

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



**TESIS DE GRADO**

**EVALUACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE UNA PRADERA DE  
ALFALFA (*Medicago sativa* L.) ASOCIADA CON FESTUCA  
(*Festuca arundinaceae* Scherb.) BAJO DIFERENTES LÁMINAS DE  
RIEGO Y PROFUNDIDADES DE APLICACIÓN DE FÓSFORO  
EN CHOQUENAIRA (Viacha prov. Ingavi)**

**VENANCIO TAZOLA QUISPE**

La Paz – Bolivia

2007

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

**EVALUACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE UNA PRADERA DE  
ALFALFA (*Medicago sativa* L.) ASOCIADA CON FESTUCA (*Festuca  
arundinaceae* Scherb.) BAJO DIFERENTES LÁMINAS DE RIEGO Y  
PROFUNDIDADES DE APLICACIÓN DE FÓSFORO EN  
CHOQUENAIRA (Viacha prov. Ingavi)**

*Tesis de Grado presentado como requisito  
parcial para obtener el título de  
Ingeniero Agrónomo*

**VENANCIO TAZOLA QUISPE**

**TUTOR:**

**Ing. Ph. D. José Bernardo Soliz Guerrero** .....

**ASESOR:**

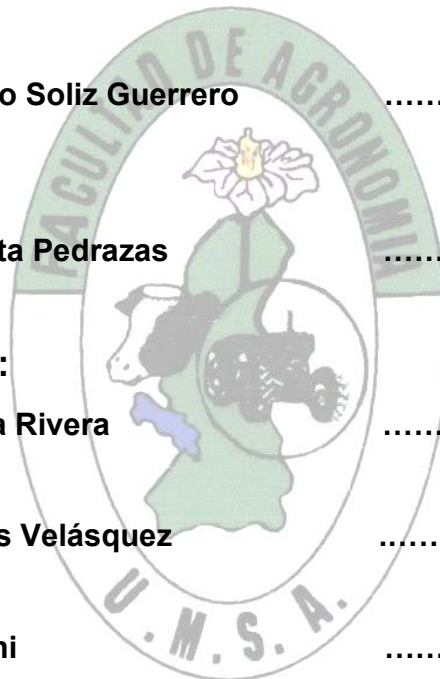
**Ing. M. Sc. Hugo Mendieta Pedrazas** .....

**TRIBUNAL REVISOR:**

**Ing. Ph. D. René Chipana Rivera** .....

**Ing. M. Sc. David Morales Velásquez** .....

**Ing. Eliseo Quino Mamani** .....



**APROBADA**

**Presidente:** .....

## *Dedicatoria*

*Con mucho afecto para Jamil, Jasser, Frida, Néstor, Modesta y mis  
padres Pedro y Desideria*

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Cooperación Española (Ayuda en Acción), el CIPCA y el proyecto CEDE-AG, por la cooperación económica y logística proporcionada, para la ejecución del presente trabajo de investigación.

A la Facultad de Agronomía de la Universidad Mayor de San Andrés, a sus Autoridades, al personal Docente y Administrativo, por hacer de la educación superior una tarea responsable para el bienestar de la sociedad y el País.

Al Director de la Estación Experimental de Choquenaira de la Facultad de Agronomía, tutor del presente trabajo Ing. Ph. D.J. Bernardo Solíz G. por la cooperación y la orientación prestada, durante el desarrollo del presente trabajo de investigación.

Al Ing. M. Sc. Hugo Mendieta P. por el asesoramiento y la orientación efectuada durante el desarrollo del trabajo de campo.

Al tribunal revisor, Ing. Ph. D. René Chípana, Ing. M. Sc. David Morales e Ing. Elíseo Quíno por las correcciones y la orientación del trabajo, para que esta cumpla las características de una investigación que contribuya al mejoramiento de la agricultura de la región.

Un reconocimiento particular al Ing. Oliver Villarreal, por las sugerencias y la cooperación manifestada durante la redacción del presente trabajo, la amistad y el compañerismo expresado en el transcurso de mi carrera universitaria.

Un agradecimiento especial para Omar, Jorge, Antonio, Osvaldo, Álvaro, Edil, Ruddy, Eduardo, Octavio, Claudia, Flor Patricia, Erika, Yenny, Aurora, María, Janette y Gabriela por el compañerismo y el apoyo manifestado durante el desarrollo del presente trabajo.

## CONTENIDO

	<i>Página</i>
ÍNDICE DE TEXTO.....	<i>i</i>
ÍNDICE DE CUADROS.....	<i>iv</i>
ÍNDICE DE FIGURAS.....	<i>v</i>
ÍNDICE DE ANEXOS.....	<i>vi</i>
RESUMEN.....	<i>vii</i>
SUMMARY.....	<i>ix</i>
<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>2. OBJETIVOS.....</b>	<b>2</b>
2.1. Objetivo general.....	2
2.2. Objetivos específicos.....	2
<b>3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>3</b>
3.1. Características botánicas de las especies forrajeras.....	3
3.1.1. Alfalfa.....	3
3.1.1.1. Clasificación taxonómica de la Alfalfa.....	3
3.1.1.2. Importancia de la alfalfa.....	3
3.1.1.3. Características nutricionales de la alfalfa.....	4
3.1.1.4. Rendimiento de materia seca y las necesidades de agua de la alfalfa.....	5
3.1.2. Festuca alta.....	5
3.1.2.1. Clasificación taxonómica de la Festuca alta.....	5
3.1.2.2. Rendimientos de materia seca y necesidades de agua de la festuca alta.....	6
3.1.3. Asociación de la alfalfa con las gramíneas forrajeras.....	6
3.2. Recursos hídricos del Altiplano.....	7
3.2.1. Características hidrográficas del altiplano.....	7
3.2.2. Características hidrológicas del altiplano norte.....	7
3.2.3. Características meteorológicas del altiplano.....	8
3.2.3.1. Precipitación pluvial.....	8
3.2.3.2. Temperatura y humedad relativa.....	8
3.3. El riego.....	8
3.3.1. Características y sistemas de riego en el altiplano.....	8
3.3.2. Propósitos del riego.....	9
3.3.3. El riego por aspersión.....	9
3.3.3.1. Factores edafológicos que afectan al riego por aspersión.....	10
a) Propiedades físicas del suelo.....	10
b) Propiedades químicas del suelo.....	10
3.3.3.2. Factores climáticos que afectan al sistema de riego por aspersión.....	11
a) Viento.....	11
b) Calidad del agua.....	11
3.3.3.3. Evapotranspiración.....	11
3.3.3.4. Diseño y componentes del sistema de riego por aspersión.....	12
3.3.3.5. Factores socio-económicos y el problema del uso de los recursos productivos.....	12
3.4. Fertilizantes fosfatados.....	13
3.4.1. Características de los fertilizantes fosfatados.....	13
3.4.2. Importancia del fósforo en las plantas.....	13
3.4.3. Características del fósforo en el suelo.....	13
3.4.4. Fuentes de los fertilizantes fosfatados.....	14
3.4.5. El fósforo en la producción de alfalfa.....	14

3.4.5.1.	Fertilización fosfatada en las praderas de alfalfa.....	14
3.4.5.2.	Métodos de fertilización fosfatada.....	15
3.4.6.	Disponibilidad del fósforo en los suelos del altiplano norte y central.....	15
3.5.	Importancia de la aireación del suelo en el desarrollo de las plantas.....	15
<b>4.</b>	<b>MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>16</b>
4.1.	Descripción de la zona de estudio.....	16
4.1.1.	Localización geográfica.....	16
4.1.2.	Clasificación de la zona de vida.....	16
4.1.3.	Descripción climática y del relieve.....	16
4.1.3.1.	Precipitación.....	16
4.1.3.2.	Humedad relativa.....	17
4.1.3.3.	Temperatura.....	17
4.1.3.4.	Viento.....	17
4.1.3.5.	Fisiografía.....	17
4.1.4.	Descripción del suelo y agua.....	18
4.2.	Materiales.....	18
4.2.1.	Materiales de laboratorio.....	18
4.2.2.	Materiales de campo.....	18
4.2.3.	Materiales de gabinete.....	19
4.3.	Metodología.....	19
4.3.1.	Planificación.....	19
4.3.1.1.	Riego.....	19
4.3.1.2.	Necesidades de la fertilización fosfatada.....	20
4.3.1.3.	Método de fertilización.....	20
4.3.2.	Desarrollo del procedimiento experimental.....	20
4.3.2.1.	Diseño experimental.....	21
4.3.2.2.	Elección del área experimental.....	22
4.3.2.3.	Croquis del experimento.....	23
4.3.2.4.	Profundidad de mayor densidad radicular de la alfalfa y la festuca alta.....	24
4.3.2.5.	Características físicas y químicas del suelo.....	24
4.3.2.6.	Diseño del sistema de riego.....	25
a)	Pruebas del caudal y presión del sistema de riego.....	25
b)	Determinación de los coeficientes hídricos del suelo.....	25
c)	Infiltración del agua en el suelo.....	26
4.3.2.7.	Diseño agronómico.....	26
4.3.2.8.	Diseño hidráulico.....	26
4.3.2.9.	Características físicas y químicas del agua de riego.....	27
a)	Calidad del agua de riego.....	27
b)	Fuente del agua de riego.....	28
4.3.2.10.	Láminas de Riego.....	28
a)	Precipitación efectiva.....	29
b)	Evapotranspiración (ET) y el Coeficiente de cultivo (kc).....	29
c)	Aplicación de las láminas semanales de riego.....	29
4.3.2.11.	Fertilización fosfatada.....	31
a)	Disponibilidad del Fósforo en el suelo.....	31
b)	Profundidad de mayor actividad radicular de la alfalfa.....	31
c)	Densidad aparente y peso de la capa arable del suelo.....	32
d)	Cantidad, tipo fertilizante y profundidad de fertilización.....	32
e)	Profundidades del roturado parcial espaciado.....	33
f)	Método de fertilización.....	33

4.3.2.12.	<i>Evaluación del sistema de riego.....</i>	33
4.3.2.13.	<i>Humedad del suelo.....</i>	34
4.3.2.14.	<i>Disponibilidad del agua en el suelo.....</i>	35
4.3.3.	<i>Fase de evaluación.....</i>	36
4.3.3.1.	<i>Altura de planta de la alfalfa y la festuca alta.....</i>	36
4.3.3.2.	<i>Rendimiento de materia seca de la alfalfa y la festuca alta.....</i>	37
4.3.3.3.	<i>Relación hoja/tallo de la alfalfa.....</i>	38
4.3.3.4.	<i>Eficiencia del uso de agua de la alfalfa.....</i>	38
4.3.3.5.	<i>Análisis del costo de producción de una pradera de alfalfa asociada con festuca alta bajo riego por aspersión y fertilización fosfatada.....</i>	39
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIONES.....</b>	<b>41</b>
5.1.	<i>Análisis del efecto de las láminas de riego en las variables de respuesta.....</i>	41
5.1.1.	<i>Rendimiento de materia seca de la alfalfa por las diferentes láminas de riego.....</i>	41
5.1.2.	<i>Regresión y correlación lineal de la materia seca por la altura de planta en la producción de la alfalfa.....</i>	47
5.1.3.	<i>Altura de planta de la alfalfa por el efecto de las diferentes láminas de riego.....</i>	48
5.1.3.1	<i>Altura de crecimiento diario de la alfalfa.....</i>	49
5.1.3.2.	<i>Tasa de crecimiento absoluto de la alfalfa.....</i>	50
5.1.4.	<i>Relación hoja/tallo de la alfalfa por el efecto de las láminas de riego.....</i>	51
5.1.4.1.	<i>Análisis de la relación hoja/tallo de la alfalfa.....</i>	52
5.2.	<i>Análisis del efecto de las profundidades del roturado parcial espaciado en las variables de respuesta.....</i>	57
5.2.1.	<i>Rendimiento de materia seca de la alfalfa por el efecto de las profundidades.....</i>	57
5.2.2.	<i>Altura de planta de la alfalfa por el efecto de las profundidades.....</i>	59
5.2.3.	<i>Relación hoja/tallo de la alfalfa por el efecto de las profundidades.....</i>	61
5.3.	<i>Análisis del efecto de los niveles de fertilización fosfatada en las variables de respuesta.....</i>	62
5.3.1.	<i>Rendimiento de materia seca de la alfalfa por el efecto de la fertilización fosfatada..</i>	62
5.4.	<i>Análisis estadístico de Tukey de la interacción de los factores de estudio en las variables de respuesta.....</i>	69
5.4.1.	<i>Rendimiento de materia seca de la alfalfa por la interacción del riego por las profundidades.....</i>	69
5.4.2.	<i>Rendimiento de materia seca de la alfalfa por la interacción de las láminas de riego por los niveles de fósforo.....</i>	71
5.4.3.	<i>Altura de la alfalfa por la interacción del riego por las profundidades.....</i>	73
5.5.	<i>Eficiencia en el uso de agua de la alfalfa.....</i>	74
5.6.	<i>Rendimiento de materia seca de la Festuca alta por la aplicación de las diferentes láminas de riego.....</i>	76
5.7.	<i>Análisis económico de la producción de alfalfa asociada con festuca alta bajo riego por aspersión y profundidades de fertilización fosfatada.....</i>	77
5.7.1.	<i>Costos fijos y costos variables.....</i>	77
5.7.2.	<i>Precio de campo.....</i>	78
5.7.3.	<i>Relación de beneficio/costo.....</i>	78
5.7.4.	<i>Tasa de retorno marginal.....</i>	79
5.7.5.	<i>Tasa mínima de retorno aceptable.....</i>	80
5.7.6.	<i>Residuos.....</i>	80
<b>6.</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>81</b>
<b>7.</b>	<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>83</b>
<b>8.</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>85</b>
<b>9.</b>	<b>ANEXOS.....</b>	<b>90</b>

