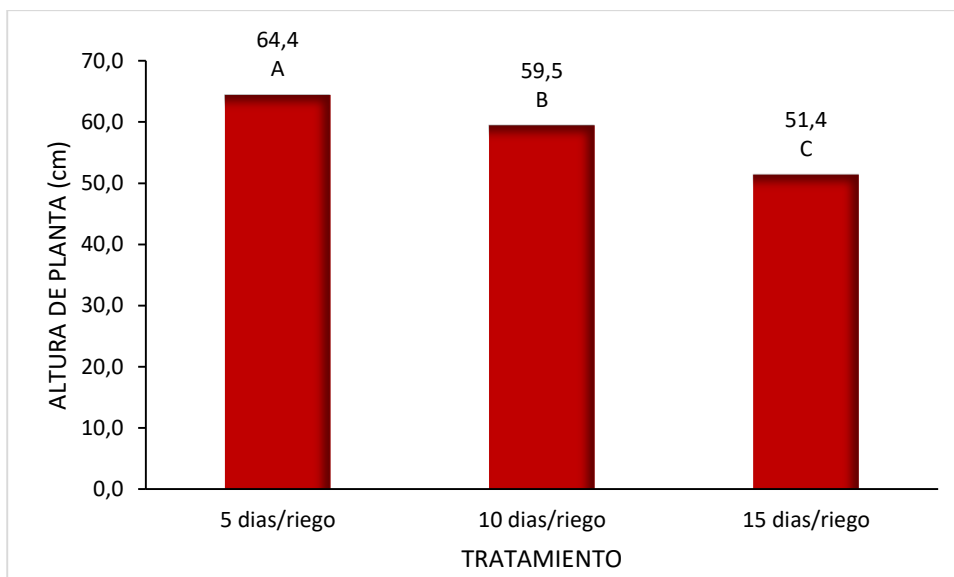


Figura 27. Prueba de Duncan de altura de la planta de papa (cm)

Los resultados obtenidos en este estudio indican que el sistema biointensivo asociado, al proporcionar un manejo más eficiente de los recursos y mejorar las propiedades del suelo, favorece el crecimiento vegetativo de la papa. Este efecto se ve potenciado por la interacción con los cultivos vecinos de haba y centeno, que, al formar parte del sistema asociado, modifican el microclima y la disponibilidad de recursos, aunque también generan cierta competencia radicular.

Estos hallazgos son consistentes con estudios previos que reportan mejoras en parámetros agronómicos bajo sistemas de producción biointensiva. Gonzales *et al.* (2022) señalaron que los sistemas biointensivos optimizan el uso de recursos, beneficiando el desarrollo vegetativo de los cultivos. De manera complementaria, Sifuentes *et al.* (2020) observaron que la papa bajo condiciones de déficit hídrico reduce significativamente su crecimiento en altura; en su estudio, las plantas sometidas a riegos menos frecuentes mostraron una disminución del desarrollo, atribuida a la restricción hídrica durante etapas críticas.

4.4.4. Diámetro de tubérculo de papa (cm)

En el Cuadro 10, el análisis de varianza para la variable diámetro de tubérculo mostró diferencias altamente significativas ($p < 0,0001$) entre las frecuencias de riego. Esto evidencia que la frecuencia de riego influyó de manera directa y significativa en el diámetro del tubérculo de papa dentro del sistema de producción biointensiva asociada. En cuanto

al valor de coeficiente de varianza fue de 1,89%, lo que significa que el trabajo fue manejado de manera adecuada.

Cuadro 10. Análisis de varianza de diámetro de tubérculo de papa (cm)

F.V.	SC	GL	CM	F	p-valor
Días de riego	1,22	2	0,61	70,99	0,0001**
Error	0,05	6	0,01		
Total	1,28	8			

** $p < 0,01$

La prueba de comparación de medias de Duncan (Figura 28) evidenció diferencias significativas en el diámetro de los tubérculos dentro del sistema biointensivo asociado. El riego cada 10 días permitió obtener tubérculos con diámetros adecuados, reflejando un equilibrio entre crecimiento vegetativo y desarrollo de los tubérculos. En contraste, el riego cada 15 días generó tubérculos más grandes, pero con deformaciones, probablemente por un suministro irregular de agua durante distintas fases fenológicas. Por otro lado, el riego cada 5 días produjo tubérculos de menor diámetro, posiblemente debido al estímulo excesivo al crecimiento vegetativo y la competencia radicular con los cultivos de haba y centeno. Estos resultados muestran que, en sistemas biointensivos asociados, un manejo hídrico equilibrado es clave para maximizar la calidad y productividad de los tubérculos

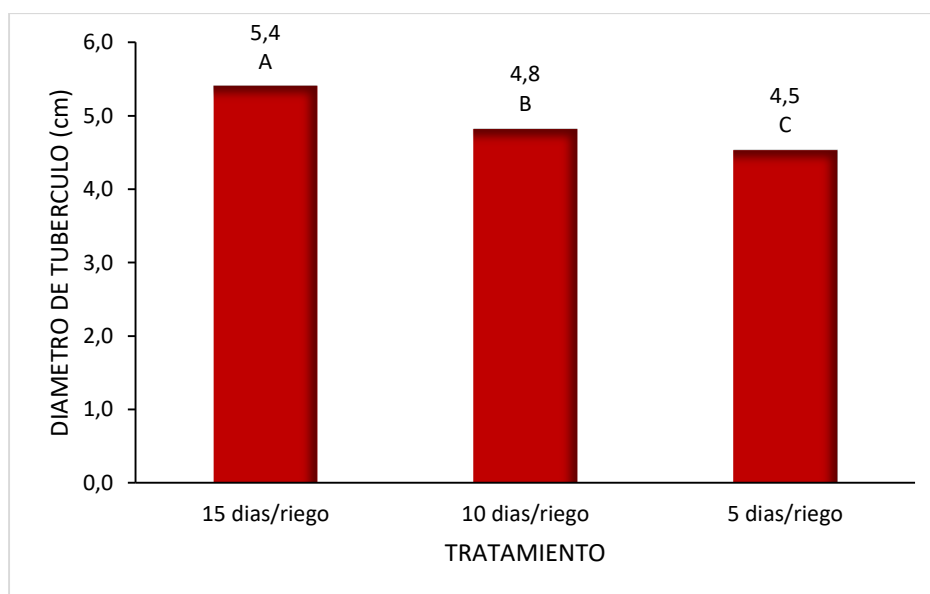


Figura 28. Prueba de Duncan diámetro de tubérculo de papa (cm)

Por su parte Martínez y Sandoval (2020), menciona en su investigación evaluaron tres niveles de humedad en cultivos de maíz, tomate y camote bajo riego por goteo en un sistema biointensivo. En dicho estudio se observó que tanto la disponibilidad de agua como la cercanía entre cultivos incidían significativamente en el desarrollo de los órganos de almacenamiento, especialmente en el camote, donde la proximidad a otros cultivos y la humedad afectaron el crecimiento y la calidad de la raíz.

Por otro lado, el tratamiento de riego cada 10 días presentó un diámetro de tubérculo intermedio, considerado aceptable agrónomicamente, lo que sugiere un equilibrio entre la disponibilidad hídrica y la competencia radicular. En este tratamiento, la menor frecuencia de riego pudo haber limitado ligeramente el crecimiento, pero también redujo el vigor excesivo de especies acompañantes, permitiendo un mejor desarrollo del tubérculo.

En contraste, el tratamiento con riego cada 15 días presentó los tubérculos con mayor diámetro; sin embargo, este efecto podría estar ocasionadas por el estrés hídrico como lo menciona Sifuentes *et al.* (2020), que el déficit hídrico puede inducir deformaciones, tubérculos unidos y desarrollo asimétrico, lo que podría explicar los valores altos pero no necesariamente óptimos desde el punto de vista comercial o de calidad.

4.4.5. Peso de tubérculo por planta de papa (g)

En relación al peso de tubérculo por planta, el análisis de varianza presentado en el Cuadro 11 mostró diferencias altamente significativas ($p < 0,0001$) entre los tratamientos. Esto evidencia que la frecuencia de riego influyó de manera relevante para el incremento de peso de los tubérculos dentro del sistema de producción biointensiva asociada. Además, el coeficiente de variación registrado fue de 4,7% lo que indica que los datos son confiables para este estudio.

Cuadro 11. Análisis de varianza del peso de tubérculo por planta de papa (g)

F.V.	SC	GL	CM	F	p-valor
Días de riego	64545,98	2	32272,99	156,6	<0,0001**
Error	1236,53	6	206,09		
Total	65782,52	8			

** $p < 0,01$

La prueba de comparación de medias de Duncan (Figura 29) evidenció la formación de dos grupos significativamente diferentes en el peso de los tubérculos por planta dentro del sistema de producción biointensiva asociada. El primer grupo, conformado por los tratamientos con riego cada 15 y 10 días, presentó los valores más altos de peso. En el caso del riego cada 15 días, el aumento del peso se vio influenciado por la presencia de tubérculos unidos, probablemente como consecuencia del estrés hídrico durante distintas fases fenológicas. Por su parte, el tratamiento con riego cada 10 días permitió un desarrollo equilibrado del tubérculo, reflejando un suministro de agua adecuado para maximizar la acumulación de biomasa sin afectar la calidad. En contraste, el segundo grupo, correspondiente al riego cada 5 días, registró el menor peso de tubérculos por planta.

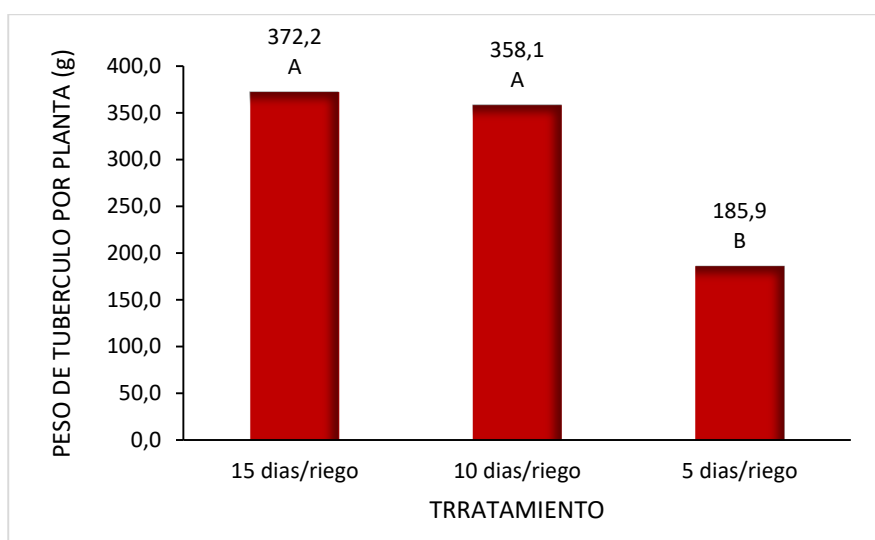


Figura 29. Prueba de Duncan de peso de tubérculo por planta de papa (g)

Este comportamiento puede explicarse por la interacción entre el estrés hídrico moderado y la competencia radicular característica de los sistemas biointensivos asociados. En el tratamiento con riego cada 5 días, a pesar de la mayor disponibilidad de agua, se observó el peso más bajo de tubérculos, lo que sugiere que la alta frecuencia de riego no fue suficiente para contrarrestar la competencia por raíces entre los cultivos asociados (haba, cebolla y centeno). La abundancia de agua estimuló un desarrollo radicular más vigoroso en las especies asociadas, restringiendo la acumulación de biomasa y el crecimiento de los tubérculos de papa.