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro N°	Página
3.1. Composición bromatológica de las hojas y los tallos de la alfalfa en base a materia seca...	4
3.2. Contenido proteínico y energético de la alfalfa en base a materia seca.....	4
3.3. Composición bromatológica de la festuca alta en base a materia seca.....	6
3.4. Disponibilidad del fósforo en los suelos del altiplano Norte y Central.....	15
4.1. Parámetros climáticos del municipio de Viacha.....	17
4.2. Niveles de los factores de estudio.....	21
4.3. Combinación de factores que determinan los tratamientos del estudio.....	21
4.4. Características dimensionales del área del experimento.....	22
4.5. Características físicas del suelo del área experimental.....	24
4.6. Características químicas del suelo del área experimental.....	24
4.7. Diseño agronómico de las láminas A3 (32 mm/semana) y A2 (21 mm/semana).....	26
4.8. Diseño hidráulico de las láminas A3 (32 mm/semana) y A2 (21 mm/semana).....	27
4.9. Análisis físico-químico del agua de riego.....	28
4.10. Niveles de las láminas de riego a aplicarse en la pradera de alfalfa asociada con festuca alta.....	28
4.11. Distribución semanal de las láminas de riego.....	30
4.12. Lámina media del agua (LA) en el suelo entre los intervalos de riego.....	35
5.1. Rendimiento de materia seca de la alfalfa por el efecto de las láminas de riego.....	41
5.2. Análisis de varianza del rendimiento de materia seca de la alfalfa por cortes.....	42
5.3. Regresión y correlación lineal de la materia seca con la altura de planta.....	47
5.4. Análisis de varianza de la altura de planta de la alfalfa por cortes.....	48
5.5. Altura media de la alfalfa por cortes.....	48
5.6. Altura media del crecimiento diario de la alfalfa.....	50
5.7. Tasa media del crecimiento absoluto de la alfalfa.....	50
5.8. Análisis de varianza de la relación hoja/tallo de la alfalfa por cortes.....	52
5.9. Relación hoja/tallo de la alfalfa por el efecto de las diferentes láminas de riego.....	55
5.10. Rendimiento de materia seca de la alfalfa por el efecto de las profundidades.....	57
5.11. Altura media de la alfalfa por el efecto de las profundidades.....	60
5.12. Relación hoja/tallo de la alfalfa por el efecto de las profundidades.....	61
5.13. Rendimiento de materia seca de la alfalfa por el efecto de la aplicación de los diferentes niveles de fósforo.....	63
5.14. Análisis de la disponibilidad del fósforo en el suelo de la pradera asociada.....	64
5.15. Disponibilidad del fósforo en la pradera de alfalfa asociada con festuca alta.....	65
5.16. Rendimiento de materia seca de la alfalfa por la interacción de las láminas de riego por las profundidades.....	69
5.17. Análisis de Tukey del rendimiento de materia seca de la alfalfa por el efecto de la Interacción de las láminas de riego por las profundidades.....	70
5.18. Rendimiento de materia seca de la alfalfa por la interacción de las láminas de riego por los niveles de fertilización fosfatada.....	71
5.19. Altura de la alfalfa por la interacción del riego por las profundidades.....	73
5.20. Materia seca de la alfalfa por el volumen del agua utilizada.....	74
5.21. Producción de materia seca y altura de planta de la festuca alta.....	76
5.22. Estructura de costos.....	77
5.23. Estructura del precio de campo de la alfalfa y la festuca alta.....	78
5.24. Análisis de la relación beneficio/costo de la pradera asociada de alfalfa con festuca alta...	78
5.25. Análisis de la tasa de retorno marginal.....	79
5.26. Costos de oportunidad del capital y residuos.....	80



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura Nº	Página
4.1. Croquis del experimento.....	23
4.2. Representación gráfica de la humedad de suelo.....	35
4.3. Variación de las láminas de agua en el suelo entre los intervalos de riego.....	36
5.1. Rendimiento anual y por cortes de materia seca de la alfalfa, por la aplicación de las diferentes láminas de riego por aspersión.....	43
5.2. Rendimiento de materia seca de la alfalfa con relación a la lámina de agua aplicada en cada periodo de corte.....	44
5.3. Rendimiento de materia seca de la alfalfa con relación a la precipitación pluvial, en los tratamientos sin riego (testigo).....	45
5.4. Comparación de las láminas de riego aplicadas en la pradera, con la precipitación y la evapotranspiración semanal registrada en la zona.....	47
5.5. Tasa de crecimiento absoluto de la alfalfa (TCA), analizada a partir del incremento de la temperatura mínima.....	51
5.6. Variación de la relación hoja/tallo de la alfalfa, con relación a la longitud del tallo.....	53
5.7. Contenido de materia seca en las hojas y tallos de la alfalfa, con relación a la altura de planta.....	54
5.8. Variación de la relación hoja/tallo con la altura de planta en la alfalfa.....	55
5.9. Relación hoja/tallo de la alfalfa, por la aplicación de las diferentes láminas de riego.....	56
5.10. Rendimiento de materia seca de la alfalfa por el efecto de las profundidades.....	58
5.11. Altura media de la alfalfa por el efecto de las profundidades del roturado parcial espaciado	60
5.12. Rendimiento de materia seca de la alfalfa, por el efecto de los diferentes niveles de fertilización fosfatada.....	63
5.13. Relación de disponibilidad del fósforo asimilable (ppm) en el suelo de la pradera asociada elaborada en base a los análisis químicos del suelo.....	65
5.14. Disponibilidad del fósforo en el suelo con relación al pH y materia orgánica.....	66
5.15. Disponibilidad del fósforo asimilable en el suelo, con relación al contenido de Calcio (meq/100g suelo), el porcentaje de arena y arcilla.....	67
5.16. Disponibilidad del Fósforo en el suelo (ppm) con relación al contenido de Calcio (meq/100 g de suelo).....	68
5.17. Variación del pH del suelo de la pradera de alfalfa, con relación a la precipitación pluvial registrada durante la gestión agrícola 2005-2006.....	68
5.18. Disponibilidad del fósforo en función a la textura del suelo y el porcentaje de saturación del Calcio ( $PSCa^{2+}$ ), en los suelos de la región.....	69
5.19. Análisis del rendimiento de materia seca de la alfalfa, por la interacción de las láminas de riego por las profundidades.....	70
5.20. Rendimiento de materia seca de la alfalfa, por la interacción de las láminas de riego por los niveles de fertilización fosfatada durante el tercer corte.....	72
5.21. Volúmenes del agua utilizado en la transformación de materia seca de la alfalfa.....	75

## ÍNDICE DE ANEXOS

### Anexo N°

- A.1. *Distribución de la densidad radicular de la alfalfa en la capa arable del suelo*
- A.2. *Distribución de la densidad radicular de la festuca alta en la capa arable del suelo*
- A.3. *Determinación de los coeficientes hídricos del suelo CC y PMP por el método gravimétrico*
- A.4. *Determinación de los coeficientes hídricos del suelo (CC y PMP) por la fórmula de Peele y Briggs (Fuentes, 1998)*
- A.5. *Cálculo de la velocidad de infiltración del agua en el suelo (VIB)*
- A.6. *Diseño agronómico del sistema de riego por aspersión de la lámina A3*
- A.7. *Diseño hidráulico del sistema de riego por aspersión de la Lámina A3*
- A.8. *Diseño agronómico de la lámina A2*
- A.9. *Diseño hidráulico de la lámina A2*
- A.10. *Características físico-químicas del agua de riego*
- A.11. *Determinación del pH y temperatura del agua de riego en campo*
- A.12. *pH de la solución suelo-agua de riego en campo, mediante el Waterprof HI 98127*
- A.13. *Evaluación de la aplicación del agua de riego en la lámina A3*
- A.14. *Parámetros de evaluación de la lámina A3 (32 mm/semana) y A2 (21 mm/semana)*
- A.15. *Cálculo de la cantidad de fósforo complementado al suelo*
- A.16. *Cálculo de la cantidad de fertilizante (FMA) utilizado en la investigación*
- A.17. *Datos climáticos correspondientes al periodo de producción de la pradera asociada*
- A.18. *Relación de la tensión de humedad y lámina de agua del suelo*
- A.19. *Relación de la lámina de agua y la tensión de humedad en el suelo*
- A.20. *Características de los aspersores RAIN BIRD 30H de la lámina A3*
- A.21. *Significancia estadística del análisis de varianza de materia seca de la alfalfa por cortes*
- A.22. *Significancia estadística del análisis de varianza de la altura de planta por cortes*
- A.23. *Significancia estadística del análisis de varianza de la relación hoja/tallo por cortes*
- A.24. *Descripción de costos de los componentes del sistema de riego*
- A.25. *Descripción de los costos fijos de establecimiento de la pradera asociada*
- A.26. *Costos variables de operación del sistema de riego y el manejo de la pradera asociada*
- A.27. *Determinación del precio de campo de la alfalfa*
- A.28. *Costos fijos anuales de las láminas A3 y A2*
- A.29. *Determinación del precio comercialización de la alfalfa*
- A.30. *Rendimiento ajustado de la alfalfa y la festuca alta*
- A.31. *Ingresos Brutos (IB)*
- A.32. *Ingresos Brutos de la producción de la pradera asociada*
- A.33. *Flujo de caja que determina el VAN, TIR y el B/C (Yupanqui, 2006)*
- A.34. *Tabla de porcentaje de materia seca para la relación hoja/tallo, según:  $y = 55.116 x^{-1.073}$*
- A.35. *Concentración de Calcio ( $Ca^{x^2}$ ) en el agua del suelo después del riego*
- A.36. *Croquis del diseño del sistema de microriego por aspersión utilizado en la investigación*
- A.37. *Riego en la franja de evaluación de la lámina A3 (32 mm/semana) después del corte*
- A.38. *Proceso de riego de la lámina A3 (32mm/semana) después del corte*
- A.39. *Medición de la humedad del suelo mediante tensiómetros y el sensor de humedad de la estación meteorológica Vantage PRO-2*
- A.40. *Pruebas del pH del suelo mediante el Water PROF HI 8857*
- A.41. *Pruebas del caudal del aspersor RAIN BIRD 30H, de la lámina A3 durante el inicio de la investigación*
- A.42. *Producción de las praderas de alfalfa en condiciones de secano en el inicio del verano*
- A.43. *Producción de la alfalfa en la lámina A3 (32 mm/semana)*
- A.44. *Estación meteorológica Vantage PRO-2*

## **RESUMEN**

*La evaluación de la producción de una pradera de alfalfa (var. Bolivia 2000) asociada con festuca alta, realizada en la Estación Experimental de Choquenaira del Municipio de Viacha, tuvo el objetivo de cuantificar el efecto de las láminas de riego por aspersión y las profundidades de fertilización fosfatada, en la pradera asociada con diez de producción.*

*Los tratamientos aplicados en la pradera, fueron las láminas de riego por aspersión (A3: 32 mm/semana; A2: 21 mm/semana; A1: a seco), las profundidades del roturado parcial espaciado (B1: 0.0 cm; B2: 7.5 cm; B3: 15.0 cm) y la fertilización fosfatada (C1: 7.86 ppm; C2: 17 ppm; C3: 25 ppm), establecidos bajo el diseño de parcelas subdivididas.*

*Como resultado de la aplicación del riego fueron obtenidos 10.4, 5.46 y 2.81 TM, MS ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> correspondientes a las láminas A3, A2 y A1 respectivamente; el cual registró una superioridad del 90.4 y 270 % de los rendimientos de la lámina A3, con relación a los logrados en las láminas A2 y A1 respectivamente, debido a una mayor y permanente humedad registrada en el suelo (24 al 31 %), alrededor del límite superior de la CC (25.4 %).*

*Las profundidades del roturado parcial espaciado, presentaron un efecto significativo en el rendimiento de materia seca, registrando 6.45, 5.89 y 5.15 TM ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, correspondientes a las profundidades B3 (15 cm), B2 (7.5 cm) y B1 (0.0 cm) respectivamente, que representó 9.5 y 25 % superior del rendimiento obtenido a una profundidad B3, con relación a las profundidades B2 y B1 respectivamente, que fue atribuido a la diferencia de aireación del suelo.*

*La interacción de la lámina A3 por la profundidad B3, permitió obtener 11.0 TM, MS ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> y una altura media de la planta de 47.5 cm, que fueron los más altos registrados dentro de la interacción; estableciendo una interacción directa entre estos factores.*

*El rendimiento de materia seca por la aplicación del fósforo (FMA), presentó diferencias estadísticas significativas durante el tercer corte, por el 43 y 40 % de disponibilidad del 100 % aplicado por su elevada fijación registrado en los niveles C2 y C3 respectivamente, debido a un alto porcentaje de saturación de calcio (59.4 %), materia orgánica (4.05 %) y pH ligeramente alcalino del suelo (7.92); donde el rendimiento anual de MS en el nivel C3 registró 6.05 TM ha<sup>-1</sup>, que fue 4.1 y 7.8 % más de materia seca con relación a los obtenidos en los niveles C2 (5.8 TM, MS ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>) y C1 (5.6 TM, MS ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>) respectivamente.*