Este comportamiento coincide con Martínez y Sandoval (2020), quienes señalan que en sistemas biointensivos con asociaciones de cultivos la competencia radicular puede limitar

el crecimiento y afectar el rendimiento individual. Asimismo, Mahgoub *et al.* (2017), en su estudio con cebolla y haba, reportaron que un riego frecuente favorece un sistema radicular superficial, incrementando la competencia por espacio y nutrientes en las capas superiores del suelo, lo que reduce la eficiencia productiva de los cultivos incluso bajo alta disponibilidad de agua.

Por otro lado, el tratamiento de 10 días de riego mostró un peso promedio intermedio, más equilibrado, lo que indica que una frecuencia de riego moderada favoreció un entorno menos competitivo para el desarrollo de los tubérculos, sin llegar al nivel de estrés hídrico. Este resultado sugiere que el tratamiento T2 permitió una asignación más eficiente de recursos hacia el crecimiento de los tubérculos, incluso en presencia de cultivos asociados.

El tratamiento con riego cada 15 días, que presentó el mayor peso promedio, podría estar reflejando una respuesta fisiológica a un estrés hídrico prolongado. Sifuentes *et al.* (2020), señalaron que, bajo déficit hídrico controlado, algunos genotipos de papa desarrollan mecanismos de defensa, como la priorización del llenado de tubérculos frente al crecimiento vegetativo. Sin embargo, estos autores también reportaron deformaciones y fusión de tubérculos bajo estrés, lo que indica que un mayor peso no necesariamente refleja una mayor calidad comercial.

4.4.6. Rendimiento de papa (t/ha)

El rendimiento de papa, expresado en t/ha y presentado en el Cuadro 12, mostró diferencias altamente significativas ($p < 0,0001$) entre los tratamientos, lo que evidencia que la frecuencia de riego influyó en la producción del cultivo en el sistema de producción biointensivo asociado. El coeficiente de variación fue de 3,1 %, lo cual refleja una alta precisión experimental y una baja dispersión de los datos respecto a la media.

Cuadro 12. Rendimiento de papa (t/ha)

F.V.	SC	GL	CM	F	p-valor
Días de riego	18,14	2	9,07	408,04	<0,0001 **
Error	0,13	6	0,02		
Total	18,28	8			

** $p < 0,01$

La Figura 30 muestra la prueba de comparación de medias de Duncan para el rendimiento de papa, evidenciándose tres grupos estadísticamente diferentes. El tratamiento con riego cada 10 días se ubicó en el grupo superior, logrando el mayor rendimiento, el riego cada 15 días conformó un grupo intermedio, esto se debió, a la presencia de tubérculos unidos, lo que incrementó el peso total por planta efectos de estrés hídrico. Finalmente, el riego cada 5 días se situó en el grupo inferior, con menor rendimiento, probablemente debido a que la alta disponibilidad de agua estimuló un crecimiento vegetativo excesivo y, sumado a la competencia radicular con los cultivos asociados de haba y centeno dentro del sistema biointensivo, limitó la asignación de recursos hacia los tubérculos, reduciendo la eficiencia productiva.

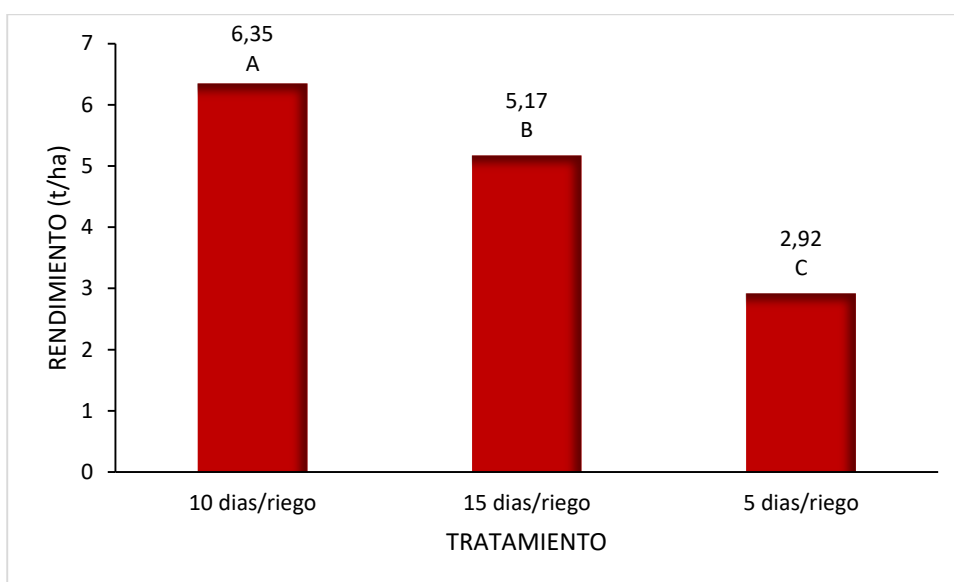


Figura 30. Rendimiento de papa (t/ha)

El mayor rendimiento se obtuvo con el tratamiento de riego cada 10 días, lo que sugiere que un estrés hídrico moderado favoreció la formación y el llenado de los tubérculos. Este comportamiento indica que, bajo condiciones controladas, la papa es capaz de tolerar cierto nivel de déficit hídrico, optimizando la asignación de recursos hacia los órganos de reserva en lugar de mantener un crecimiento vegetativo excesivo. Resultados similares fueron reportados por Sifuentes *et al.* (2020), quienes señalaron que un déficit hídrico controlado puede inducir una mayor eficiencia en la acumulación de biomasa en tubérculos, mejorando tanto el rendimiento como la calidad en determinadas variedades de papa.

Por su parte, el tratamiento con riego cada 15 días presentó un rendimiento intermedio. Si bien la menor disponibilidad de agua limitó parcialmente la productividad, la presencia de tubérculos unidos producto de una respuesta morfológica al estrés hídrico contribuyó al incremento del peso total por planta, aunque no necesariamente en términos de calidad comercial.

En contraste, el tratamiento con riego cada 5 días, pese a disponer de mayor cantidad de agua, registró el menor rendimiento. Este resultado se explica por la combinación de dos factores: El exceso de humedad estimuló un crecimiento vegetativo desproporcionado que redujo la asignación de fotoasimilados hacia los tubérculos, y la competencia radicular con los cultivos asociados de haba, cebolla y centeno dentro del sistema biointensivo intensificó la presión sobre los recursos, limitando aún más el desarrollo del tubérculo. Este efecto concuerda con lo observado por Martínez y Sandoval (2020), quienes reportaron que en sistemas de asociación biointensiva, la competencia por agua y nutrientes entre raíces puede afectar negativamente el desarrollo de órganos de almacenamiento, como se evidenció en el camote dentro de su estudio.

Finalmente, al comparar los rendimientos obtenidos en esta investigación con los promedios nacionales reportados por el OAP (2021) para el ciclo agrícola 2019 (8,6 t/ha), se observa que los resultados aquí alcanzados se sitúan por debajo del promedio nacional. Esto sugiere que, si bien el sistema biointensivo asociado aporta ventajas en el manejo del suelo y la diversificación, es indispensable ajustar la estrategia de riego para maximizar la eficiencia productiva de la papa dentro de este modelo agrícola. Estos resultados resaltan que, en sistemas biointensivos, la frecuencia y cantidad de riego deben ser manejadas estratégicamente, buscando un balance que permita un desarrollo vegetativo adecuado sin comprometer la producción ni la calidad de los tubérculos.

4.4.7. Regresión lineal del rendimiento de papa (t/ha) en función de la frecuencia de riego en el sistema biointensivo asociado

Se realizó una regresión para evaluar la relación entre la frecuencia de riego y el rendimiento del cultivo de papa. Este análisis permitió identificar la tendencia de respuesta del cultivo frente a las diferentes láminas de agua aplicadas en los tratamientos.

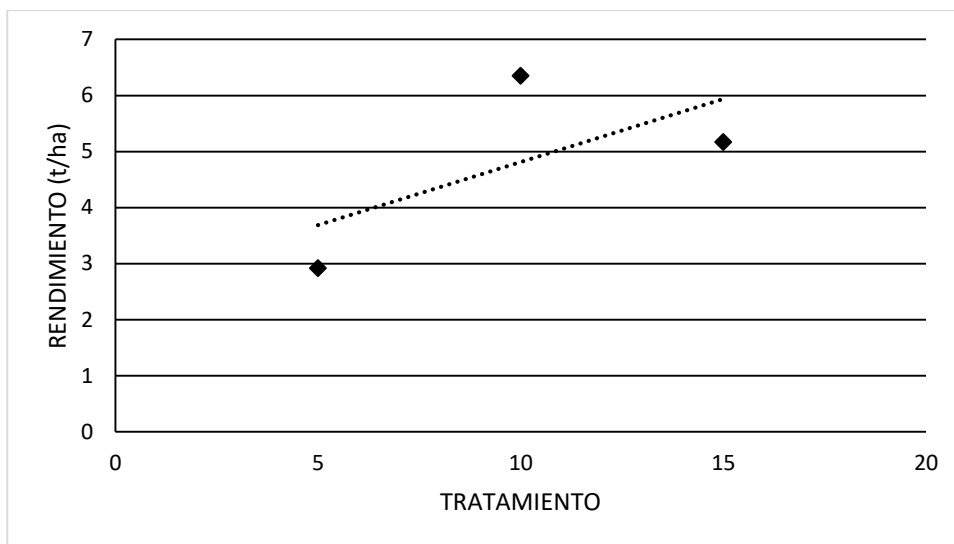


Figura 31. Regresión entre frecuencia de riego y rendimiento (t/ha) en papa

El modelo mostró que la tendencia no fue lineal (Figura 31), evidencian una débil correlación positiva entre la frecuencia de riego y el rendimiento ($r = 0.4168$), lo que sugiere que el aumento en el intervalo de riego no produjo una tendencia lineal evidente en la producción del cultivo. El coeficiente de determinación ($R^2 = 0.17$) indicó que únicamente el 17 % de la variabilidad en el rendimiento se puede atribuir a la frecuencia de riego utilizada, mientras que el 83 % restante es atribuible a otros elementos vinculados al manejo y a las condiciones micro ambientales del sistema biointensivo.