*La relación hoja/tallo de la alfalfa presentó 1.2, 1.1, 1.0 correspondientes a las láminas A1, A2 y A3 respectivamente, el cual resultó estar en función de la longitud del tallo, al registrar una menor relación hoja/tallo a una mayor altura de planta.*

*La festuca alta presentó una baja densidad dentro los diferentes tratamientos, lo que no permitió realizar el estudio de todos los factores aplicados. Durante la investigación solamente fueron realizados dos cortes, obteniéndose 1.22, 1.02 y 0.89 TM, MS ha<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup> correspondientes a las láminas A3, A2 y A1 reflejando una poca respuesta al riego aplicado.*

*El volumen de agua utilizado en el tratamiento A3B3 para la transformación de materia seca fue de 826.1 l/kg MS, optimizándose en el segundo corte con 682.4 l/kg MS; en cambio el volumen medio utilizado en las láminas A2 y A1 fue de 1567.0 y 2233.8 l/kg MS respectivamente.*

*Los costos de producción evaluados mediante la relación del beneficio/costo, presentaron 2.5, 1.37 y 1.75 correspondiente a las láminas A3, A2 y A1 respectivamente, que reflejó la factibilidad económica de la lámina A3 por el mayor B/C registrado. El tratamiento más rentable y las mayores tasas de retorno marginal, se registraron en los tratamientos bajo la lámina A3 por la profundidad B3 y sin fertilización C1, debido al elevado costo del fertilizante utilizado.*

## **SUMMARY**

*The evaluation of the production of an alfalfa prairie (var. Bolivia 2000) associated with festuca alta, carried out in Choquenaira Experimental Station of the Municipality of Viacha, it had the goal of quantify the effect of the sheets of irrigation and the depths of phosphated fertilization, in the prairie associated with ten years of production.*

*The applied treatments were the spreading watering sheets (A3: 32 mm/week; A2: 21 mm/week; A1: to unirrigated land), the depths of the ploughing partially spaced (B1: 0.0 cm; B2: 7.5 cm; B3: 15 cm) and the phosphated fertilization (C1: 7.86 ppm; C2: 17 ppm; C3: 25 ppm), under the design of subdivided parcels.*

*As result of the application of the irrigation 10.4, 5.46 and 2.81 TM were obtained, MS ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup> corresponding to the sheets A3, A2 and A1 respectively; which one registered a superiority of the 90.4 and 270 % to the yields of the sheet A3, with relationship to those obtained in the sheets A2 and A1 respectively, due to a bigger and permanent humidity registered in the floor (24 al 31 %), around upper limit of the CC (25.4 %).*

*The depths of the ploughing up partially spaced, they had a significant effect in the yield of dry matter, registering 6.45, 5.89 and 5.15 TM ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>, corresponding to the depths B3 (15 cm), B2 (7.5 cm) and B1 (0.0 cm) respectively that represented 9.5 and 25.2 % higher of the yield obtained to a depth B3, with relationship to the depths B2 and B1 respectively, that was attributed to the difference of aeration of the floor.*

*The interaction of the sheet A3 for 15.0 cm of depth allowed to obtain 11.0 TM, MS ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup> and half height of plant of 47.5 cm, being the higher registered inside the interaction; establishing a direct interaction among these factors.*

*The yield of dry matter for the phosphorus application (MAP), presented significant statistical differences during the third court, for the 43 and 40 % of availability of the 100 % applied for the higher fixation registered to the level C2 and C3 respectively, due to the high saturation percentage of calcium (59.4 %), organic matter (4.05 %) and floor with lightly alkaline pH (7.92); where the total dry matter of the level C3 it presented 6.05 TM/ha, that was 4.1 and 7.8 % more of dry matter with relationship to those obtained in the levels C2 (5.8 TM, MS ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>) and C1 (5.6 TM, MS ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>) respectively.*

*The relationship leaf/sprout of the alfalfa presented 1.2, 1.1, 1.0 corresponding to the sheets A1, A2 and A3 respectively, which one resulted to be in function of the longitude from the shaft, when registering an smaller relationship leaf/sprout to a bigger plant height.*

*The festuca alta presented a reduced population inside the different established treatments, what has not allowed to carry out a study of the applied factors. During the alone study two courts were carried out in those that has been obtained 1.22, 1.02 and 0.89 TM, MS ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup> corresponding to the sheets A3, A2 and A1, reflecting a little response to the applied irrigation.*

*The volume of water used in the treatment A3B3 for the transformation of dry matter of the alfalfa was of 826.1 l/kg MS, being optimised in second court with 682.4 l/kg MS; on the other hand the half volume of the water used in the sheets A2 and A1, was of 1567.0 and 2233.8 l/kg MS respectively.*

*The analysis of the production costs by means of the relationship profit/cost (B/C), it presented 2.5, 1.37 and 1.75 for the sheets A3, A2 and A1 respectively, that reflected its economic feasibility in the sheet A3 with the biggest B/C. The most profitable treatment and the biggest marginal analysis rates, it presented in the applied treatments the sheet A3 for the depth B3 and without fertilizer C1, due to the high cost of the fertilizers utilized.*

## 1. INTRODUCCIÓN

A pesar de las irrisorias precipitaciones pluviales que se registran en la región norte del altiplano central, esta zona ha desarrollado una mayor actividad agropecuaria mediante la introducción, adaptación y producción de especies forrajeras pratenses como la alfalfa, la festuca alta y otros, debido a la extensión ocasional de las mayores precipitaciones que se registran en el altiplano norte.

Tanto la alfalfa como la festuca alta, son conocidas en la región como especies forrajeras promisorias, por la tolerancia a las sequías, las bajas temperaturas y el rápido rebrote como respuesta a la aplicación del agua; sin embargo las lluvias erráticas y esporádicas que suelen registrarse en la región, como la escasa y variada disponibilidad del fósforo de los suelos, limitan desarrollar una plena actividad fisiológica y expresar el máximo potencial productivo a estas especies forrajeras.

Entre tanto el incremento de la producción pecuaria de los últimos años en la región, demanda una mayor producción de forrajes; el cual también se ve limitado por la poca disponibilidad de tierras, ocasionado por su constante subparcelación. Sin embargo se ha establecido en la región que la fertilización y el riego, contribuyen favorablemente a la reducción de este problema.

Por esta razón se considera al riego, como uno de los factores más importantes para mejorar la producción forrajera de la región; por lo que en la presente investigación se busca establecer una lámina de riego fraccionada por el método por aspersión, que aporte al suelo una humedad uniforme y duradera, durante la producción de la pradera de alfalfa asociada con festuca alta.

Sobre la base de los argumentos mencionados, se consideró importante estudiar en la producción de la pradera asociada, el efecto de las láminas de riego por aspersión y la fertilización fosfatada, considerando las características del cultivo, suelo, relieve y el agua de la zona.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo General**

Evaluar la producción de una pradera de alfalfa asociada con festuca alta, bajo diferentes láminas de riego por aspersión y diferentes profundidades de aplicación de distintos niveles de fósforo, en Choquenaira Municipio de Viacha.

### **2.2. Objetivos específicos**

- Determinar el efecto de las diferentes láminas de riego por aspersión, en la producción de la pradera asociada de alfalfa con festuca alta.
- Establecer el efecto de los diferentes niveles de fósforo, en la producción de la pradera asociada de alfalfa con festuca alta.
- Determinar el efecto de las profundidades del roturado parcial espaciado, en la producción de la pradera de alfalfa asociada con festuca alta.
- Conocer las interacciones de los factores de estudio, que tienen mayor importancia en la producción de la pradera asociada de alfalfa con festuca alta.
- Analizar los costos de producción de una pradera asociada de alfalfa con festuca alta, bajo condiciones de riego y profundidades de fertilización fosfatada.



### **3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1. Características botánicas de las especies forrajeras**

##### **3.1.1. Alfalfa**

La Alfalfa (*Medicago sativa* L.) es una leguminosa perenne de origen Asiático, vivaz y de porte erecto, de raíz pivotante muy desarrollada con numerosas raíces secundarias, posee una corona de donde emergen brotes, que dan origen a los tallos erguidos y consistentes que soportan el follaje. Las hojas son de borde aserrada con inflorescencias en racimos de color azul o púrpura que nacen en las axilas de las hojas. El fruto es una legumbre indehiscente que contiene de 2 a 6 semillas arriñonadas (Sánchez, 2004).

##### **3.1.1.1. Clasificación taxonómica de la Alfalfa**

De acuerdo a la clasificación taxonómica de Rojas (2000), la alfalfa pertenece a la división: Angiosperma, clase: Dicotiledónea, orden: Rosales, familia: Leguminoceae, sub familia: Papilionoideae, género: Medicago, especie: Sativa.

De la misma forma para Delgadillo y Mendieta (1996), la alfalfa pertenece a la familia: Leguminosae, subfamilia: Papilionoideae, tribu: Trifolieae y género: Medicago.

##### **3.1.1.2. Importancia de la alfalfa**

La importancia de la alfalfa para el MAGDR-PDLA (2001), radica en su amplio rango de adaptación a los diversos tipos de suelos y condiciones climáticas. Su alto contenido de proteínas, minerales y vitaminas, le cualifican como una excelente especie forrajera, para la alimentación del ganado.

Para Sánchez (2004), la alfalfa es la fuente natural más importante de la nutrición animal; asimismo su producción mejora las condiciones físico-químicas del suelo para la rotación de cultivos de la producción de la fauna conservacionista.

### 3.1.1.3. Características nutricionales de la alfalfa

La alfalfa es una especie forrajera que contiene altos niveles de proteínas, vitaminas y energía, también contiene minerales importantes como: el calcio, fósforo, azufre, potasio, magnesio y otros; además contiene elevados niveles de  $\beta$ -carotenos, los cuales según Sánchez (2004), son esenciales en la reproducción de bovinos. En el siguiente Cuadro (3.1) se presenta la composición bromatológica de la alfalfa.

**Cuadro 3.1. Composición bromatológica de las hojas y los tallos de la alfalfa en base a materia seca**

Componente nutritivo	Hojas (%)	Tallos (%)	Promedio (%)
Proteína Bruta	24.0	10.7	17.35
Grasa bruta	3.1	1.3	2.20
Extracto no nitrogenado	45.8	37.3	41.55
Fibra bruta	16.4	44.4	30.40
Cenizas	10.7	6.3	8.50

Fuente: Sánchez (2004).

El valor energético de la materia seca de la alfalfa de acuerdo a Journet (1993), está directamente relacionado con el contenido proteínico de la planta, como se muestra en el siguiente Cuadro (3.2).

**Cuadro 3.2. Contenido proteínico y energético de la alfalfa en base a materia seca**

% PB (s.s.s.)	UFL/kg MS	UFV/kg MS
17	0.75	0.64
19	0.81	0.71
21	0.88	0.79
23	0.95	0.87
25	1.02	0.96

Fuente: Journet (1993)

PB (s.s.s.) = Proteína bruta sobre sustancia seca; UFL = Energía neta para la lactación; UFV = Energía neta para la producción de carne.

Según Alzerréca y Cardozo (1991), el heno de alfalfa contiene en promedio 50.4 % de nutrientes digeribles totales (NDT) y 180.35 Kcal/100 g MS de energía metabolizable (EM); asimismo De Alba (1971), citado por los anteriores autores, señala que la alfalfa contiene en promedio 14.7 % de proteína, con una digestibilidad que alcanza al 72 %.

#### **3.1.1.4. Rendimiento de materia seca y las necesidades de agua de la alfalfa**

Según Mendoza (2004), la producción de la alfalfa bajo riego por aspersión en el altiplano norte, incrementó de 3.97 a 8.38 TM, MS/ha, con una lámina igual a la ET; asimismo Tarqui (2005), reportó en la misma zona un incremento de 2.4 a 18 TM, MS/ha de alfalfa, bajo el mismo método de riego durante el segundo año de producción.

Para Condori (1998), el rendimiento de materia seca de la alfalfa en las regiones secas, usualmente alcanza hasta 4.0 TM/ha; de igual forma Aguilar (2001), citado por Mendoza (2004), señala que la *var. Bolivia 2000* en las zonas secas bajo condiciones de secano, logra hasta de 4.8 TM, MS/ha en los primeros años de producción.

Según Céspedes (1992), la alfalfa requiere de 330 a 600 litros de agua para transformar 1.0 kg de MS; asimismo los estudios realizados por Vivas *et al.*, (1999), en Santa Fe Argentina, muestran que la producción de 1.0 kg de MS de alfalfa utilizó cerca de 563 litros de agua; a sus ves Del Pozo (1971), señala que la alfalfa en Norteamérica requiere de 0.7 a 0.8 m<sup>3</sup> de agua por 1.0 kg de MS.

#### **3.1.2. Festuca alta**

La *Festuca alta* (*Festuca arundinaceae* S.) es una poácea perenne, tolerante a la sequía y adaptada a suelos ligeramente húmedos. El culmo floral es hueco erguido y fuerte con hojas largas, lanceoladas y ásperas. La inflorescencia es en panícula abierta, ramificada, angostas y desordenadas, que alcanzan hasta 51 cm de largo; posee espiguillas elípticas a oblongas de 1.0 a 1.9 cm de longitud, que contienen de 3 a 10 flósculos, de los cuales solo el 50 % producen semillas. (Hannaway *et al.*, 1999).