El riego cada 10 días presentó el mejor rendimiento, mientras que los riegos más frecuentes de 5 días y más espaciados de 15 días disminuyeron la producción. Este comportamiento refleja la sensibilidad de la papa al exceso y déficit de agua. El riego frecuente favoreció un desarrollo vegetativo excesivo, y el riego tardío provocó estrés hídrico, deformaciones y tubérculos unidos. En conjunto, muestra que la frecuencia de riego de 10 días representa un punto de equilibrio, donde la papa optimiza el uso del agua y maximiza su rendimiento.

El análisis de regresión para el rendimiento de papa evidenció que la respuesta del cultivo a la frecuencia de riego no sigue un patrón estrictamente lineal, sino que presenta un punto de mayor eficiencia en el tratamiento con riego cada 10 días. Este resultado concuerda con lo descrito por Martínez y Sandoval (2020), quienes destacan que en sistemas biointensivos, la competencia radicular entre cultivos asociados puede intensificar los efectos de una disponibilidad de agua inadecuada.

4.5. Variables de respuesta agronómica de centeno (*Secale cereale*)

Se tomó en cuenta las siguientes variables: Porcentaje de germinación, altura de planta, numero de granos por espiga, peso de granos por espiga.

4.5.1. Porcentaje de germinación de centeno (%)

Antes de la siembra del cultivo de centeno, se realizó una prueba de germinación bajo condiciones controladas utilizando una muestra de 100 semillas, obteniendo un porcentaje de germinación del 70%, lo cual permitió estimar la viabilidad del lote de semillas. En base a ello, se procedió con la siembra directa de aproximadamente 15 gramos de semilla en un surco de 5 metros de longitud, correspondiente a una de las franjas del diseño biointensivo. Esta práctica buscó asegurar una densidad adecuada de plantas en campo, considerando la tasa de germinación previamente observada.

4.5.2. Crecimiento en altura de planta de centeno a lo largo del ciclo del cultivo

Durante el ciclo fenológico del cultivo de centeno, se evaluó el comportamiento en altura de planta bajo tres frecuencias de riego en el sistema de producción biointensiva: cada 5 días, cada 10 días y cada 15 días. Se evidenció un crecimiento diferenciado en función del tratamiento aplicado, reflejando la influencia del régimen hídrico sobre el desarrollo vegetativo (Figura 32).

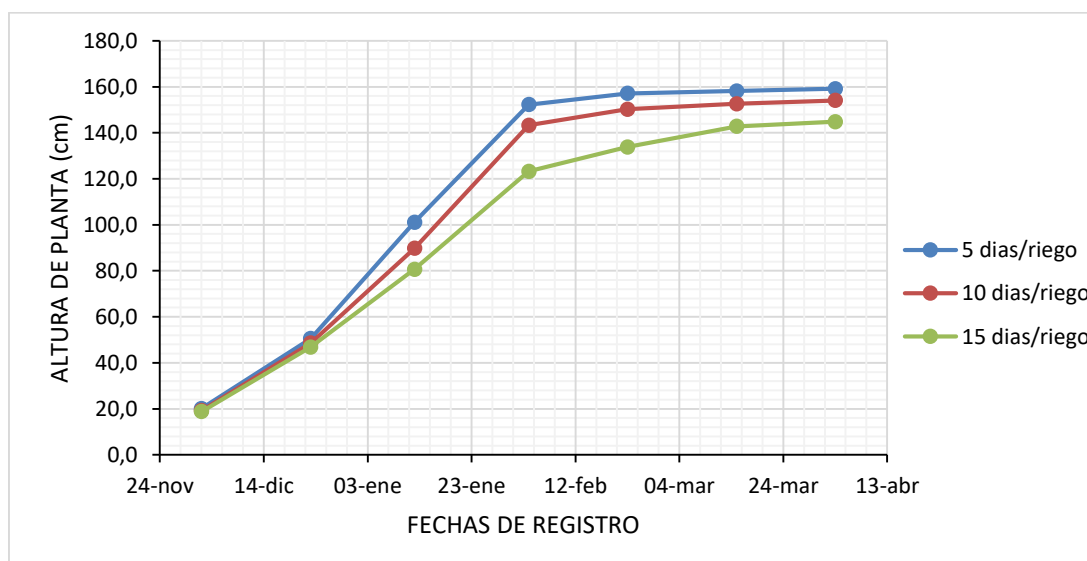


Figura 32. Altura de planta de centeno (*Secale cereale*) bajo tres frecuencias de riego

El tratamiento de riego cada 5 días presentó el mayor crecimiento acumulado, iniciando con una altura promedio de 15.6 cm y alcanzando un valor final de 106.3 cm, por su parte, el tratamiento de riego cada 10 días mostró un crecimiento intermedio, con una altura final de 97.8 cm, mientras que el tratamiento de riego cada 15 días presentó los valores más bajos, con una altura final de 91.5 cm.

4.5.3. Altura de la planta de centeno (cm)

El análisis de varianza presentado en el Cuadro 13 mostró diferencias altamente significativas ($p < 0,0001$) entre los tratamientos de riego, lo que indica que la frecuencia de riego ejerció un efecto determinante sobre la altura de planta del centeno en el sistema de producción biointensiva asociada. El coeficiente de variación fue de 0,77%, reflejando una baja variabilidad experimental y alta confiabilidad en los datos obtenidos.

Cuadro 13. Análisis de varianza de altura de planta de centeno (cm)

F.V.	SC	GL	CM	F	p-valor
Días de riego	270,65	2	135,32	98,38	<0,0001 **
Error	8,25	6	1,38		
Total	278,9	8			

** $p < 0,01$

Como muestra la prueba de comparación de medias de Duncan presentada en la Figura 33, se observó tres grupos estadísticamente diferentes en la altura de planta del centeno dentro del sistema de producción biointensiva asociada. El tratamiento con riego cada 5 días se ubicó en el grupo superior, alcanzando la mayor altura promedio, lo que refleja que la disponibilidad constante de agua favoreció un crecimiento vegetativo óptimo. Por su parte, el riego cada 10 días conformó un grupo intermedio, indicando un desarrollo equilibrado que combina crecimiento vegetativo y eficiencia en el uso de recursos. Finalmente, el riego cada 15 días se situó en el grupo inferior, registrando la menor altura, probablemente debido a la menor frecuencia de riego, lo que activó mecanismos de adaptación al déficit hídrico y limitó el crecimiento vegetativo.

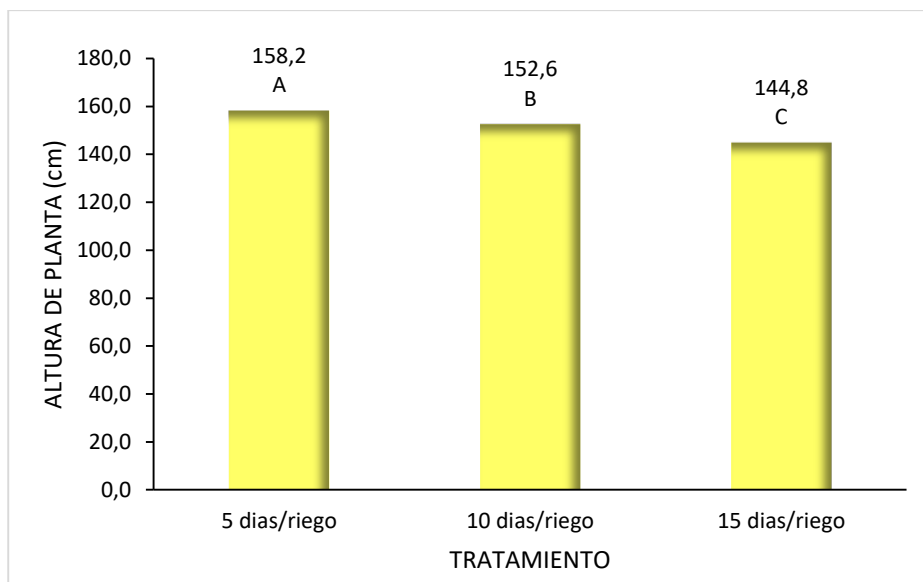


Figura 33. Prueba de Duncan de altura de la planta de centeno (cm)

Los resultados obtenidos evidencian que el centeno responde de manera positiva al incremento en la frecuencia de riego dentro del sistema biointensivo asociado. La disponibilidad constante de agua favoreció el desarrollo de tallos más largos, lo que refleja un mejor aprovechamiento de los recursos hídricos en condiciones de suelo con doble excavación y alta incorporación de materia orgánica, características propias del sistema biointensivo que optimizan la aireación y retención de humedad.

Estos hallazgos coinciden con lo reportado por Sosa *et al.* (2024), quienes en ambientes áridos observaron que, si bien el centeno presenta tolerancia relativa al estrés hídrico, su crecimiento en altura disminuye significativamente a medida que la disponibilidad de agua en el suelo se reduce.

En este contexto, los resultados demuestran que, aun bajo un sistema de asociación biointensiva donde existe competencia por recursos con otros cultivos como papa, haba y cebolla, el centeno mantiene un crecimiento vigoroso cuando la frecuencia de riego es alta. Esto sugiere que la combinación de manejo agroecológico del suelo y un suministro hídrico adecuado puede potenciar el desarrollo vegetativo de cereales, generando un microambiente más favorable en comparación con los sistemas convencionales.

4.5.4. Numero de granos por espiga de centeno

En el cuadro 14, en análisis de varianza para el número de granos por espiga mostró diferencias altamente significativas ($p < 0,0001$) entre los tratamientos, lo que evidencia que la frecuencia de riego influyó de manera determinante en el número de granos por espiga del centeno en el sistema de producción biointensiva asociado. El coeficiente de variación fue de 0,77% lo que demuestra confiabilidad en los datos registrados.

Cuadro 14. Análisis de varianza de numero de granos por espiga de centeno

F.V.	SC	GL	CM	F	p-valor
Días de riego	130,67	2	65,33	294	<0,0001 **
Error	1,33	6	0,22		
Total	132	8			

** $p < 0,01$

La Figura 34, correspondiente a la prueba de comparación de medias de Duncan para el número de granos por espiga de centeno, muestra la conformación de tres grupos estadísticamente distintos. El tratamiento con riego cada 5 días se ubicó en el grupo superior, alcanzando el mayor número de granos por espiga, lo que indica que la disponibilidad continua de agua dentro del sistema biointensivo favoreció los procesos reproductivos y la capacidad de llenado de las espigas. En contraste, el riego cada 10 días conformó un grupo intermedio, reflejando un equilibrio entre el crecimiento vegetativo y la producción de granos. Finalmente, el tratamiento con riego cada 15 días se situó en el grupo inferior, registrando el menor número de granos por espiga; este resultado sugiere que la menor frecuencia de riego redujo la disponibilidad de fotoasimilados destinados a la fase reproductiva, limitando tanto la formación como el llenado de granos.

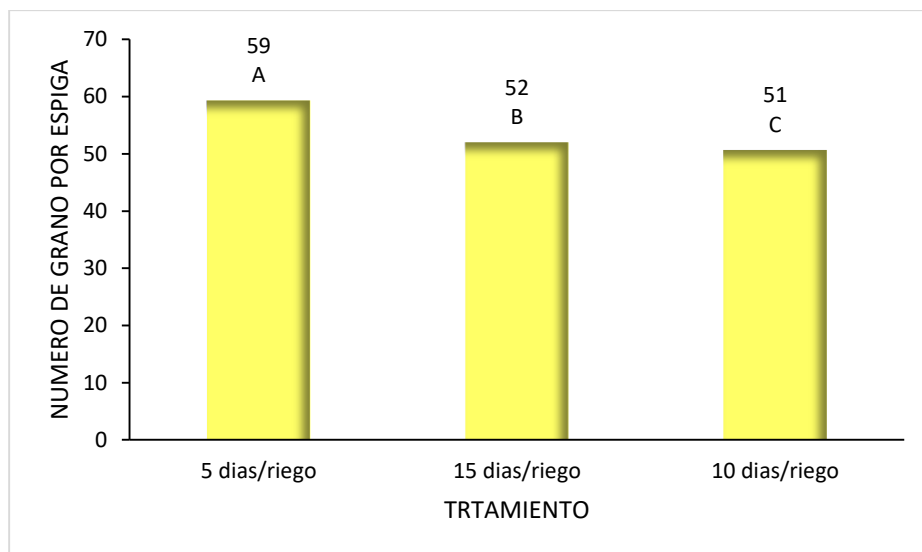


Figura 34. Prueba de Duncan de número de granos por espiga de centeno

Los resultados obtenidos sugieren que una mayor frecuencia de riego ejerce un efecto positivo en el proceso reproductivo del centeno. El suministro constante de agua durante fases críticas como el espigamiento, la floración y el llenado de grano asegura una fecundación más eficiente y una mayor formación de granos viables. Este hallazgo coincide con lo reportado por Sosa *et al.* (2024), quienes evidenciaron que la disponibilidad de humedad es determinante en el número de granos por espiga en centeno bajo condiciones áridas, observándose una disminución significativa de esta variable a medida que aumenta el déficit hídrico.

Asimismo, el sistema biointensivo asociado utilizado en esta investigación pudo haber contribuido a estos resultados al mejorar la conservación de la humedad en el suelo mediante camas elevadas, incorporación de materia orgánica y la interacción con cultivos asociados que optimizan la estructura del suelo y reducen la evaporación. Este comportamiento concuerda con lo señalado por la FAO (2006a), donde se destaca que los sistemas agrícolas con manejo ecológico del suelo ayudan a mitigar los efectos del estrés hídrico en cultivos de cereales como el centeno, favoreciendo su productividad.

El incremento del número de granos por espiga bajo riegos más frecuentes también puede explicarse desde una perspectiva fisiológica: la adecuada disponibilidad hídrica genera un entorno más favorable para la viabilidad del polen, la fecundación y el desarrollo inicial del grano, procesos particularmente sensibles a la falta de agua. Investigaciones en cereales de clima templado, como trigo y cebada, han reportado reducciones significativas en la

formación de granos bajo condiciones de estrés hídrico durante la floración, lo que respalda la importancia de un manejo hídrico estratégico en estas etapas.

4.5.5. Peso de granos por espiga de centeno (g)

Con respecto al peso de granos por espiga, el análisis de varianza mostró diferencias altamente significativas ($p < 0,0001$) entre los tratamientos, lo que indica que la frecuencia de riego tuvo un efecto determinante sobre el peso de los granos por espiga del centeno en el sistema de producción biointensiva asociada. En cuanto al valor de coeficiente de varianza fue de 1,97% lo que indica que los datos son confiables para este estudio.

Cuadro 15. Análisis de varianza de peso de granos por espiga de centeno (g)

F.V.	SC	GL	CM	F	p-valor
Días de riego	1,82	2	0,91	273	<0,0001 **
Error	0,02	6	3,30		
Total	1,84	8			

** $p < 0,01$

La comparación de medias para la variable peso de grano por espiga, evaluada mediante la prueba de Duncan (Figura 35), mostró la formación de dos grupos estadísticamente diferentes. El tratamiento con riego cada 5 días se ubicó en el grupo superior, alcanzando el mayor peso de grano por espiga. En contraste, los tratamientos con riego cada 10 y 15 días conformaron el grupo inferior, registrando un menor peso de grano. Esto probablemente se debió a que la menor frecuencia de riego generó periodos de estrés hídrico, limitando tanto la eficiencia fotosintética como la movilización de carbohidratos hacia los órganos reproductivos. Dichas condiciones pudieron interrumpir parcialmente el proceso de llenado, reduciendo el peso final del grano y, en consecuencia, la calidad del rendimiento.

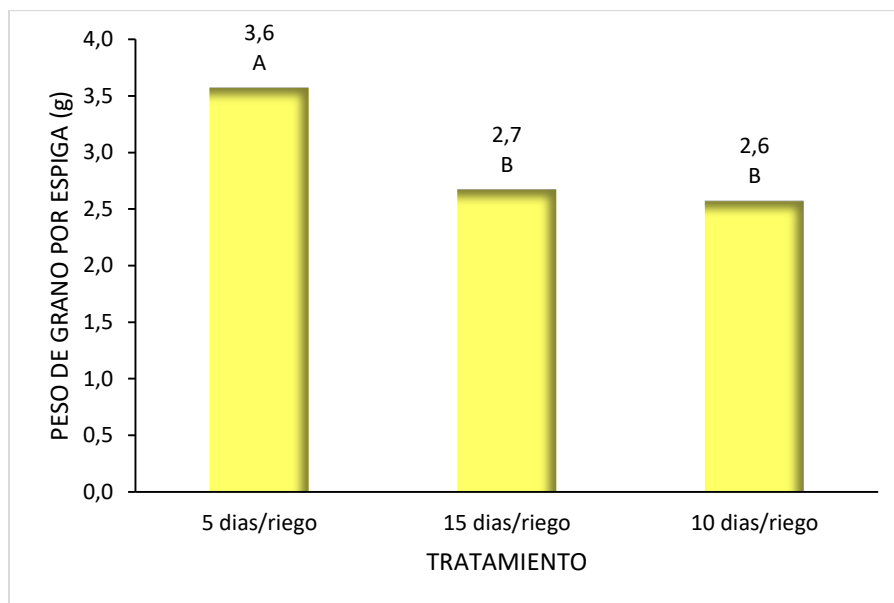


Figura 35. Prueba de Duncan de peso de granos por espiga de centeno (g)

Estos resultados concuerdan con lo reportado por Sosa *et al.* (2024), quienes observaron que en ambientes áridos, la restricción hídrica reduce significativamente el peso de 1000 granos de centeno, reflejando un menor llenado del grano y un impacto negativo sobre la calidad agronómica. Asimismo, FAO (2006a) destacan que la disponibilidad de agua en fases críticas del desarrollo reproductivo de cereales, como espigamiento y llenado de grano, es determinante para alcanzar un mayor peso y rendimiento de grano.

El sistema biointensivo asociado utilizado en esta investigación, contribuyó a conservar la humedad disponible en el suelo y a mejorar la eficiencia del uso del agua. Esto permitió que los tratamientos con riego más frecuente optimizaran la translocación de nutrientes y prolongaran la fase de llenado del grano, generando granos más pesados y de mejor calidad.

4.5.6. Rendimiento de centeno (t/ha)

El análisis de varianza presentado para la variable rendimiento de centeno en el Cuadro 16 mostró diferencias altamente significativas ($p = 0,0002$) entre los tratamientos, lo que indica que la frecuencia de riego tuvo un efecto determinante sobre el rendimiento del centeno dentro del sistema de producción biointensivo asociado con papa, cebolla y haba. El coeficiente de variación fue de 9,87% indica una baja dispersión de los datos respecto a la

media, lo que demuestra buena homogeneidad y confiabilidad en las mediciones experimentales.

Cuadro 16. Rendimiento de centeno (t/ha)

F.V.	SC	GL	CM	F	p-valor
Días de riego	2,11	2	1,05	50,08	0,0002
Error	0,13	6	0,02		
Total	2,24	8			

** $p < 0,01$

La prueba de comparación de medias de Duncan, presentada en la Figura 36, mostró tres de tres grupos estadísticamente diferentes en el rendimiento del centeno. El tratamiento con riego cada 5 días se ubicó en el primer grupo, alcanzando el mayor rendimiento, lo que refleja que la disponibilidad constante de agua en camas biointensivas promovió una mayor acumulación de biomasa y un óptimo llenado de granos. El riego cada 10 días conformó un grupo intermedio, mostrando un equilibrio entre el crecimiento vegetativo y la producción de grano, mientras que el riego cada 15 días se situó en el grupo inferior, registrando la menor productividad, probablemente debido a la restricción hídrica que limitó el desarrollo de los órganos reproductivos y la translocación de nutrientes hacia los granos.

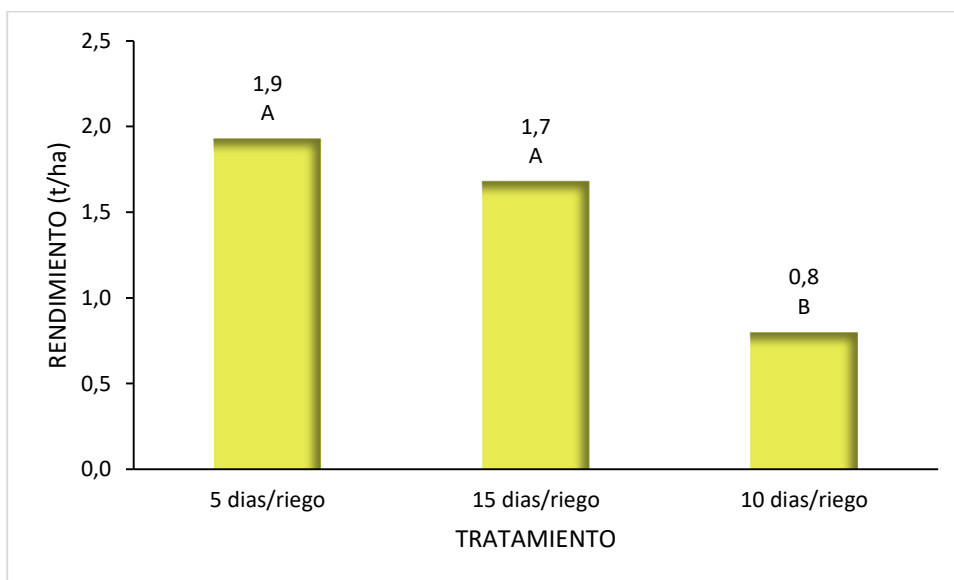


Figura 36. Rendimiento de centeno (t/ha)

Los resultados obtenidos evidencian que una mayor frecuencia de riego tiene un efecto positivo y significativo sobre el rendimiento del centeno dentro del sistema de producción biointensiva. El riego cada 5 días permitió mantener una humedad del suelo más constante, favoreciendo el desarrollo fenológico óptimo del cultivo, particularmente durante la etapa crítica de llenado de grano. En contraste, los tratamientos con riego cada 15 días generaron estrés hídrico, limitando tanto el crecimiento vegetativo como la acumulación de biomasa, lo que se tradujo en una menor producción de grano y, por ende, un rendimiento inferior.