##### **3.1.2.1. Clasificación taxonómica de la Festuca alta**

De acuerdo a Berlijn y Bernardon (1996), la *Festuca alta* pertenece a las Gramíneas, tribu: Festuceae, género: *Festuca*, especie: *Arundinaceae*, nombre común: *Festuca alta*.

### 3.1.2.2. Rendimientos de materia seca y necesidades de agua de la festuca alta

El rendimiento de materia seca de la festuca alta, en zonas con suelos profundos bajo fertilización nitrogenada y elevadas precipitaciones (900 mm/año), logran fácilmente entre 13.0 a 15.7 TM, MS ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, (Hannaway *et al.*, 1999).

Las producción de las pasturas de festuca alta bajo riego y fertilización nitrogenada y fosfatada, mejoran notoriamente el rendimiento de materia seca y amplían su producción hasta el otoño y parte del invierno (Duhalde, 2000). En el siguiente Cuadro (3.3), se muestra la composición bromatológica de la festuca alta.

**Cuadro 3.3. Composición bromatológica de la festuca alta en base a materia seca**

Descripción del alimento		Fresco estado vegetativo	Fresco inicio de floración	Heno final del estado vegetativo	Heno inicio de floración	Heno floración media	Heno floración completa
TND	(%)	73.00	67.00	76.00	62.00	60.00	58.00
ED	(Mcal/kg)	3.22	2.95	3.35	2.73	2.65	2.56
EM	(Mcal/kg)	2.64	2.42	2.75	2.24	2.17	2.10
EN m	(Mcal/kg)	1.73	1.54	1.82	1.38	1.31	1.24
EN g	(Mcal/kg)	1.11	0.94	1.19	0.80	0.74	0.68
PC	(%)	22.10	16.70	21.30	20.20	16.40	12.10
Ca	(%)	0.51	-	-	-	-	0.41
P	(%)	0.37	-	-	-	-	0.30

Fuente: National Research Council (NRC)

TND = Total de nutrientes digestibles; ED = Energía digestible; EM = Energía metabolizable; ENm = Energía neta para mantenimiento; ENg = Energía neta para ganancia de peso; PC = Proteína cruda; Ca = Calcio; P = Fósforo.

Para Cooper y Morris (1986), la festuca alta es una especie forrajera de larga persistencia, altamente palatable para el consumo del ganado y muy favorable en la implantación asociada con las leguminosas, ya que durante su producción no presenta dominancia.

### 3.1.3. Asociación de la alfalfa con las gramíneas forrajeras

Según Muslera (1984), la asociación de la alfalfa con las gramíneas forrajeras, facilita el manejo de la pradera durante el pastoreo y favorece una mayor producción de forraje por unidad de superficie; sin embargo estas asociaciones, pueden presentar desequilibrios poblacionales después de varios años de producción.

Para Flores y Bryant (1989), citados por Barrientos (2002), las mezclas de las gramíneas forrajeras con la alfalfa, aportan una ración balanceada a la nutrición animal; en cuanto a su producción estas solo requieren la fertilización con elementos como: el fósforo y el potasio, debido a la síntesis del nitrógeno por parte de la alfalfa.

Según Delgadillo y Mendieta (1996), estas mezclas reducen el pisoteo de las pasturas durante el pastoreo y favorecen en parte el control de las malezas; también promueven un mejor desarrollo de las plantas, mediante el uso eficiente de los nutrientes del suelo y aportan una ración balanceada entre carbohidratos y proteínas a la nutrición animal.

## **3.2. Recursos hídricos del Altiplano**

### **3.2.1. Características hidrográficas del altiplano**

De acuerdo a la clasificación de las cuencas inter-departamentales del MDSP (1997), el altiplano es una cuenca formada por cinco subcuencas: la del lago Titicaca (13.206,0 km<sup>2</sup>), el río desaguadero (34.934,0 km<sup>2</sup>), el lago Poopo (16.078,0 km<sup>2</sup>), el salar de Coipasa (23.750,0 km<sup>2</sup>) y la subcuenca del Salar de Uyuni (63.713,0 km<sup>2</sup>).

Según Montes de Oca (1997), la subcuenca de Pucarani a la que pertenece el municipio de Viacha abarca una superficie de 2.630,0 km<sup>2</sup>, donde el agua subterránea se encuentra en forma de acuíferos freáticos y artesianos, con una dirección de flujo sur-este, el mismo que se distribuye en evaporación y descarga subterránea al lago Titicaca.

### **3.2.2. Características hidrológicas del altiplano norte**

Para Botegga y Hoogendam (2004), el descenso de la zona de convergencia intertropical, convierte al verano de la región andina en la época más lluviosa, con el 60 y 80 % de las precipitaciones anuales, en cambio la época seca obedece a la dislocación de la misma hacia el norte; los cuales son separados por dos períodos de transición que se presentan en abril y de septiembre a octubre.

La región norte del altiplano central, presenta una fuerte influencia del ciclo hidrológico del lago Titicaca y la cordillera de La Paz, puesto que las intensas precipitaciones que suelen registrarse en la región sur del lago, ocasionalmente abarcan hasta la región norte del altiplano central (Montes de Oca, 1997).

### **3.2.3. Características meteorológicas del altiplano**

#### **3.2.3.1. Precipitación pluvial**

Según Montes de Oca (1997), el altiplano presenta un reparto pluviométrico claramente diferenciado, que registra entre 100 y 300 mm/año en el altiplano sur y central, de 500 a 700 mm/año en el altiplano norte, 1000 mm/año en la cordillera oriental y 1200 mm/año en el centro del lago Titicaca.

#### **3.2.3.2. Temperatura y humedad relativa**

El clima del altiplano es una función directa de la altitud sobre el nivel del mar, donde el aire enrarecido y diáfano causa una insolación e irradiación muy amplia de poca humedad y sin difusión de calor, los cuales originan temperaturas máximas que alcanzan hasta 25° C y mínimas que disminuyen hasta -26° C (Montes de Oca, 1997).

### **3.3. El riego**

Según la FAO (2006), el riego es la aplicación complementaria del agua a la insuficiente e inoportuna precipitación pluvial, para satisfacer la demanda atmosférica de los cultivos.

#### **3.3.1. Características y sistemas de riego en el Altiplano**

Según el PRONAR (2005), en el Altiplano de La Paz el riego cubre cerca de 2892,0 ha; el cual representaría el 2.4 % de toda el área cultivada, todos ellos aplicados por métodos superficiales, con aguas provenientes de los deshielos y las lluvias, que inicialmente son almacenados en represas o directamente conducidos por medio de canales a los cultivos.

Según Bottega y Hoogendam (2004), la mayoría de los sistemas de riego en el altiplano son de construcción rústica, en base a canales de tierra mezclados con tuberías caseros; en cambio los sistemas mejorados, constan de un mayor número de obras hidráulicas para mejorar el uso del agua, mediante tuberías, rápidas, sifones, acueductos, etc.

Con relación al riego en el altiplano el PRONAR (2002), señala que en esta zona se han desarrollado pequeños áreas de riego (3 a 75 ha), utilizando como fuentes de agua a los ríos, vertientes y pozos, con captaciones enteramente rústicas y en muy pocos casos por bombeo, donde el riego cumple un rol enteramente complementario.

### **3.3.2. Propósitos del riego**

El objetivo del riego según Tarjuelo (2005), es abastecer de agua a los cultivos en forma eficiente y complementaria a las precipitaciones pluviales, sin alterar la fertilidad del suelo y cubrir adicionalmente las necesidades del lavado de las sales del perfil del suelo, para lograr la sostenibilidad del riego.

Para Gurovich (1985), el riego es una alternativa para mejorar la producción de los cultivos agrícolas de las regiones áridas; por ello para hacer efectiva y eficiente el uso de la escasa disponibilidad del agua, el riego debe ser complementado con la fertilización, el drenaje, y otros labores de cultivo, para coadyuvar al mejoramiento de la producción.

En consecuencia el riego es básicamente una operación agrícola, que sirve para cubrir las necesidades de agua de los cultivos junto al drenaje, fertilización, labores de cultivo y otros, para lograr buenas cosechas en zonas con climas secos (Withers y Stanley, 1979).

### **3.3.3. El riego por Aspersión**

De acuerdo a Tarjuelo (1995), el método de riego aspersión posibilita la infiltración de las gotas del agua proyectada en el mismo punto donde caen, asemejando a una lluvia relativamente uniforme e intensa, que cae sobre una parcela de cultivo.

Para Gurovich (1985), este método facilita regar eficientemente en los suelos difíciles de ser regados por otros métodos, por la flexibilidad y el eficiente control de la infiltración y las láminas de aplicación del agua; de la misma forma Mariscal (1994), señala que este método permite suministrar el agua a los cultivos, de forma controlada y fraccionada según sus necesidades hídricas.

### **3.3.3.1. Factores edafológicos que afectan al riego por aspersión**

#### **a) Propiedades físicas del suelo**

Según Chilón (1996), la textura define la retención del agua en el suelo, el cual se mide a través de los coeficientes hídricos como son: la capacidad de campo (CC) y el punto de marchites permanente (PMP), los cuales además permiten estimar la cantidad de agua que puede ser retenido en el perfil de un determinado tipo de suelo.

Para Withers y Stanley (1979), la porosidad define el drenaje, la humedad y la aireación del suelo; al respecto Moya (1998), señala que la arcilla en el suelo aumenta la capacidad de almacenamiento del agua, en cambio un suelo arenoso presenta una baja capacidad de retención de humedad, debido a una mayor circulación del aire y el agua.

#### **b) Propiedades químicas del suelo**

De acuerdo a Fuentes (1998), el mayor contenido de  $\text{Na}^+$  con relación al  $\text{Ca}^{2+}$  en el suelo, reduce la velocidad de infiltración del agua, debido a la disgregación de las partículas del suelo por la acción del  $\text{Na}^+$ ; esta dispersión de las partículas del suelo según Mariscal (1994), origina la disminución de la infiltración del agua, debido al sellamiento del suelo.

Para Gurovich (1985), el mayor radio de hidratación del  $\text{Na}^+$  y su mayor concentración con relación a los cationes divalentes, origina la dispersión de los coloides del suelo causando la sodificación, el mismo que conduce al sellado total o parcial de la superficie del suelo, reduciendo la infiltración del agua y el intercambio gaseoso.



### **3.3.3.2. Factores climáticos que afectan al sistema de riego por aspersión**

#### **a) Viento**

De acuerdo a Mendoza (2004), las velocidades del viento alrededor de 3.5 m/s que suelen registrarse en el altiplano norte, deforman el área de mojado del suelo cuando se riega por el método por aspersión, originando un humedecimiento disparejo del área regado.

Para Gurovich (1985), las velocidades del viento superiores a 4.2 o 5.5 m/s hacen poco recomendables el uso del riego por aspersión; por lo que recomienda disponer la línea lateral, en forma perpendicular a la dirección predominante de los vientos para lograr una mayor uniformidad en la distribución del agua sobre el área proyectado.

#### **b) Calidad del agua**

Según Gurovich (1985), la calidad del agua de riego está definida por su composición físico-química, adquiridos en las obras de toma, los cuales pueden reducir la eficiencia en la conducción y distribución del agua del sistema; al respecto Mariscal (1994), señala que la calidad del agua de riego está determinada, por el contenido de sales y de los sólidos en suspensión.

Según Orsag (1992), la calidad físico-químico del agua del altiplano, disminuye en forma global de norte a sur por el aumento de las sales disueltas, originado por el clima y la geología de la zona. Sin embargo tanto la calidad como la cantidad del agua de la región, son consideradas aptas para el riego.

### **3.3.3.3. Evapotranspiración**

Según la FAO (2006), la evapotranspiración es el proceso simultaneo de la evaporación del suelo y la transpiración del cultivo, los cuales están fundamentalmente afectados por las variables climáticas, factores de cultivo, manejo y de las condiciones ambientales.

Para García (1992), la evapotranspiración es la pérdida de agua hacia la atmósfera, por evaporación desde cualquier superficie evaporante y la transpiración vegetal existente en dicha superficie; además su determinación es esencial para estudios de balance hídrico.

#### **3.3.3.4. Diseño y componentes del sistema de riego por aspersión**

Para Fuentes (1998), el diseño del sistema riego proporciona todos los aspectos técnicos para lograr un reparto uniforme del agua en base al: diseño agronómico que toma factores relacionados al medio y el cultivo; en cambio el diseño hidráulico permite dimensionar en forma adecuada la red de conducción del sistema de riego.

Según Tarjuelo (2005), el diseño agronómico determina las necesidades de agua de los cultivos y los parámetros de riego: dosis, caudal, frecuencia, tiempo de riego, número y disposición de aspersores; en cambio el diseño hidráulico, determina las variaciones del caudal, las pérdidas de carga y la dimensión adecuada de los ramales.

El sistema de riego por aspersión según Sánchez (2005), está conformado por: el grupo de bombeo, tuberías, aspersores, accesorios (válvulas, filtros, fittings, amortiguadores, manómetros, etc.) y sistemas de control manual o automatizado.