Estos hallazgos concuerdan con los reportados por Sosa *et al.* (2024), en ambientes áridos, quienes observaron que el centeno es altamente sensible a la disponibilidad hídrica, registrando una reducción significativa en el rendimiento bajo condiciones de baja humedad, atribuida a una menor actividad fotosintética y a un acortamiento del ciclo fenológico. De manera similar, los tratamientos con riego espaciado en la presente investigación mostraron menor peso de grano por espiga y reducción en la biomasa, reflejando la importancia de un suministro hídrico adecuado para mantener la productividad en sistemas biointensivos.

Al comparar los resultados con los promedios nacionales reportados por el OAP (2021), para la campaña agrícola 2019, donde se estima un rendimiento promedio de 1,1 t/ha para el centeno, se observa que los tratamientos evaluados en este estudio superan dichos valores. Esto evidencia el potencial del manejo biointensivo, combinado con un riego estratégico, como una alternativa efectiva para incrementar la productividad del centeno, incluso bajo condiciones de estrés hídrico moderado.

4.5.7. Regresión lineal del rendimiento de centeno (t/ha) en función de la frecuencia de riego en el sistema biointensivo asociado

Se realizó una regresión para evaluar la relación entre la frecuencia de riego y el rendimiento del cultivo de centeno. Este análisis permitió identificar la tendencia de respuesta del cultivo frente a las diferentes láminas de agua aplicadas en los tratamientos, evidenciando cómo la disponibilidad hídrica influye directamente en la producción de biomasa y el llenado de grano dentro del sistema biointensivo asociado.

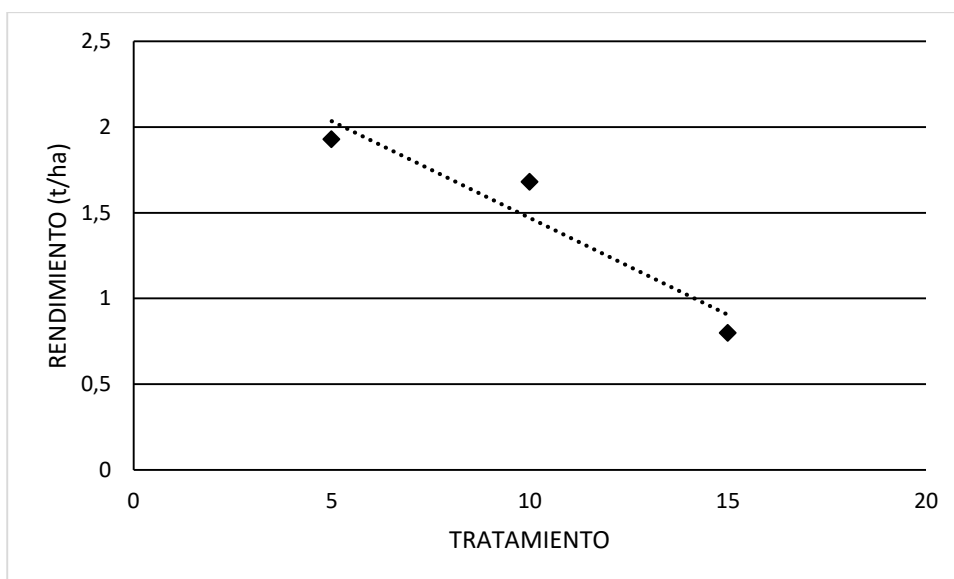


Figura 37. Regresión entre frecuencia de riego y rendimiento (t/ha) en centeno

El análisis de regresión para el rendimiento del centeno (Figura 37), mostró una relación negativa entre la frecuencia de riego y el rendimiento ($r = 0.9061$), lo que sugiere que, al aumentar el tiempo entre riegos, se produjo una notable reducción en la productividad del cultivo. El coeficiente de determinación ($R^2 = 0.82$) señala que el 82 % de la variación en el rendimiento se explica directamente por la frecuencia de riego aplicada, mientras que el 18 % restante se asocia a otros factores como la competencia entre cultivos, la fertilidad del suelo o la radiación incidente sobre las camas biointensivas.

Este comportamiento evidencia la alta sensibilidad del centeno a la disponibilidad de agua. Una frecuencia de riego elevada garantiza un suministro hídrico constante, favoreciendo el crecimiento vegetativo y el llenado eficiente de los granos, mientras que intervalos prolongados de riego (15 días) inducen estrés hídrico, afectando la formación y desarrollo de los órganos reproductivos. Los resultados de esta investigación coinciden con lo reportado por Sosa *et al.* (2024), quienes destacaron que, en ambientes áridos, la limitación de agua reduce notablemente el rendimiento del centeno debido a la disminución de la actividad fotosintética y al acortamiento de su ciclo fenológico.

Por tanto, la regresión evidencia que el rendimiento del centeno aumenta a medida que la disponibilidad de agua es suficiente, maximiza la producción de este cereal en sistemas biointensivos asociados.

4.6. Variable de presencia de plagas y enfermedades

Durante las etapas fenológicas, se registró la presencia de plagas y enfermedades en los distintos tratamientos de riego.

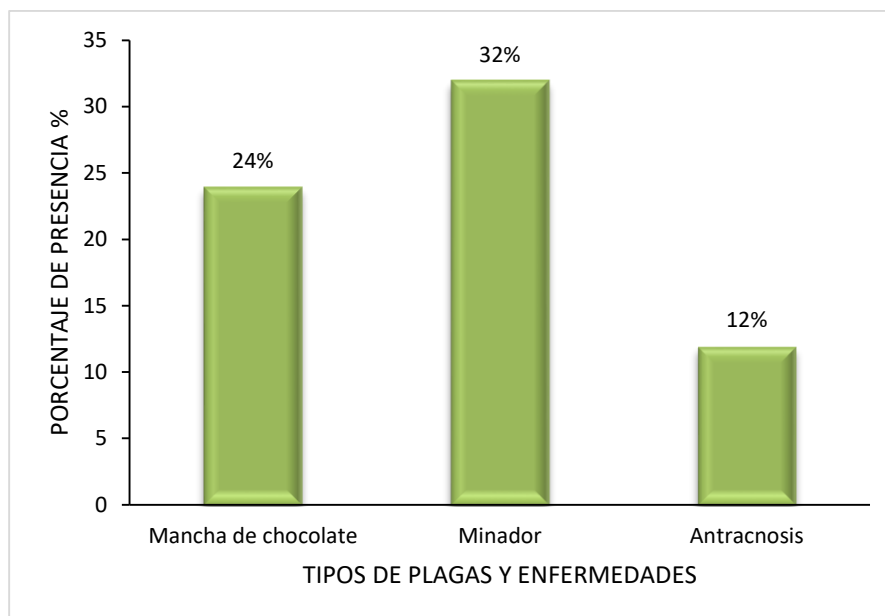


Figura 38. Presencia de plagas y enfermedades

En la Figura 38, se presenta la incidencia porcentual de las principales plagas y enfermedades observadas durante el desarrollo de los cultivos. En el cultivo de haba se observó la mosca minadora fue la plaga de mayor presencia, con una incidencia del 32%, seguida de la mancha de chocolate con 24%, y en menor medida la antracnosis, con 12%. Estas cifras reflejan cómo las condiciones de humedad, temperatura y manejo hídrico influyeron directamente sobre el comportamiento fitosanitario del sistema.

4.6.1. Incidencia de plagas en los cultivos bajo diferentes frecuencias de riego

El mayor porcentaje de incidencia del minador (32%) se registró principalmente en el tratamiento con riego cada 15 días (T3) en el cultivo de haba y papa, asociado al estrés hídrico que debilitó la resistencia fisiológica de las plantas. En este contexto, las plantas se vieron más susceptibles a ataques de insectos debido a su baja capacidad de recuperación. Le siguió el tratamiento con riego cada 5 días (T1) en el cultivo de haba y papa, mientras que el tratamiento intermedio (T2) en el cultivo de haba presentó la menor afectación,

sugiriendo que una frecuencia de riego moderada ayuda a mantener una mejor sanidad vegetal.

4.6.2. Presencia y manejo de plagas y enfermedades

En el caso de la mancha de chocolate (24%) en el cultivo de haba, su mayor incidencia se dio también en el tratamiento T3, aunque con presencia notable en T1, debido a condiciones de humedad residual prolongada. Para su manejo se aplicaron biopreparados, caldos minerales como el caldo sulfocálcico, con buenos resultados preventivos. Por último, la antracnosis, con una incidencia del 12%, fue observada en menor proporción en el cultivo de haba, siguiendo la misma tendencia de afectación mayor en T3, intermedia en T1 y mínima en T2. En todos los casos, el tratamiento intermedio (riego cada 10 días) permitió mantener un equilibrio hídrico más favorable, reduciendo significativamente la incidencia de enfermedades.

Estos resultados evidencian que un riego equilibrado no solo mejora el rendimiento agronómico, sino que también reduce la presión de plagas y enfermedades, reforzando el valor del manejo ecológico en sistemas biointensivos. Así mismo FONTAGRO (2023), mencionan que el estrés hídrico puede debilitar las defensas naturales de las plantas, haciéndolas más susceptibles a plagas y enfermedades.

4.7. Análisis económico

El análisis económico permite evaluar la rentabilidad de los tratamientos de riego aplicados en el sistema biointensivo asociado con cultivos de cebolla, haba, papa y centeno. Para ello, se calcularon el ingreso bruto (IB), el ingreso neto (IN) y la relación beneficio/costo (B/C) CIMMYT (1988).

Cuadro 17. Cálculo del rendimiento ajustado

CEBOLLA					
Tratamiento	Rend. (t/ha)	Rend. (kg/ha)	Rend. (kg/m²)	Rend. ajustado (kg/ha)	Rend. ajustado (kg/m²)
T1 — riego 5 días	15.10	15 100	15.100	13 590.00	13.590
T2 — riego 10 días	11.10	11 100	11.100	9 990.00	0.9990
T3 — riego 15 días	10.30	10 300	10.300	9 270.00	0.9270
HABA					
Tratamiento	Rend. (t/ha)	Rend. (kg/ha)	Rend. (kg/m²)	Rend. ajustado (kg/ha)	Rend. ajustado (kg/m²)
T1 — riego 5 días	16.30	16 300	16.300	14 670.00	14.670
T2 — riego 10 días	14.12	14 120	14.120	12 708.00	12.708
T3 — riego 15 días	10.04	10 040	10.040	9 036.00	0.9036
PAPA					
Tratamiento	Rend. (t/ha)	Rend. (kg/ha)	Rend. (kg/m²)	Rend. ajustado (kg/ha)	Rend. ajustado (kg/m²)
T1 — riego 5 días	2.92	2 920	0.2920	2 628.00	0,2628
T2 — riego 10 días	6.35	6 350	0.6350	5 715.00	0,5715
T3 — riego 15 días	5.17	5 170	0.5170	4 653.00	0,4653
CENTENO					
Tratamiento	Rend. (t/ha)	Rend. (kg/ha)	Rend. (kg/m²)	Rend. ajustado (kg/ha)	Rend. ajustado (kg/m²)
T1 — riego 5 días	1.90	1 900	0.1900	1 710.00	0,1710
T2 — riego 10 días	1.70	1 700	0.1700	1 530.00	0,1530
T3 — riego 15 días	0.80	800	0.0800	720.00	0,0720

Los resultados del cuadro 17 indican que los cultivos respondieron de manera diferenciada a las tres frecuencias de riego evaluadas dentro del sistema biointensivo asociado. En términos generales, el riego más frecuente (cada 5 días) favoreció los mayores rendimientos ajustados en la mayoría de los cultivos, resaltando la importancia de una disponibilidad constante de agua para un desarrollo óptimo de la biomasa.