#### **3.3.3.5. Factores socio-económicos y el problema del uso de los recursos productivos**

Según Haquim (2000), los pequeños sistemas productivos de puna son de insubsistencia, porque alcanzan muy poco desarrollo productivo, a causa de las inclemencias climáticas y la falta de acceso al agua y las tierras fértiles.

Para Sheng (1992), y Vásquez *et al.*, (2000), el problema del uso de los recursos de una cuenca, se refleja en: la erosión del suelo, pérdida de la cobertura vegetal, escasez de tierra y agua. Asimismo para el IICA (1996), el riego puede modificar los regímenes hídricos zonales y originar: la erosión, la sedimentación y los cambios en las propiedades físico-químicas de los suelos.

### **3.4. Fertilizantes fosfatados**

#### **3.4.1. Características de los fertilizantes fosfatados**

Según Chilón (1997), el fosfato mono amónico contiene entre el 52 y 55 % de fosfato enteramente soluble en agua, no es higroscópico, es de aplicación directa y se obtiene de la reacción del amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) con el ácido fosfórico ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ).

Para Supo (1982), el fósforo soluble en agua es el más aconsejable para la fertilización anual, debido a que mejora su asimilación por las plantas; el cual para Ginés y Mariscal (2005), se obtiene del fosfato monoamónico ( $\text{PO}_4\text{H}_2\text{NH}_4$ ) hidrosoluble, de carácter ácido (pH: 4.5) y baja C.E. (6.4 dS/m) con relación a otros fertilizantes fosfatados.

#### **3.4.2. Importancia del fósforo en las plantas**

De acuerdo a Chilón (1997), el fósforo en la planta motiva la división celular, el crecimiento radicular, la floración, la respiración y la fotosíntesis; además coadyuva en la acumulación de energía y la síntesis de azúcares, grasas y proteínas; sin embargo su disponibilidad en la mayoría de los suelos es muy escasa, debido a su baja movilidad.

El fósforo en la planta según Garman (1996), promueve el desarrollo foliar, el desarrollo radicular, una adecuada formación de la semilla y apresura el estado de fructificación. Durante el verano proporciona vigor a la formación del grano y en el invierno provee vigor y rapidez a la formación foliar, de los forrajes producidos para heno.

#### **3.4.3. Características del fósforo en el suelo**

Para Fassbender (1980), el fósforo en el suelo se presenta en forma: orgánica, inorgánica, adsorbido y asimilable; su alta estabilidad en el suelo proviene de su baja solubilidad, el cual a su vez causa su poca disponibilidad para las plantas, a pesar de ser aportado continuamente por la mineralización de los restos orgánicos.

Según Supo (1982), la forma más común del fósforo en el suelo, es el ácido ortofosfórico ( $\text{PO}_4\text{H}_3$ ), el cual al dar su radical amonio a los diferentes cationes ( $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ) queda como:  $\text{PO}_4\text{H}_2^-$ ,  $\text{PO}_4\text{H}^-$ ,  $\text{PO}_4^{\equiv}$ , de los cuales la mayor forma de su asimilación, es el fosfato monobásico.

#### **3.4.4. Fuentes de los fertilizantes fosfatados**

Según Garman (1996), la neutralización del ácido fosfórico con el amoniaco, origina fosfatos de amonio con una elevada concentración del fósforo aprovechable; para Chilón (1996), estos fertilizantes se obtienen mediante la reacción química de la roca fosfórica, con el ácido fosfórico concentrado, originando fertilizantes altamente fosfatados.

#### **3.4.5. El fósforo en la producción de alfalfa**

##### **3.4.5.1. Fertilización fosfatada en las praderas de alfalfa**

De acuerdo a Vivas *et al.*, (1999), la producción de las praderas de alfalfa depende de la disponibilidad del fósforo asimilable en el suelo, siendo los más apropiados mayores a 25 ppm, que dan lugar a un incremento hasta de un 36 % de MS/ha; al respecto Atahuachi (2001), indica que el fósforo favorece la asimilación del  $\text{N}_2$ , por lo que recomienda utilizar niveles mayores a 100 kg/ha, para mejorar la producción de la alfalfa.

Para Quintero y Boschetti (2001), las pasturas de alfalfa requieren más de 25 ppm de fósforo disponible en el suelo, para lograr una máxima producción de materia seca; asimismo Sánchez (2004), afirma que para garantizar una buena producción de la alfalfa, debe fertilizarse anualmente con cantidades que oscilen entre 60 y 120 kg/ha de  $\text{P}_2\text{O}_5$ .

Según Lazarte *et al.*, (1995), citado por Meneses *et al.*, (1996), la aplicación de 88 kg/ha de fosfato, incrementó la producción de materia seca de la alfalfa hasta un 75 % durante el 4to año, el cual disminuyó notoriamente en el 5to año de producción; según los mismos autores la producción de la alfalfa es limitada por: el manejo, el clima y el pH del suelo.

### 3.4.5.2. Métodos de fertilización fosfatada

Para Supo (1982), el fósforo por su baja movilidad debe ser aplicado cerca de las raíces, para mejorar su disposición en un tiempo limitado por su rápida fijación; con relación a la fertilización Hopfen (1982), aconseja fertilizar en líneas en surcos abiertos en el terreno, para reducir las pérdidas y optimizar su uso por parte de las plantas.

### 3.4.6. Disponibilidad del fósforo en los suelos del altiplano norte y central

Según los análisis físico-químicos de los suelos del Cuadro 3.4, realizados en algunas regiones del altiplano por el CIF-PDLA-SEFO (2000), y Mendoza (2004), muestran que la disponibilidad del fósforo depende generalmente de las características químicas del suelo.

**Cuadro 3.4. Disponibilidad del fósforo en los suelos del altiplano Norte y Central**

Localidad	Características Químicas					Características Físicas					
	pH	CE (mS/cm)	MO (%)	P (ppm)	Disp. P	Dap (g/cm <sup>3</sup> )	CC (%)	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Textura
Condoriri	7.68	0.139	3.15	9.9	Mod	1.40	19.06	45.0	36.2	18.8	F
Patacamaya	6.86	0.175	1.59	44.0	M.alt	1.65	15.50	72.0	21.0	7.0	FA
Huayrocondo	5.83	0.179	5.36	8.0	Mod	1.19	35.33	8.8	44.6	46.6	YL
Achacachi	5.58	-	2.83	31.5	M.alt	-	-	-	-	-	-
Batallas (H)	8.02	0.739	3.51	15.0	Mod	1.35	-	30.0	37.0	33.0	FY

Fuente: CIF-PDLA-SEFO (2000) y Mendoza (2004). CE = Conductividad eléctrica; MO = Materia orgánica; P = Fósforo disponible; Mod = Moderado; M.alt = Muy alto; Dap = Densidad aparente del suelo; CC = Capacidad de campo.

### 3.5. Importancia de la aireación del suelo en el desarrollo de las plantas

Según Miranda (2002), la aireación en el suelo equilibra la concentración del O<sub>2</sub> y el CO<sub>2</sub> del suelo, creando procesos químicos aeróbicos que ayudan el desarrollo de las plantas; asimismo Narro (1994), señala que la oxigenación del suelo favorece la solubilidad de los fosfatos, Fe, Mg y otros elementos, debido al CO<sub>2</sub> disuelto en la solución del suelo.

Para Morales (1987), la aireación del suelo favorece el proceso respirativo radicular y la descomposición aeróbica de los restos orgánicos; asimismo la baja oxigenación del suelo para Fassbender (1980), genera gases nocivos como el CH<sub>4</sub> y el H<sub>2</sub>S que causan un bajo desarrollo radicular, poca vida microbiana y una baja absorción del agua y nutrientes.

## **4. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **4.1. Descripción de la zona de estudio**

#### **4.1.1. Localización Geográfica**

El presente estudio se realizó en la Estación Experimental de Choquenaira, Distrito III del Municipio de Viacha de la provincia Ingavi, ubicada a 38 km al sur-oeste de la ciudad de La Paz, a una altitud de 3.850 msnm, entre las coordenadas 68°17'40" longitud Oeste y 16° 41'37" Latitud Sur.

#### **4.1.2. Clasificación de la zona de vida**

Según la clasificación de la zona de vida del MACA (1975), esta zona corresponde a Estepa Montano Subtropical y se extiende a lo largo del altiplano nor-central, representado por una fisiografía volcánica de colinas degradadas, planicies aluviales, suelos profundos de poca infiltración con afloraciones salinas y una variada disponibilidad de nutrientes.

#### **4.1.3. Descripción climática y del relieve**

##### **4.1.3.1. Precipitación**

El municipio de Viacha en los últimos ocho años registró una precipitación pluvial media anual de 550 mm; donde la mayor precipitación se registró en la gestión 2001 con 751.2 mm y la mínima en la gestión 2000 con 458 mm (SENAMHI, 2005).

Según el registro climático de la EMCH de la gestión 2006, la máxima intensidad de precipitación registró 73.4 mm/h en el mes de febrero, reflejando la presencia de lluvias altamente erosivas en la zona; en cambio la máxima precipitación mensual se registró en el mes de enero con 143 mm, confirmando como al mes más lluvioso de la región, como muestran los registros del SENAMHI (2005).

#### 4.1.3.2. Humedad Relativa

De acuerdo al SENAMHI (2005), la humedad relativa media de la zona entre diciembre y marzo registra un 60 % y de junio a noviembre un 39 %. También se registran en la zona humedades relativas mínimas extremas que disminuyen hasta un 4.0 % (EMCH, 2005).

#### 4.1.3.3. Temperatura

La temperatura media de la zona es de 8.6° C, las temperaturas máximas se registran en el mes diciembre alcanzando hasta 20.9° C y las mínimas en los meses de junio y julio disminuyendo hasta -12.6° C (EMCH, 2006).

#### 4.1.3.4. Viento

La velocidad media del viento según el SENAMHI (2005), registra de invierno a primavera 2.75 m/s procedentes del Oeste y el Sur, el cual disminuye de verano a otoño a 2.41 m/s procedentes de la dirección Este y Norte. En el siguiente Cuadro (4.1), se muestran los parámetros climáticos más importantes que se registran en la zona.

**Cuadro 4.1. Parámetros climáticos del municipio de Viacha**

Año	PP mm	W-V m/s	W-I m/s	HR %	T°max °C	T°min °C	T°med °C	T°s °C	PA mm	ET mm/d	ETm mm/d	IPPm mm/h	RSm W/m <sup>2</sup>
1997-2006	559	1.36	2.11	52	20.9	-12.6	8.62	14.32	641	3.82	6.64	73.4	1698

Fuente: EMCH (2006) y SENAMHI (2005)

PP = Precipitación pluvial media; W = viento; V = Verano; I = Invierno; HR = Humedad relativa media; T° = Temperatura; T°s = Temperatura media del suelo (capa arable, 30 cm prof); PA = Presión atmosférica; ET = Evapotranspiración media; ETm = Evapotranspiración máxima; IPPm = Intensidad de precipitación máxima; RS = Radiación solar máxima por hora.

#### 4.1.3.5. Fisiografía

La mayor parte de la zona presenta una topografía ligeramente plana a ondulada, con laderas de colinas poco extensas y de mayor declividad, donde se desarrolla una mayor actividad agrícola. Según Callisaya (1994), esta región es susceptible a tener desastres naturales como: inundaciones, sequías periódicas, granizadas y heladas atemporales.

#### **4.1.4. Descripción del suelo y agua**

El suelo es de formación coluvial y aluvial apta para la actividad agropecuaria; donde el agua se obtiene por medio de excavaciones de pozos superficiales y su uso se limita al consumo animal y humano. Según Callisaya (1994), el agua de la zona está dentro de los límites permisibles para el consumo humano, animal y el riego.

#### **4.2. Materiales**

##### **4.2.1. Materiales de Laboratorio**

Para determinar las características físico-químicas del suelo y la MS del material vegetal se utilizó: el pH metro, materiales de vidrio, estufa y balanzas; con los que se determinó el: pH del agua y el suelo, la humedad y el peso de las muestras del material vegetal y el suelo; los cuales fueron complementados con los análisis físico-químicos del agua y el suelo, en los laboratorios del Instituto Boliviano de Ciencia y Tecnología Nuclear (IBTEN).

##### **4.2.2. Materiales de Campo**

El material vegetal utilizado en la investigación, fue la pradera de alfalfa *var. Bolivia 2000*, reconocido como un ecotipo nacional de carácter semitardío y de alta productividad, producido en asociación con la festuca alta durante diez años.

El sistema de riego por aspersión (semi-fijo), conformado por: el conjunto del cabezal, las tuberías de conducción, aspersores y accesorios. También fueron utilizados herramientas e instrumentos para la toma de muestras de suelo, la aplicación del agua, fertilización, producción y otras actividades complementarias requeridas en la pradera.

La estación meteorológica automática (Vantage PRO-2), se utilizó en la medición de la: ET, la velocidad del viento, humedad relativa, humedad del suelo, la precipitación pluvial y las temperaturas del suelo y el ambiente, durante la producción de la pradera.



### **4.2.3. Materiales de Gabinete**

Los materiales de gabinete han permitido planificar, desarrollar y cumplir el cronograma de actividades. Los softwares: Weather link 5.5.1; SAS 8.2e; Twiddlebit Plan; Cropwat 5.7; D.E. FAUANL v2.5; CYMMIT v2.1; permitieron analizar de forma ordenada los datos de campo, hasta la presentación de la memoria del trabajo.