En haba y cebolla, los rendimientos ajustados fueron los más elevados, con promedios de 14,67 kg/m² y 13,59 kg/m² respectivamente, bajo el riego cada 5 días, lo que evidencia la alta eficiencia de estos cultivos en la absorción y utilización del agua, manteniendo un crecimiento estable y productividad incluso en asociación con otros cultivos.

En contraste, la papa mostró un comportamiento diferente, registrando su mayor rendimiento ajustado (0,5715 kg/m²) con riego cada 10 días. Esto sugiere que un intervalo moderado de riego permite optimizar la formación y llenado de tubérculos, aumentando la productividad del cultivo.

Por su parte, el centeno presentó los rendimientos más bajos en todos los tratamientos; alcanzó 0,1710 kg/m² con riego cada 5 días y apenas 0,0720 kg/m² con riego cada 15 días. Estos resultados reflejan su alta sensibilidad al déficit hídrico, ya que la limitación de agua afectó el macollamiento y el llenado de grano, reduciendo significativamente su rendimiento total.

4.7.1. Ingresos bruto

En el Cuadro 18 se observa que el ingreso bruto varió en función de la frecuencia de riego aplicada a cada cultivo dentro del sistema biointensivo asociado.

Cuadro 18. Ingreso bruto por tratamiento de cada cultivo (Bs/m²)

Cultivo	Tratamiento	Rendimiento ajustado (kg/m ²)	Precio (Bs/kg)	Ingreso Bruto (Bs/m ²)
CEBOLLA	T1 - 5 días	13.590	8	10.87
	T2 - 10 días	0.9990	8	7.99
	T3 - 15 días	0.9270	8	7.42
HABA	T1 - 5 días	14.670	15	22.01
	T2 - 10 días	12.708	15	19.06
	T3 - 15 días	0.9036	15	13.55
PAPA	T1 - 5 días	0.2628	5	1.31
	T2 - 10 días	0.4653	5	2.33
	T3 - 15 días	0.5715	5	2.86
CENTENO	T1 - 5 días	0.1710	20	3.42
	T2 - 10 días	0.1530	20	3.06
	T3 - 15 días	0.0720	20	1.44

Los resultados muestran que el riego cada 5 días (T1) generó los mayores ingresos brutos en la mayoría de los cultivos evaluados, reflejando la influencia positiva de una mayor disponibilidad hídrica sobre la producción y rentabilidad. El cultivo de haba registró el ingreso más alto con 22.01 Bs/m², seguido por cebolla con 10.87 Bs/m², mientras que papa

y centeno presentaron ingresos más bajos, de 1.31 Bs/m² y 3.42 Bs/m², respectivamente. En general, se evidencia que la reducción en la frecuencia de riego disminuyó progresivamente los ingresos, lo que demuestra la sensibilidad de los cultivos al déficit hídrico dentro del sistema biointensivo.

4.7.2. Ingresos netos

El cuadro 19 muestra el comportamiento económico de los cuatro cultivos (cebolla, haba, papa y centeno) bajo tres frecuencias de riego (cada 5, 10 y 15 días). Se observa que el ingreso neto varía de manera directa con el rendimiento de cada cultivo y la disponibilidad de agua en los tratamientos.

Cuadro 19. Ingreso neto por tratamiento de cada cultivo (Bs/m²)

Cultivo	Tratamiento	Ingreso Bruto (Bs/m ²)	Costo Producción (Bs/m ²)	Ingreso Neto (Bs/m ²)
Cebolla	T1 - 5 días	10.87	4.80	6.07
	T2 - 10 días	7.99	4.65	3.34
	T3 - 15 días	7.42	4.55	2.87
Haba	T1 - 5 días	22.01	3.50	18.51
	T2 - 10 días	19.06	3.35	15.71
	T3 - 15 días	13.55	3.25	10.30
Papa	T1 - 5 días	1.31	4.10	2.79
	T2 - 10 días	2.86	3.95	-1.62
	T3 - 15 días	2.33	3.85	-0.99
Centeno	T1 - 5 días	3.42	3.20	0.22
	T2 - 10 días	3.06	3.05	0.01
	T3 - 15 días	1.44	2.95	-1.51

En el cultivo de cebolla, el mayor ingreso neto se obtuvo con riego cada 5 días (T1), alcanzando 6,07 Bs/m², seguido por T2 (3,34 Bs/m²) y T3 (2,87 Bs/m²). Esto indica que una disponibilidad constante de agua favorece el desarrollo del bulbo y la productividad, aumentando los beneficios económicos, mientras que la disminución en la frecuencia de riego genera pérdidas progresivas.

Para haba, el tratamiento T1 también presentó el ingreso neto más alto (18,51 Bs/m²), lo que evidencia que el riego frecuente permitió un llenado óptimo de vainas y mayor rendimiento. Aunque T2 (15,71 Bs/m²) y T3 (10,30 Bs/m²) registraron ingresos menores, los

valores positivos en todos los tratamientos muestran que este cultivo soporta mejor el déficit hídrico moderado. En contraste, la papa mostró ingresos netos negativos en los tres tratamientos ($-2,79$, $-1,62$ y $-0,99$ Bs/m² para T1, T2 y T3, respectivamente), debido a que los costos de producción superaron los ingresos, probablemente como consecuencia del bajo rendimiento general asociado al estrés hídrico.

Por su parte, el centeno registró ingresos netos ligeramente positivos en T1 ($0,22$ Bs/m²) y T2 ($0,01$ Bs/m²), mientras que en T3 fue negativo ($-1,51$ Bs/m²), evidenciando que, aunque es más resistente al déficit hídrico que la papa, requiere una mínima disponibilidad de agua para mantener la rentabilidad. Los resultados muestran que el riego cada 5 y 10 días proporcionó los mayores beneficios económicos en la mayoría de los cultivos, especialmente en cebolla y haba, mientras que la reducción del riego afectó negativamente tanto la productividad como el ingreso neto, siendo la papa el cultivo más sensible y menos rentable bajo las condiciones evaluadas.

4.7.3. Relación Beneficio/Costo

Los resultados muestran en el cuadro 20 se observa que todos los tratamientos evaluados fueron económicamente rentables, con valores de B/C superiores a 1, lo que indica que por cada boliviano invertido se obtiene un retorno positivo

Cuadro 20. Relación Beneficio/Costo por tratamiento

Cultivo	Tratamiento	Ingreso Bruto (Bs/m ²)	Costo Producción (Bs/m ²)	B/C
CEBOLLA	T1 - 5 días	10.87	4.80	2.27
	T2 -10 días	7.99	4.65	1.72
	T3 - 15 días	7.42	4.55	1.63
HABA	T1 - 5 días	22.01	3.50	6.29
	T2 - 10 días	19.06	3.35	5.69
	T3 - 15 días	13.55	3.25	4.17
PAPA	T1 - 5 días	1.31	4.10	0.32
	T2 - 10 días	2.33	3.95	0.59
	T3 - 15 días	2.86	3.85	0.74
CENTENO	T1 - 5 días	3.42	3.20	1.07
	T2 - 10 días	3.06	3.05	1.00
	T3 - 15 días	1.44	2.95	0.49

El tratamiento con riego cada 10 días (T2) presentó la relación B/C más equilibrada, reflejando un óptimo balance entre ingresos y costos de producción, debido a un buen desarrollo vegetativo y productivo de los cultivos asociados papa, cebolla, haba y centeno con un uso eficiente del agua y menor competencia radicular.

El riego cada 5 días (T1) generó altos ingresos brutos, pero la relación B/C fue ligeramente menor que T2, debido a mayores costos de mano de obra y riego, sumado al riesgo de exceso de humedad que podría afectar la calidad de algunos cultivos. Por su parte, el riego cada 15 días (T3) presentó la menor relación B/C, indicando que la baja frecuencia de riego limitó la productividad y, en consecuencia, los ingresos, mientras que los costos se mantuvieron constantes.

En general, estos resultados evidencian que un manejo hídrico moderado, como el riego cada 10 días, no solo optimiza la productividad agronómica sino que también maximiza la rentabilidad económica del sistema biointensivo asociado, constituyendo una estrategia eficiente para productores en condiciones de estrés hídrico moderado.

5. CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos en el presente trabajo de investigación, permite llegar a las siguientes conclusiones:

- Los resultados de esta investigación demostraron que el sistema de producción biointensivo asociado responde de manera diferenciada ante diversas frecuencias de riego. Se observó que la frecuencia de riego cada 5 y 10 días permitió obtener los mayores valores en las variables agronómicas evaluadas (altura, diámetro, peso y rendimiento) en los cuatro cultivos cebolla, haba, papa y centeno. Esto evidencia que, incluso en condiciones de estrés hídrico moderado, este sistema puede mantener altos niveles de productividad.
- Analizando las variables agronómicas, se observó el sistema de producción biointensivo asociado responde de manera diferenciada ante distintas frecuencias de riego, influenciando significativamente el comportamiento agronómico y productivo de los cultivos evaluados (cebolla, haba, papa y centeno). Se demostró que una adecuada gestión del agua, especialmente con riego cada 5 y 10 días, favorece variables clave como altura, diámetro, peso y rendimiento, particularmente en especies como la cebolla y el haba, que mostraron alta sensibilidad a la disponibilidad hídrica. Por su parte, la papa presentó mejor respuesta con riego cada 10 días, y el centeno, a pesar de su rusticidad, mejoró su rendimiento con una frecuencia hídrica más constante. En conjunto, estos resultados validan que, bajo condiciones de estrés hídrico moderado, el sistema biointensivo puede mantener una productividad elevada si se optimiza el riego según las exigencias específicas de cada cultivo asociado.
- Las camas elevadas con incorporación de materia orgánica mejoraron la retención de humedad y el drenaje, lo que permitió a los cultivos resistir mejor el estrés hídrico. La combinación de riego adecuado y manejo de camas biointensivas promovió un crecimiento vegetativo robusto, un llenado eficiente de órganos productivos y una acumulación de biomasa más equilibrada, optimizando la productividad del sistema.
- Se registró una baja incidencia de plagas y enfermedades, lo que indica que el sistema biointensivo asociado genera un microclima favorable y un equilibrio ecológico que contribuye al control natural de plagas, reduciendo la dependencia de insumos químicos y favoreciendo la sostenibilidad del sistema.