### **4.3. Metodología**

El procedimiento experimental del trabajo de investigación fue desarrollado en tres fases:

- **Planificación** (La problemática, el uso de recursos productivos y las soluciones)
- **Desarrollo** (Establecimiento de los tratamientos, el riego y la toma de datos)
- **Evaluación** (Análisis del efecto de los factores estudiados, sobre las variables de respuesta establecidas)

#### **4.3.1. Planificación**

Esta fase se desarrolló desde el planteamiento del problema, que parte de la necesidad de mejorar y recuperar la producción de forraje de la pradera asociada con diez años de producción, en base al riego y la fertilización fosfatada, complementando con un método de manejo que pueda ser desarrollado por el agricultor.

##### **4.3.1.1. Riego**

El sistema de riego por aspersión fue elegido por las siguientes características:

- Predominancia de los sistemas de cultivo de ladera de la zona (Miranda, 1993)
- Pendiente y la irregularidad del terreno (1 a 2 %)
- Falta del agua superficial para establecer métodos de riego por superficie
- Tasa de infiltración ligeramente lenta (Morales, 1987).
- Pradera asociada establecido al boleó
- Existencia del agua surgente recomendada para su uso en el riego.

#### **4.3.1.2. Necesidades de la fertilización fosfatada**

La fertilización fosfatada de la pradera asociada de alfalfa con festuca alta, se realizó por las siguientes razones:

- Necesidad de incrementar la producción de la pradera asociada, a través de una mayor asimilación de nitrógeno, favorecido por una mayor disponibilidad del fósforo asimilable en el suelo (Atahuachi, 2001).
- Baja disponibilidad del fósforo asimilable en los suelos de la zona, establecido por Callisaya (1994), y confirmadas en los análisis de suelo realizadas en la pradera al obtener 7.86 ppm.
- La necesidad de disponer más de 25 ppm de fósforo asimilable en el suelo recomendado por Vivas *et al.*, (1999), para mejorar la producción de la alfalfa.

#### **4.3.1.3. Método de fertilización**

Considerando la baja movilidad del fósforo en el suelo, se determinó aproximar a este nutriente cerca de las raíces de la alfalfa y la festuca alta, con el propósito de incrementar su disponibilidad para favorecer su mayor asimilación, tomando en cuenta los siguientes aspectos.

- Tipo de fertilizante (solubilidad, concentración y pH)
- La profundidad de mayor densidad radicular de la alfalfa y la festuca alta
- La profundidad de mayor actividad radicular de la alfalfa
- El método de establecimiento de la pradera asociada
- El apero de labranza para el roturado parcial y espaciado
- La densidad poblacional de la pradera asociada

#### **4.3.2. Desarrollo del procedimiento experimental**

Esta fase se inició con el establecimiento del sistema de riego en la pradera asociada, sobre la base del croquis del experimento mostrado en la Figura 4.1, el cual se realizó de acuerdo al siguiente procedimiento:

#### 4.3.2.1. Diseño experimental

En la presente investigación, para facilitar el análisis estadístico de los datos de campo, se utilizó el Diseño de parcelas subdivididas, de acuerdo a la metodología propuesta por Calzada (1979), y Montgomery (1991), asignando a las láminas de riego (factor A) en la parcela mayor, las profundidades del roturado parcial espaciado (factor B) en la parcela chica y en la subparcela los niveles de fertilización fosfatada (Factor C).

Los niveles de los factores de estudio del Cuadro 4.2, fueron combinados entre si (Cuadro 4.3) y replicados en tres bloques originando 81 UE para la investigación (Figura 4.1).

**Cuadro 4.2. Niveles de los factores de estudio**

Factor	Descripción	Niveles			Unidades
		1	2	3	
<b>A</b>	Láminas de riego	0.0	60.0	90.0	cm
<b>B</b>	Profundidades de fertilización fosfatada	0.0	7.5	15.0	cm
<b>C</b>	Fósforo disponible (Fertilizante: Fosfato Mono Amónico, FMA)	7.86 (0.0)	17.0 (129)	25.0 (241)	ppm (kg/ha)

**Cuadro 4.3. Combinación de factores que determinan los tratamientos del estudio**

Tratamientos	Combinación de factores AxBxC	Descripción de la combinación de factores
T1	A1B1C1	Sin riego x sin profundidad x sin Fosfato (FMA)
T2	A1B1C2	Sin riego x sin profundidad x Fosfato (FMA) 129 kg/ha
T3	A1B1C3	Sin riego x sin profundidad x con Fosfato (FMA) 241 kg/ha
T4	A1B2C1	Sin riego x profundidad 7,5 cm x sin Fosfato (FMA)
T5	A1B2C2	Sin riego x profundidad 7,5 cm x Fosfato (FMA) 129 kg/ha
T6	A1B2C3	Sin riego x profundidad 7,5 cm x Fosfato (FMA) 241 kg/ha
T7	A1B3C1	Sin riego x profundidad 15 cm x sin Fosfato (FMA)
T8	A1B3C2	Sin riego x profundidad 15 cm x Fosfato (FMA) 129 kg/ha
T9	A1B3C3	Sin riego x profundidad 15 cm x Fosfato (FMA) 241 kg/ha
T10	A2B1C1	Riego 60 cm x sin profundidad x sin Fosfato (FMA)
T11	A2B1C2	Riego 60 cm x sin profundidad x Fosfato (FMA) 129 kg/ha
T12	A2B1C3	Riego 60 cm x sin profundidad x con Fosfato (FMA) 241 kg/ha
T13	A2B2C1	Riego 60 cm x profundidad 7,5 cm x sin Fosfato (FMA)
T14	A2B2C2	Riego 60 cm x profundidad 7,5 cm x Fosfato (FMA) 129 kg/ha
T15	A2B2C3	Riego 60 cm x profundidad 7,5 cm x Fosfato (FMA) 241 kg/ha
T16	A2B3C1	Riego 60 cm x profundidad 15 cm x sin Fosfato (FMA)
T17	A2B3C2	Riego 60 cm x profundidad 15 cm x Fosfato (FMA) 129 kg/ha
T18	A2B3C3	Riego 60 cm x profundidad 15 cm x Fosfato (FMA) 241 kg/ha
T19	A3B1C1	Riego 90 cm x sin profundidad x sin Fosfato (FMA)
T20	A3B1C2	Riego 90 cm x sin profundidad x Fosfato (FMA) 129 kg/ha
T21	A3B1C3	Riego 90 cm x sin profundidad x con Fosfato (FMA) 241 kg/ha
T22	A3B2C1	Riego 90 cm x profundidad 7,5 cm x sin Fosfato (FMA)
T23	A3B2C2	Riego 90 cm x profundidad 7,5 cm x Fosfato (FMA) 129 kg/ha
T24	A3B2C3	Riego 90 cm x profundidad 7,5 cm x Fosfato (FMA) 241 kg/ha
T25	A3B3C1	Riego 90 cm x profundidad 15 cm x sin Fosfato (FMA)
T26	A3B3C2	Riego 90 cm x profundidad 15 cm x Fosfato (FMA) 129 kg/ha
T27	A3B3C3	Riego 90 cm x profundidad 15 cm x Fosfato (FMA) 241 kg/ha

Modelo lineal:

$$X_{ijkl} = \mu + \beta_i + \alpha_i + \varepsilon_a + \gamma_j + (\alpha\gamma)_{ij} + \varepsilon_b + \delta_k + (\alpha\delta)_{ik} + (\gamma\delta)_{jk} + (\alpha\gamma\delta)_{ijk} + \varepsilon_{ijkl}$$

Donde:

- $X_{ijkl}$  : Una observación cualquiera
- $\mu$  : Media general del experimento
- $\beta_i$  : Efecto del i-ésimo bloque
- $\alpha_i$  : Efecto del i-ésimo nivel de las láminas de riego
- $\varepsilon_a$  : Error de la parcela principal o factor riego
- $\gamma_j$  : Efecto del j-ésimo nivel de profundidad
- $(\alpha\gamma)_{ij}$  : Efecto de la interacción del i-ésimo nivel de riego y el j-ésimo nivel de profundidad
- $\varepsilon_b$  : Error de la sub parcela o factor profundidad
- $\delta_k$  : Efecto del k-ésimo nivel de fósforo
- $(\alpha\delta)_{ik}$  : Interacción del i-ésimo nivel de láminas de riego con el k-ésimo nivel de fósforo
- $(\gamma\delta)_{jk}$  : Interacción del j-ésimo nivel de profundidad con el k-ésimo nivel de fósforo
- $(\alpha\gamma\delta)_{ijk}$  : Interacción del i-ésimo nivel del factor láminas de riego con el j-ésimo nivel del factor profundidad y el k-ésimo nivel de fósforo.
- $\varepsilon_{ijkl}$  : Error experimental

#### 4.3.2.2. Elección del área experimental

La elección de la pradera de investigación, se realizó en base a la predominancia de las praderas forrajeras perennes de ladera establecidas en la zona. El área de investigación, se estableció en base al 50 % de solapamiento entre los diámetros de mojado de los aspersores elegidos, estableciendo una franja de evaluación rectangular de 400,00 m<sup>2</sup> para cada lámina de riego, como se detalla en el siguiente Cuadro (4.4).

**Cuadro 4.4. Características dimensionales del área del experimento**

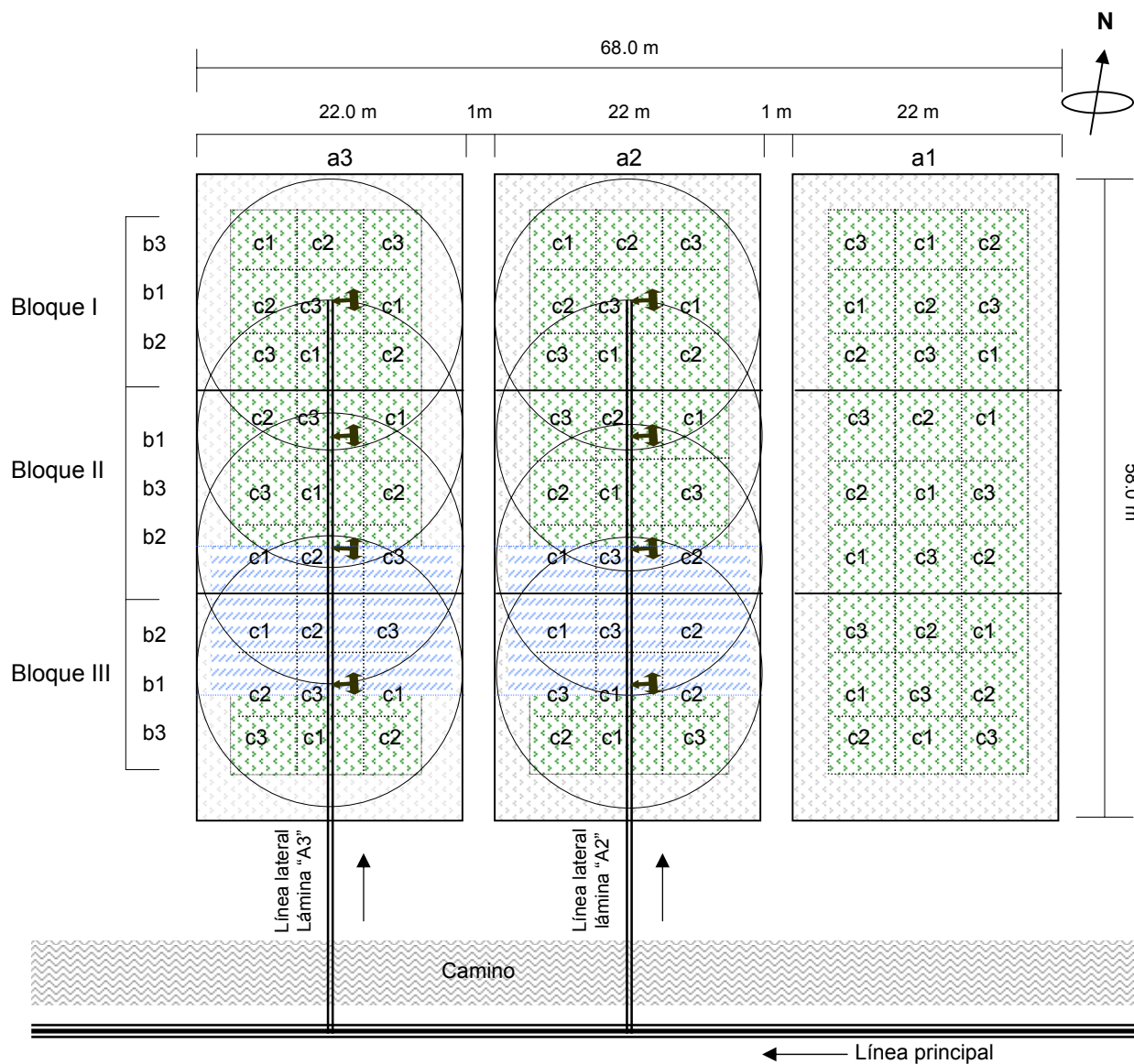
Láminas de riego	Largo (m)		Ancho (m)		Separación (m)	Franja de Evaluación (m <sup>2</sup> )	Superficie total (m <sup>2</sup> )
	T	E	T	E			
A3	58.0	40.0	22.0	10.0	1.0	400.0	1334.0
A2	58.0	40.0	22.0	10.0	1.0	400.0	1334.0
A1	58.0	40.0	22.0	10.0	0.0	400.0	1276.0
Total					2.0	1200.0	3944.0

T = Total; E = Evaluación

Las unidades experimentales fueron distribuidas de acuerdo al croquis de campo (Figura 4.1), orientando de norte-sur a la parcela mayor, para dar el sentido perpendicular a la dirección predominante de los vientos (NW, W, SW), con el propósito de reducir su efecto durante el riego.