- El análisis económico realizado permitió determinar que los costos de producción en el sistema biointensivo asociado varían según la frecuencia de riego y los cultivos evaluados, mostrando que un manejo eficiente de los recursos, especialmente del agua y los insumos, puede maximizar la rentabilidad. El tratamiento con riego cada 10 días presentó un equilibrio favorable entre costos y beneficios, evidenciando que una adecuada gestión de insumos y mano de obra contribuye a la sostenibilidad económica del sistema biointensivo.

6. RECOMENDACIONES

En base a los resultados obtenidos en el presente trabajo de investigación recomiendo lo siguiente:

- Se recomienda el tratamiento con riego cada 10 días (T2) como el más adecuado dentro del sistema de producción biointensivo asociado evaluado, ya que este tratamiento presentó un equilibrio óptimo entre rendimiento agronómico y rentabilidad económica. Los resultados muestran que T2 permitió un buen desarrollo en cultivos exigentes como la cebolla y el haba, así como en la papa, generando rendimientos competitivos con menores costos operativos en comparación con el riego más frecuente.
- Aunque el tratamiento con riego cada 5 días (T1) generó los valores más altos en algunas variables agronómicas, presentó mayor incidencia de enfermedades fúngicas debido al exceso de humedad. Por tanto, no se recomienda su implementación a menos que se cuente con un manejo sanitario muy riguroso y disponibilidad suficiente de agua.
- Se recomienda implementar el riego cada 10 días (T2), ya que permite un buen desarrollo de los cultivos asociados y la mejor relación beneficio/costo, asegurando un retorno positivo por cada boliviano invertido y reduciendo los costos operativos innecesarios.
- Desde una mirada pedagógica promover e implementar el modelo de cultivo biointensivo en unidades educativas en regiones andinas con alta vulnerabilidad climática y alimentaria. Esta estrategia permite optimizar el uso de recursos, mejorar la productividad, fomentar la seguridad alimentaria.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- AgronoBlog. 2023. Fenología de la cebolla (*Allium cepa*). AgronoBlog, Agriculture Blog. Disponible en <https://agronoblog.com/etapas-fenologicas/etapas-fenologicas-de-la-cebolla-allium-cepa/>
- Álvarez, J.;Alvarado, O. y Suesca, F. 2017. Efecto de diferentes láminas de riego en el crecimiento y desarrollo de cebolla de bulbo (*Allium cepa*). Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas. 11(2): Consultado 17 may. 2025. Disponible en <http://www.scielo.org.co/>
- Ammar, M.;Anwar, F.;El-Harty, E. y Migdadi, H. 2015. Respuestas fisiológicas y de rendimiento de la haba (*Vicia faba*) al estrés por sequía en entornos de campo abierto y gestionados. Revista de Agronomía y Ciencias de los Cultivos. 201(4): Consultado 17 May. 2025. Disponible en <https://www.researchgate.net/>
- CII-ASDENIC, (Centro de Información e Innovación de la Asociación de Desarrollo Social de Nicaragua). 2016. Manual de cultivo Biointensivo. Estelí, Nicaragua, ASDENIC. 27 p. en línea. Consultado 23 may. 2025. Disponible en https://www.asdenic.org/manual_biointensivo.pdf
- CIMMYT. 1988. La formulación de recomendaciones a partir de datos agronómicos: Un manual metodológico de evaluación económica. México, México: CIMMYT. 79 p. en línea. Disponible en <https://repository.cimmyt.org/server/api/core/bitstreams/ac4c267d-bdf2-4b1c-a46b-97d85442c0eb/content>
- CoCampo. 2020. Impactos de la agricultura intensiva sobre la fertilidad del suelo y el cambio climático. España. Disponible en <https://www.cocampo.com/es/es/noticias/agricultura-intensiva/>
- CONABIO. 2022. Sistema de Información de Organismos Vivos Modificados (*Solanum tuberosum*). 27.Disponible en http://www.conabio.gob.mx/pdf/20914_sg7.pdf
- Dreyer, H. 2018. Propuesta para un Año Internacional del Centeno. (7): Disponible en <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/1f41a3f1-edf2-4313-93c4-2c4e435037dd/content>
- Estrada, W.;Batista, L.;Álvarez, A. y Maceo, Y. 2015. Niveles de humedad en el suelo en la producción de bulbos de cebolla. Agronomía Mesoamericana. 26(1): Disponible en <https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci>
- FAO, (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación) 2006a. Guía para el manejo del riego en cultivos hortícolas. Roma, Italia. FAO Consultado 15 may. 2025. Disponible en <https://www.fao.org/3/y5694s/y5694s.pdf>
- FAO, (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación) 2023. AGROVOC Multilingual Thesaurus. Roma, Italia. Disponible en <https://agrovoc.fao.org/es>
- FAO, (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 2006b. La sequía y la agricultura de secano. Disponible en <https://www.fao.org/3/y5493s/y5493s07.htm>

- FAO, (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 2008. Año Internacional de la Papa 2008: La papa (*Solanum tuberosum*). Disponible en <https://www.fao.org/4/i0500s/i0500s.pdf>
- FAO, (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 2013. El papel del agua en la seguridad alimentaria. Santiago - Chile, Disponible en https://www.fao.org/fileadmin/user_upload/AGRO_Noticias/docs/captacion_agua_d_e_lluvia.pdf?utm.com
- FAO, (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 2002. Tierra y agua. Disponible en <https://www.fao.org/land-water/water/en/>
- FAO, (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 2002b. Promoting coherence and coordination on land and water. Disponible en <https://www.fao.org/land-water/databases-and-software/crop-information/potato/>
- FONTAGRO, (Fondo Regional de Tecnología Agropecuaria). 2023. Manual de Prácticas de Manejo de Humedad del Suelo. América Latina, El Caribe, España, D.C, FONTAGRO. 28 p. en línea Consultado 22 may. 2025. Disponible en <https://www.fontagro.org/new/uploads/productos/.pdf>
- GAMA, G. A. M. d. A. 2021. Planteritorial de desarrollo integral para vivir bien del municipio de achocalla La Paz, Bolivia, 239 p. Disponible en <file:///C:/Users/Usuario/Downloads/Achocalla%20PTDI%202021-2025%20v22..pdf>
- Gómez, N., Villagra, K. & Solorzano, M. 2018. La labranza mecanizada y su impacto en la conservación del suelo. Disponible en <https://dx.doi.org/10.18845/tm.v31i1.3506>
- Gonzales, E.; Pacasa, F. y Hurtado, J. 2022. Sistemas de producción biointensiva y tradicional sobre parámetros agronómicos de hortalizas. Journal of the Selva Andina Biosphere. 10(1): Consultado 17 may. 2025. Disponible en http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S230838592022000100057&lang=es
- Google Earth. 2024. Ubicación geográfica Disponible en <https://earth.google.com/web/@-16.59160923,68.14022514,3679.87049181a,112.40490193d,35y,0h,0t,0r/data=CgRCAggBOgMKATBKDQj8BEAA>
- Grove, I. 2019. Drought impacts on agricultural and horticultural crops. Reino Unido, Disponible en <https://aboutdrought.info/wp-content/uploads/2019/11/Drought-impacts-on-agricultural-and-horticultural-crops.pdf?utm.com>
- Machaca, M. 2022. Efecto de la aplicación de bioinsumos en el cultivo de haba (*vicia faba*) mediante fertirriego por goteo en la estación experimental choquenaira. La Paz Bolivia. Universidad Mayor de San Andrés Facultad de Agronomía 108 p. Disponible en <https://repositorio.umsa.bo/handle/123456789/30147>
- Mahgoub, N.; Ibrahim Mohamed, A.; Sayed, E.; Sikhary, M. y Ali, O. M. 2017. Raíces y distribución de nutrientes bajo riego por goteo y rendimiento de habas y cebollas. Revista Abierta de Ciencias del Suelo 7(2): Consultado 17 May. 2025. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/313647437_Roots_and_Nutrient
- Martínez, Á. y Sandoval, U. 2020. Evaluación del crecimiento y rendimiento de los cultivos asociados maíz (*Zea mays*), tomate (*Solanum lycopersicum*) y camote (*Ipomoea batatas*) en la producción biointensivo bajo riego complementario, finca El Plantel,

- 2019 Tesis Ing. Agr. Managua, Nicaragua Universidad Nacional Agraria Facultad de Agronomía. 45 p.
- Meier, U. 2001. Estadios de las plantas mono-y dicotyledóneas. 2 ed. Alemania, Centro Federal de Investigaciones Biológicas para Agricultura y Silvicultura. 150 p. en línea Consultado 23 may. 2025. Disponible en https://www.openagrar.de/servlets/MCRFileNodeServlet/openagrar_derivate_00010425/BBCH-Skala_spanisch.pdf
- Niebla, L. C. B. d. 2008. Manual del Cultivo Biointensivo de Alimentos. Huatusco, Veracruz, México, Las Cañadas. 43 p. en línea Consultado 22 may. 2025. Disponible en <https://botanicoalcala.es/wp-content/uploads/ManualHuertoBiointensivo-Las-Ca%C3%B1adas-M%C3%A9xico.pdf>
- OAP, (Observatorio Agroambiental y Productivo). 2021. Bolivia: Superficie, Producción y Rendimiento por Año Agrícola según Cultivo, 2017-2018p y 2018-2019p. . La Paz, Bolivia, Ministerio de Desarrollo Rural y Tierras. em línea. Disponible en <https://observatorioagro.gob.bo/wp-content/uploads/2021/11/BOLIVIA-SERIE-AGRICOLA-2017-2018p-y-2018-2019p.pdf>
- Ochoa, R. 2016. Diseños experimentales. La Paz, Bolivia, Ochoa. 43 p.
- Ourproject, B. 2023. Historia del método biointensivo. Valencia, España. Disponible en <https://biointensivo.ourproject.org/historia.html>
- PROINPA, Fundacion. 2009. Conocimiento Local en el Cultivo de la Papa. Cochabamba, Bolivia, 267 p.
- PROINPA. 2019. Cadena agroalimentaria del haba de altura para exportación. Cochabamba, Bolivia, 45 p p. Disponible en <https://www.proinpa.org/web/pdf/Hortalizas%20y%20leguminosas/Haba/Cadena%20agroalimentaria>
- Ramón, C. 2019. Guía técnica cultivo de cebolla. San Lorenzo, Paraguay, Proyectos paquetes tecnologicos. 68 p. Disponible en https://www.jica.go.jp/Resource/paraguay/espanol/office/others/c8h0vm0000ad5gk-e-att/qt_02.pdf
- Reagtools. 2023. The Benefits of Biointensive Gardening: Maximising Productivity in Small Spaces. Disponible en <https://reagtools.co.uk/blogs/news/the-benefits-of-biointensive-gardening-maximizing-productivity-in-small-spaces?srsId=AfmBOooSkpBuLNowbRZFPDIJ4NpH5yRXYzIm9IGzQ8a6XYcPSg3iiKCx&utm.com>
- SEMA, (Secretaría de Medio Ambiente). 2008. Huertos Biointensivos. Saltillo, Coahuila, México, Secretaría de Medio Ambiente del Estado de Coahuila. 39 p. en línea Consultado 22 may. 2025. Disponible en <https://sma.gob.mx/wp-content/uploads/2024/02/Manual-Huertos-Biointensivos.pdf>
- SEMARNAT, (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2013. El huerto familiar biointensivo: introducción al método de cultivo biointensivo, alternativa para cultivar más alimentos en poco espacio y mejorar el suelo. México, D.R. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 45 p. en línea Consultado 22 May. 2025. Disponible en