### 4.3.2.3. Croquis del experimento

El área experimental se estableció sobre una superficie de 3944.0 m<sup>2</sup>, divididas en tres láminas de riego y subdivididas en 81 UE bajo tres bloques; instalando en las láminas A3 y A2 a una línea lateral, cada una con 4 aspersores de 22 m de diámetro de mojado, como se muestra en la siguiente Figura (4.1).



#### Referencias del croquis del experimento

Escala 1: 500

Marco de riego de la evaluación de las láminas de riego (Cuadro A.14)

Lugar de ubicación de los aspersores

Franja de evaluación de los tratamientos (corte)

Línea de conducción principal

Línea de conducción secundaria (lateral)

**Figura 4.1.** Croquis del experimento.

#### 4.3.2.4. Profundidad de mayor densidad radicular de la alfalfa y la festuca alta

Mediante una calicata (NR), se determinó la profundidad de mayor densidad radicular de la alfalfa y la festuca alta, donde el perfil de distribución radicular de la alfalfa presentó en los primeros 8 cm el 45 % y entre 8 y 21 cm el 41 % del total contabilizado (Cuadro A.1 y A.2). El sistema radicular de la festuca alta presentó una mayor densidad en los primeros 18 cm de profundidad con el 60 % del total estimado.

#### 4.3.2.5. Características físicas y químicas del suelo

El muestreo de suelo se realizó según la metodología propuesta por Chilón (1996). Como resultado del análisis físico de la capa arable, el suelo presentó una textura franco arcilloso con una densidad aparente de 1.24 g/cm<sup>3</sup> y una porosidad del 52.1 %, como se muestra en el siguiente Cuadro (4.5); el cual según Narro (1994), representa a un suelo de buenas características físicas para la actividad agrícola.

**Cuadro 4.5. Características físicas del suelo del área experimental**

Prof. (cm)	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Grava (%)	Clase textural	Dap (g/cm <sup>3</sup> )	Dr (g/cm <sup>3</sup> )	Porosidad (%)	P/Vs (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	CC (%)	PMP (%)
30.0	30	36	34	0.86	FY	1.246	2.62	52.13	0.52	25.4	13.47

Dap = Densidad aparente; CC= Capacidad de campo; PMP = Punto de marchites permanente; FY = Franco arcilloso; Dr = Densidad real; P/Vs = Relación de la porosidad sobre la unidad de volumen del suelo.

Para el SAR (2004), el análisis químico del suelo del Cuadro 4.6, con relación al pH, es de carácter alcalino antes del verano y se reduce a ligeramente alcalino al final del verano; además presenta una disponibilidad media del fósforo asimilable y un alto contenido de MO, con una C.E. que refleja una ligera salinidad del suelo y un bajo contenido de Sodio.

**Cuadro 4.6. Características químicas del suelo del área experimental**

Prof. (cm)	pH		C.E. (mS/cm)	Cationes de cambio (meq/100g suelo)							S.B. (%)	M.O. (%)	N <sub>2</sub> (%)	P (ppm)
	ES	V		Al+H	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	TBI	CIC				
30.0	7.96	7.4	0.238	0.13	9.03	5.69	0.07	0.19	14.9	15.2	99.1	4.05	0.2	7.86

ES = Época seca; V = Verano; C.E. = Conductividad eléctrica; TBI = Total de bases intercambiables; CIC = Capacidad de intercambio catiónico; S.B. = Saturación de bases; M.O. = Materia orgánica; N<sub>2</sub> = Nitrógeno; P = Fósforo

#### 4.3.2.6. Diseño del sistema de riego

El diseño del sistema de riego, fue elaborado en base al diseño de riego por aspersión propuesto por Chipana (1996), donde los parámetros climáticos y la ET fueron obtenidos en la estación meteorológica Vantage PRO-2 (Cuadro A. 17).

##### a) Pruebas del caudal y presión del sistema de riego

Las pruebas del caudal y presión realizados en las láminas A2 y A3, registró 0.8 m<sup>3</sup>/h a 1.85 bar y 1.31 m<sup>3</sup>/h a 1.8 bar de presión respectivamente, los cuales registraron una poca diferencia con los catálogos de fábrica (Cuadro A.20), por lo que se adoptó utilizar los caudales obtenidos en las pruebas de campo.

##### b) Determinación de los coeficientes hídricos del suelo

La capacidad de campo (CC) se determinó mediante el método gravimétrico, propuesto por Torres (1995), y Villalpando (1993), tomando muestras de 3 estratos cada una a 20 cm de profundidad después de 4 días de haber saturado un área de 1 m<sup>2</sup>, con 15 cm de altura de agua, sin pérdidas por evaporación ni escurrimiento. Como resultado de este procedimiento se obtuvo una CC de 25.4 % en base a peso (Cuadro A.3); el cual también fue calculado por el método propuesto por Fuentes (1998), en base a la textura del suelo, según la Ec. 1, registrando 25.46 % (g/g).

$$CC = 0.48 Y + 0.162 L + 0.023 A + 2.62 \quad (1)$$

Asimismo el punto de marchites permanente (PMP) se determinó en base a la textura de suelo sugerido por Fuentes (1998), obteniendo 14.4 % (g/g), por medio de la siguiente relación matemática:

$$PMP = 0.302 Y + 0.102 L + 0.0147 A \quad (2)$$

Y : Arcilla (%)  
A : Arena (%)  
L : Limo (%)

### c) Infiltración del agua en el suelo

La infiltración del agua en el suelo, se determinó mediante el método de los cilindros infiltrómetros propuesto por Gurovich (1985), y Chipana (1996), utilizando dos cilindros de infiltración, ubicados a 12 cm de profundidad con 15 cm de altura de agua, manteniendo el mismo sobre 10 cm de altura, logrando alcanzar una infiltración constante a los 5.5 horas, dando como resultado una VIB de 16.2 mm/h (Cuadro A.5).

#### 4.3.2.7. Diseño agronómico

El diseño agronómico se realizó después de determinar, los coeficientes hídricos del suelo, la velocidad de infiltración (VIB), la profundidad radicular de mayor actividad, la ET media de la zona y la densidad aparente del suelo (Cuadro A.7). Los parámetros de la secuencia del diseño se describen en el siguiente Cuadro (4.7).

**Cuadro 4.7. Diseño agronómico de las láminas A3 (32 mm/semana) y A2 (21 mm/semana)**

Parámetro de Diseño	Lámina A2 Aspersor DAN 4455			Lámina A3 Aspersor Rain Bird 30H		
	Símbolo	Valor	Unidad	Símbolo	Valor	Unidad
Evapotranspiración	ET	3.82	mm/día	ET	3.82	mm/día
Profundidad radicular	Pr	30	cm	Pr	30	cm
Lámina neta	Zn	24.7	mm	Zn	24.7	mm
Lámina bruta	Zb	33	mm	Zb	31.9	mm
Frecuencia de riego	F	7	días	F	7	días
Lámina neta corregida	Znc	27	mm	Znc	27	mm
Lámina bruta corregida	Zbc	36	mm	Zbc	34	mm
Caudal del aspersor	qs	0.8	m <sup>3</sup> /h	Qs	1.31	m <sup>3</sup> /h
Tiempo de riego	Tr	3	h	Tr	2.2	H
Caudal del lateral	Qsc (QLL)	3.2	m <sup>3</sup> /h	Qsc (QLL)	5.24	m <sup>3</sup> /h

La Zb se determinó en base a la UD

#### 4.3.2.8. Diseño hidráulico

Con el diseño hidráulico se determinó las dimensiones de la red de conducción, los diámetros de las tuberías y los límites permisibles de pérdida de carga, como se describen en el Cuadro 4.8. Para el diseño de la línea principal fueron sumados los caudales de una línea lateral de cada lámina de riego, para cubrir el número mínimo de laterales en funcionamiento durante el riego (NMLF=2).



**Cuadro 4.8. Diseño hidráulico de las láminas A3 (32 mm/semana) y A2 (21 mm/ semana)**

Descripción de los parámetros de Diseño	Símbolo	Valor	Unidad
Número mínimo de aspersores en funcionamiento	NMAF	8	Aspersor
Número de aspersores sobre línea lateral	NALL	4	Aspersor
Número mínimo de laterales en funcionamiento	NMLF	2	laterales
Número de posiciones en la línea principal	NPLP	8	laterales
Número de días para completar el riego	Ndr	2.5	días
Caudal corregido (A3)	Qs	5.24	m <sup>3</sup> /h
Diseño de la línea lateral	LL	66.4	m
Presión de entrada en la línea lateral	PELL	17.1-19.7	m
Pérdida de carga admisible en línea principal	ΔHLP	3.4	m
Presión de servicio de la línea lateral más crítico	HscLL	24.8	m
Caudal Lateral A3 + A2	Q (A3+A2)	8.46	m <sup>3</sup> /h
Altura manométrica total	Hman	29.7	m
Potencia de la bomba (Ef 62 %)	PB*	*2.4	cv

\* = Potencia de bomba insuficiente, siendo el mínimo aceptable según pruebas 4.5 HP

#### 4.3.2.9. Características físicas y químicas del agua de riego

##### a) Calidad del agua de riego

Según la FAO (2006), la alfalfa es medianamente sensible a la salinidad y su  $CE_u$  es de 2 dS/m. Para Ayers y Wescott (1985), citado por Chilón (1996), la C.E. de 3.29 dS/m del agua de riego pertenece a la clase C2, el cual es restricto en el uso agrícola, a un cierto grado de lavado del suelo y aplicable en plantas ligeramente flexibles a la salinidad, sin embargo es considerado apto para el riego.

El  $RAS_c$  calculado de 1.9 meq/l, según el método propuesto por Fuentes (1998), mediante la Ec. 3, no afecta a la infiltración del suelo regado, por el bajo contenido de  $Na^+$ ; donde el  $Ca^{+2}$  se obtuvo de la relación  $HCO_3^-/Ca^{2+}$  (Cuadro A. 35); asimismo para Sánchez (2005), el  $RAS_c$  obtenido, corresponde a la clase S1, establecida como agua apta para el riego.

$$RAS_c = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{+2} + Mg^{+2}}{2}}} \quad (3)$$

La ligera salinidad del agua de riego presentada en el Cuadro 4.9, incrementó en campo el pH de la solución agua de riego-suelo, para una relación 1:1 en base a volumen, hasta 7.99 y para la relación 1:2 registró 8.04 (Cuadro A.11 y A.12), reflejando el incremento del pH en el suelo después de la aplicación del riego.

**Cuadro 4.9. Análisis físico-químico del agua de riego**

pH	C.E. dS/m	RAS <sub>c</sub> meq/l	Na <sup>+</sup> mg/l	K <sup>+</sup> mg/l	Ca <sup>2+</sup> mg/l	Mg <sup>2+</sup> mg/l	Cl mg/l	S mg/l	BC mg/l	SD mg/l	SS mg/l	ST mg/l	Boro mg/l	Tw °C
7.53	3.29	1.9	35.87	8.94	18.7	5.32	11.42	68.35	87.86	235.0	1.20	236.2	0.27	13.1

C.E. = Conductividad eléctrica; Cl = Cloruros; S = Sulfatos; BC = Bicarbonatos; SD = Sólidos disueltos; SS = Sólidos en suspensión; ST = Sólidos totales; Tw = Temperatura media del agua de riego durante el riego

## b) Fuente del agua de riego

La fuente del agua de riego estuvo constituida por un pozo excavado alimentado por aguas surgentes, con un almacenamiento útil de 45 m<sup>3</sup> y un caudal de salida de 18 l/min y una recarga que disminuye de 72 a 18 l/min, al disminuir su nivel estático después del riego, lo que permite regar hasta 6 horas continuas con un caudal máximo de 9 m<sup>3</sup>/h.

### 4.3.2.10. Láminas de Riego

Los niveles de riego del Cuadro 4.10, fueron elegidos tomando como referencia, los resultados logrados por Céspedes (1992), que señala que la alfalfa utiliza entre 330 y 600 litros de agua por 1.0 kg de MS y Del Pozo (1971), que señala que se requiere de 700 a 800 litros de agua por 1.0 kg MS de alfalfa; además Hannaway *et al.*, (1999), indican que la festuca requiere entre 450 y 900 mm/año de agua, para un buen desarrollo productivo.

**Cuadro 4.10. Niveles de las láminas de riego a aplicarse en la pradera de alfalfa asociada con festuca alta**

Niveles de riego	Lámina de agua (cm)	PTE (semanas)	Lámina diaria (mm)	Lámina semanal (mm)	Lámina mensual (mm)
Lámina A1	0	30	Pe	Pe	Pe
Lámina A2	60	30	3.0	21	90
Lámina A3	90	30	4.57	32	137

Pe = Precipitación efectiva; PTE = Periodo de tiempo estimado

Las láminas de riego semanal del Cuadro 4.10, fueron aplicadas de acuerdo a los niveles planteados, considerando que la superioridad del 17 % del agua de la lámina A3 con relación a la ET, cubre ajustadamente el porcentaje del RL de las sales con una pérdida estimada de un 20 % de la productividad, debido a la elevada C.E. del agua de riego.