<https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/Libros2013/CD001599.pdf>

- SENAMHI, (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú). 2017. Manual de Observaciones Fenológicas. Lima, Perú, SENAMHI. 98 p. en línea Consultado 22 may. 2025. Disponible en <https://repositorio.senamhi.gob.pe/handle/>
- Sifuentes, I, E.; Ojeda, B, W.; Macías-Cervantes, J.; Merino, L, R.; Preciado, RI, P. y Ruelas, I, J. 2020. Déficit hídrico controlado y su efecto en el rendimiento y calidad de tres variedades de papa. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 14(8): Consultado 15 may, 2025.
- Simón, X., Montero, M., & Bermúdez, O. (2020). Avanzando en la seguridad alimentaria mediante propuestas tecnológicas agroecológicas: La Aplicación del Método Biointensivo en el Corredor Seco de Nicaragua. *Sustainability*, 12 (3), 844.
- Siñani, W. y Enríquez, M. 2015. Sistema de producción biointensivo: más alimentos en menos espacio. *Apuntes de InvestigAcción*. 3 11. Disponible en https://agroavances.com/img/publicacion_documentos/Sistema%20de%20produccion%20de%20biointensivo.pdf
- Sosa, J.; López, G. y García, J. 2024. Gradiente de humedad en el comportamiento agronómico del centeno cultivado en ambiente de zonas áridas. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*. 11(2): Consultado 15 may. 2025. Disponible en https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S200790282024000200010&lang=es#t1
- Vida, A. y. 2015. El Cultivo de la tierra como un acto de liberación. México, Agua y Vida. 32 p. en línea Consultado 22 may, 2025. Disponible en <https://aguayvida.org.mx/wp-content/uploads/media/uploads/documents/metodo-de-cultivo-biointensivo.pdf>

8. ANEXOS

Anexo 1. Análisis físico y químico del suelo antes de la implementación de camas biointensivas



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°1077/24

INTERESADO:
RESPONSABLE DE ANALISIS:
SOLICITUD:
FECHA DE ENTREGA:
RESPONSABLE DE MUESTREO:
PROCEDENCIA:

FUNDACION PRODIASUR
 Ing. Elizabeth Yujra Ticona
 LAFS24_345
 04/11/2024
 FUNDACION PRODIASUR
 Departamento LA PAZ
 Municipio ACHOCALLA
 Provincia MURILLO
 Comunidad CARCANAVI

ANÁLISIS FÍSICO QUÍMICO DE SUELOS

PARAMETRO	UNIDAD	RESULTADO	MÉTODO
pH en H ₂ O relación 1:2,5	-	6.64	Potenciometría
Potasio intercambiable	meq/100g S.	0.245	Acetato de amonio 1N (Espectrofotómetro de emisión atómica)
Nitrógeno total	%	0.11	Kjendahl
Materia orgánica	%	1.69	Walkley y Black
Fósforo disponible	ppm	26.4	Espectrofotometría UV-Visible

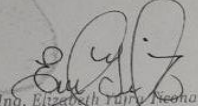
* El informe de laboratorio es válido si se prestan las firmas y sellos correspondientes

* En caso de que el laboratorio no efectuó el muestreo, no es responsable para la representatividad, ni la preservación de la muestra

* Está prohibido la reproducción total o parcial de este documento sin previa autorización escrita del laboratorio



Ing. Roberto Miranda C. Ph.D.
RESPONSABLE
 LABORATORIO DE SUELOS Y AGUAS LAFASA



Ing. Elizabeth Yujra Ticona
ANALISTA FÍSICOQUÍMICO
 DE SUELOS AGUAS Y VEGETALES
 LABORATORIO DE SUELOS Y AGUAS LAFASA

Dirección: Av. Landaeta esq. Héroes del Acre N.º 1850.
 Telf. IIAREN: 2484647 - 74016356 - 73075326 • E-mail: lafasa.suelos@gmail.com
 Página web: agro.umsa.bo • La Paz - Bolivia

Anexo 2. Análisis físico y químico del suelo durante la implementación de camas biointensivas



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°1077/24

INTERESADO:
RESPONSABLE DE ANALISIS:
SOLICITUD:
FECHA DE ENTREGA:
RESPONSABLE DE MUESTREO:
PROCEDENCIA:

FUNDACION PRODIASUR
 Ing. Elizabeth Yujra Ticona
 LAFS24_244
 10/10/2024
 FUNDACION PRODIASUR
 Departamento LA PAZ
 Municipio ACHOCALLA
 Provincia MURILLO
 Comunidad CARCANAVI

PARAMETRO	UNIDAD	RESULTADO	MÉTODO
pH en H ₂ O relación 1:2.5	-	6.59	Potenciometría
Potasio intercambiable	mcq/100g S.	0.444	Acetato de amonio 1N (Espectrofotómetro de emisión atómica)
Nitrógeno total	%	0.09	Kjendahl
Materia orgánica	%	0.88	Walkley y Black
Fósforo disponible	ppm	6.22	Espectrofotometría UV-Visible

* El informe de laboratorio es válido si se prestan las firmas y sellos correspondientes
 * En caso de que el laboratorio no efectuó el muestreo, no es responsable para la representatividad, ni la preservación de la muestra
 * Está prohibido la reproducción total o parcial de este documento sin previa autorización escrita del laboratorio



Ing. Roberto Miranda C. Ph.D.
RESPONSABLE
 LABORATORIO DE SUELOS Y AGUAS LAFASA



Ing. Elizabeth Yujra Ticona
ANALISTA FÍSICOQUÍMICO
 DE SUELOS AGUAS Y VEGETALES
 LABORATORIO DE SUELOS Y AGUAS LAFASA

Dirección: Av. Landaeta esq. Héroes del Acre N.º 1850,
Telf. IIAREN: 2484647 - 74016356 - 73075326 • **E-mail:** lafasa.suelos@gmail.com
Página web: agro.umsa.bo • La Paz - Bolivia

Anexo 3. Costo de producción

N.	Descripción	Unidad	Cantidad	C.U. (Bs)	Costo Total T1 (Bs)	Costo Total T2 (Bs)	Costo Total T3 (Bs)
Material vegetal y mano de obra							
1	Semilla y plantines	Lote	1	15	15	15	15
2	Mano de obra (3 jornales)	Jornal	3	100	200	200	200
Subtotal material							
material de campo							
1	Guano (2 bolsas)	Bolsa	2	20	40	40	40
2	Turba (1 saco)	Saco	1	20	20	20	20
4	Riego (agua de lluvia)	Est. mensual	5	15	25	25	25
	Total CP			170	300	300	300

Anexo 4. Promedio de las variables de respuesta de cada cultivo

PROMEDIO DEL CULTIVO DE CEBOLLA						
REP	TRA	PP (%)	AP (cm)	DB (cm)	PB (g)	RENDIMIENTO t/ha
I	T1 (5 días)	87,5	55,9	5,8	152,4	15,87
I	T3 (15 días)	87,5	47,6	4,2	87,4	9,7
I	T2 (10 días)	87,5	49,3	4,8	100,6	10,21
II	T2 (10 días)	93,8	50,5	4,3	120,8	11,31
II	T3 (15 días)	87,5	45,5	4,3	86	10,17
II	T1 (5 días)	99,0	54,6	5,9	153,2	15,26
III	T1 (5 días)	93,8	49,8	5,7	150,8	14,09
III	T3 (15 días)	87,5	46,5	4,2	86,6	10,99
III	T2 (10 días)	87,5	50,9	4,6	110,4	11,79

PROMEDIO DEL CULTIVO DE HABA

REP	TRA	PG (%)	AP (cm)	LVP (cm)	PVP(g)	RENDIMIENTO t/ha
I	T1 (5 días)	85,7	143,5	12,07	743,8	16,94
I	T3 (15 días)	99,0	129,3	11,03	383	10,62
I	T2 (10 días)	75,6	131,8	11,11	555,4	13,43
II	T2 (10 días)	75,6	134,3	11,44	539,2	14,27
II	T3 (15 días)	75,6	130,6	10,45	388,8	10,08
II	T1 (5 días)	92,9	144,8	12,49	732,4	15,01
III	T1 (5 días)	75,6	145,1	12,05	733,2	16,96
III	T3 (15 días)	92,9	133,7	10,63	378,8	9,41
III	T2 (10 días)	99,0	136,2	11,06	551,2	14,65

PROMEDIO DEL CULTIVO DE PAPA

REP	TRA	PG (%)	AP (cm)	DTP (cm)	PTP(g)	RENDIMIENTO t/ha
I	T1 (5 días)	87,5	65,1	4,5	199,2	3,04
I	T3 (15 días)	87,5	51,5	5,3	367,8	5
I	T2 (10 días)	99	59,9	4,72	377,4	6,33
II	T2 (10 días)	99	58,26	4,9	357,4	6,36
II	T3 (15 días)	99	51,4	5,5	382,2	5,07
II	T1 (5 días)	99	64,2	4,62	186,6	2,92
III	T1 (5 días)	99	64	4,46	172	2,81
III	T3 (15 días)	99	51,2	5,44	366,6	5,43
III	T2 (10 días)	99	60,2	4,84	339,6	6,35

PROMEDIO DEL CULTIVO DE CENTENO

REP	TRA	PG (%)	AP (cm)	NGE	PGE(g)	RENDIMIENTO tn/ha
I	T1 (5 días)	85,7	158,1	59	3,5	2,06
I	T3 (15 días)	99,0	143,5	52	2,7	0,88
I	T2 (10 días)	75,6	152,9	51	2,6	1,51
II	T2 (10 días)	75,6	152,3	51	2,6	1,88
II	T3 (15 días)	75,6	143,8	52	2,7	0,74
II	T1 (5 días)	92,9	158,0	60	3,6	1,96
III	T1 (5 días)	75,6	158,4	59	3,6	1,76
III	T3 (15 días)	92,9	147,1	52	2,6	0,78
III	T2 (10 días)	99,0	152,7	50	2,5	1,66

Anexo 5. siembra de las 3 camas biointensivas.



Anexo 6. Germinado de los cultivos en camas biointensivas.



Anexo 7. Control de humedad en camas biointensivas durante las lluvias.



Anexo 8. Desmalezado de las camas biointensivas.



Anexo 9. Riego manual a los cultivos de las camas biointensivas.



Anexo 10. Toma de datos del cultivo de haba (*Vicia faba*).



Anexo 11. Toma de datos del cultivo de cebolla (*Allium cepa*).



Anexo 12. Toma de datos del cultivo de papa (*Solanum tuberosum*).



Anexo 13. Toma de datos del cultivo de centeno (*Secale cereale*).