### a) Precipitación efectiva

Las altas variaciones de la intensidad de precipitación registradas en la zona, no permitió establecer una  $Pe_{\text{semanal}}$  real por los métodos existentes; por esta razón la precipitación efectiva de cada evento ( $Pe_E$ ), se determinó sobre la base del escurrimiento superficial, que produce una intensidad de lluvia superior al VIB, de acuerdo a la siguiente relación:

$$Pe_E = \left[ \frac{VIB}{Ipp} \right] * Lpr \quad (4)$$

VIB : Velocidad de infiltración básica del suelo (mm/h)  
Ipp : Intensidad de precipitación de la Lpr (mm/h)  
Lpr : Lámina precipitada (mm)

Las lluvias con una intensidad menor a la VIB, fueron consideradas como precipitaciones efectivas, excepto las lluvias menores a 0.5 mm, ya que no mostraron efecto de mojado. La precipitación efectiva semanal ( $Pe_S$ ) se determinó mediante la siguiente expresión:

$$Pe_S = \sum Pe_{1 \rightarrow n} \quad (5)$$

$Pe_S$  : Precipitación efectiva semanal (mm)  
 $\sum Pe_{1 \rightarrow n}$  : Sumatoria de las precipitaciones efectivas de n eventos de cada semana

### b) Evapotranspiración (ET) y el Coeficiente de cultivo (kc)

La ET diaria se registró en la estación meteorológica Vantage PRO-2 (Penman Monteith), registrando una media de 3.82 mm/día (Cuadro A.17). El coeficiente de cultivo adoptado fue uno (1), debido a que este fue un parámetro de cotejo con la  $ET_c$  de la alfalfa y las recomendaciones de Aranda (1999), para utilizar casi la misma lámina en todo el ciclo de producción, por ser un cultivo de cosecha en materia verde.

### c) Aplicación de las láminas semanales de riego

Las láminas semanales de riego ( $L_r$ ) del Cuadro 4.12, fueron calculadas utilizando la Ecuación 6, bajo una  $E_a$  de 90 y 79 % para las láminas A3 y A2 respectivamente para todo el ciclo de producción, mediante la siguiente relación matemática:

$$Lr = \frac{[LRse - Pe_s]}{Ea} \quad (6)$$

- Lr : Lámina a regar semanalmente (mm)  
 LRse : Lámina de riego semanal establecido (32 mm y 21 mm)  
 Pe<sub>s</sub> : Precipitación efectiva semanal (mm)  
 Ea : Eficiencia de aplicación del sistema (90 y 79 % para las láminas A3 y A2 respectivamente)

La lámina semanal a regar (Lr) del Cuadro 4.11, de las láminas A3 y A2, no utilizó ET<sub>Ct</sub> establecida para 4 fases del desarrollo de la alfalfa según el kc<sub>(A)</sub>, debido a que la fase inicial abarcó un corto periodo de tiempo, en cambio la fase de desarrollo abarcó un mayor periodo de tiempo hasta llegar a la etapa de corte, por lo que se adoptó un kc media de 1.

**Cuadro 4.11. Distribución semanal de las láminas de riego**

N° Sem.	Fecha D-D/M/A	Láminas de riego		Balance Hídrico								Tr Lámina A3 y A2 (h)	Obs A3	
				Pérdidas de agua					Aportes de agua					
				L-A3 mm	L-A2 mm	ET mm	kc <sub>(u)</sub>	ET <sub>C(u)</sub> mm	kc <sub>(A)</sub>	ET <sub>Ct</sub> mm	Pe <sub>s</sub> mm			Lr-A3 mm
1	02-08/09/05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	SR
2	09-15/09/05	32	21	33.0	1	33	0.50	17	13.7	0	0	-	-	SR
3	16-22/09/05	32	21	29.0	1	29	0.50	15	12.7	0	0	-	-	SR
4	23-29/09/05	32	21	31.2	1	31	0.95	30	0	36	26	2.2	-	R>ET <sub>Ct</sub>
5	30-06/10/05	32	21	32.1	1	32	0.95	30	14.8	19	8	1.2	-	R>ET <sub>Ct</sub>
6	07-13/10/05	32	21	23.2	1	23	0.95	22	34.2	0	0	-	-	SR
7	14-20/10/05	32	21	26.4	1	26	0.95	25	14.9	19	7	1.2	-	R>ET <sub>Ct</sub>
8	21-27/10/05	32	21	37.2	1	37	0.95	35	4.1	31	21	2.0	-	R>ET <sub>Ct</sub>
9	28-03/11/05	32	21	42.8	1	43	0.95	41	0	36	26	2.2	-	R<ET <sub>Ct</sub>
10	04-10/11/05	32	21	27.5	1	28	1.15	32	8.8	26	15	1.6	-	R>ET <sub>Ct</sub>
11	11-17/11/05	32	21	28.6	1	29	1.15	33	12	22	11	1.4	-	R>ET <sub>Ct</sub>
12	18-24/11/05	32	21	29.2	1	29	1.15	34	15.8	18	6	1.1	-	R=ET <sub>Ct</sub>
13	25-01/12/05	32	21	28.7	1	29	1.15	33	3.4	32	21	2.0	-	R>ET <sub>Ct</sub>
14	02-08/12/06	32	21	28.9	1	29	0.50	14	8.8	8	3	0.5	-	R>ET <sub>Ct</sub>
15	09-15/12/06	32	21	32.2	1	32	0.95	31	1.1	34	24	2.2	-	R>ET <sub>Ct</sub>
16	16-22/12/06	32	21	33.0	1	33	0.95	31	6.4	28	18	1.8	-	R>ET <sub>Ct</sub>
17	23-29/12/06	32	21	22.7	1	23	0.95	22	22.3	11	0	0.7	-	R>ET <sub>Ct</sub>
18	30-05/01/06	32	21	20.3	1	20	0.95	19	24.4	8	0	0.5	-	R>ET <sub>Ct</sub>
19	06-12/01/06	32	21	31.4	1	31	1.15	36	7.3	27	17	1.7	-	R<ET <sub>Ct</sub>
20	13-19/01/06	32	21	16.9	1	17	1.15	19	32.9	0	0	-	-	SR
21	20-26/01/06	32	21	17.4	1	17	1.15	19	35.7	0	0	-	-	SR
22	27-02/02/06	32	21	26.4	1	26	0.50	13	15.8	17	0	1.1	-	R>ET <sub>Ct</sub>
23	03-09/02/06	32	21	19.8	1	20	0.95	19	66.1	0	0	-	-	SR
24	10-16/02/06	32	21	26.3	1	26	0.95	25	49	0	0	-	-	SR
25	17-23/02/06	32	21	27.4	1	27	0.95	26	3.5	12	0	0.8	-	R<ET <sub>Ct</sub>
26	24-02/03/06	32	21	23.5	1	24	0.95	22	12.3	0	0	-	-	SR
27	03-09/03/06	32	21	25.4	1	25	1.15	29	30.8	1	0	0.1	-	R>ET <sub>Ct</sub>
28	10-16/03/06	32	21	27.6	1	28	1.15	32	8.7	0	0	-	-	SR
29	17-23/03/06	32	21	20.3	1	20	1.15	22	45.7	0	0	-	-	SR
30	24-30/03/06	32	21	11.8	1	12	1.10	13	18.7	0	0	-	-	SR
31	31-06/04/06	32	21	18.9	1	19	0.50	9	0.2	0	0	-	-	SR
32	07-13/04/06	32	21	24.4	1	24	0.50	12	6.4	0	0	-	-	SR
33	14-20/04/06	32	21	41.0	1	41	0.85	35	0.2	0	0	-	-	SR
Total		1024	672	864.5	1	865	0.93	796	531.0	385.0	202.0	24.4	-	

R>ET<sub>Ct</sub> = Lámina de riego mayor a la evapotranspiración del cultivo teórico; SR = Sin riego; Lr = Lámina semanal a regar; L = Lámina de riego; Tr = Tiempo de riego; kc<sub>(u)</sub> = Coeficiente de cultivo utilizado; kc<sub>(A)</sub> = Coeficiente de cultivo de la alfalfa; ET<sub>C(u)</sub> = Evapotranspiración del cultivo utilizado.

La  $ET_{C(u)}$  registró una mayor lámina de agua aplicada, en la fase inicial y de desarrollo, con relación a la  $ET_{C_t}$ ; en cambio la  $ET_{C_t}$ , presentó una leve superioridad durante la floración (fase media); También se observó que la Lr-A3 registró solo en 3 riegos, una inferioridad media del 8.5 % con relación a la  $ET_{C_t}$ . Entre tanto la Lr-A2 fue inferior a la  $ET_{C_t}$  en un 63 % de los riegos, con una inferioridad media de la lamina aplicada del 33 % con relación a la  $ET_{C_t}$ .

#### **4.3.2.11. Fertilización fosfatada**

La fertilización fosfatada de la pradera de alfalfa asociada a la festuca alta, fue realizada en base al análisis químico del suelo, tomando en cuenta la importancia de este elemento en la producción de la alfalfa y su baja disponibilidad en el suelo, a causa de los diversos procesos y factores que originan su baja disponibilidad, como señala Vivas *et al.*, (1999).

##### **a) Disponibilidad del Fósforo en el suelo**

La disponibilidad del fósforo en el suelo fue determinada mediante un análisis químico de laboratorio por el método Bray Kurtz, registrando 7.86 ppm de fósforo disponible, el cual es considerado como moderado por Cochrane (1978), citado por Villarroel (1990).

En el presente trabajo, se consideraron las recomendaciones realizadas por Quintero y Boschetti (2001), que señalan que el óptimo rendimiento de la alfalfa, se obtiene cuando en el suelo existen mayores a 25 ppm de fósforo disponible. Para alcanzar la cantidad de fósforo disponible recomendado, se realizó la complementación mediante la fertilización fosfatada (Cuadro A.16).

##### **b) Profundidad de mayor actividad radicular de la alfalfa**

La profundidad de mayor actividad radicular, se determinó sobre la base del inicio del rebrote de la alfalfa, registrado a una humedad del 22 % (< CC: 25.4 %) originado por una lámina de 26 mm de agua, que humedeció el suelo hasta una profundidad de 16.5 cm.

### c) Densidad aparente y peso de la capa arable del suelo

La densidad aparente (Dap) del suelo, en los primeros 30 cm de profundidad registró 1.24 g/cm<sup>3</sup>, el cual facilitó determinar el peso de capa arable (PCA: 3750.0 TM/ha), para luego determinar la cantidad de fósforo disponible en la pradera, que alcanzó a 29 kg/ha.

### d) Cantidad, tipo fertilizante y profundidad de fertilización

Con la finalidad de mejorar la disponibilidad del fósforo en el suelo, se utilizó el fosfato mono amónico (FMA, 12-61-0) hidrosoluble, de carácter ácido y con una concentración del 26.23 % de fósforo como elemento base.

El nivel de fósforo a aplicar fue establecido, en función a su disponibilidad en el suelo (7.86 ppm), para alcanzar por complementación hasta los niveles de: 17 ppm (C2) y 25 ppm (C3), según el método de cálculo propuesto por Chilón (1997), (Cuadro A.15); donde la cantidad de fertilizante para cada unidad experimental (UE), se determinó mediante la siguiente relación matemática:

$$Cf = \left[ \frac{Nc, ha}{10^4} \right] * \left[ \frac{AUE}{Rc(f)} \right] * 100 \quad (7)$$

- Cf : Cantidad de fertilizante (kg)
- Nc,ha : Nivel del compuesto recomendado por hectárea (kg)
- AUE : Área de la unidad experimental o cultivo (m<sup>2</sup>)
- Rc (f) : Riqueza del compuesto dentro del fertilizante (%)

Utilizando la Ecuación 7, se aplicó 0.29 kg de FMA en cada UE del nivel C3, haciendo un total de 7.83 kg/27UE, de la misma forma en el nivel C2 se aplicó 0.155 kg FMA en cada UE, haciendo un total de 4.18 kg FMA/27UE; utilizado un total de 12 kg de FMA en todo el área experimental.

La profundidad de fertilización, se realizó tomando en cuenta la mayor densidad radicular entre los primeros 8 y 21cm de profundidad y la predominancia de las ramificaciones secundarias con un mayor desarrollo, después de los 7 cm de profundidad.

#### e) Profundidades del roturado parcial espaciado

Las profundidades del roturado parcial y espaciado a 7.5 y 15 cm de profundidad, se realizó con un arado de punta, cortando y abriendo el suelo sin invertir el mismo, de acuerdo a las recomendaciones realizadas para las zonas áridas por Hopfen (1982).

#### f) Método de fertilización

La fertilización fue realizada manualmente en líneas a chorro continuo, ligeramente esparcidos dentro de los surcos abiertos (7.5 y 15 cm de prof.), utilizando recipientes calibrados para cada nivel de fertilización, según las recomendaciones de Hopfen (1982).

#### 4.3.2.12. Evaluación del sistema de riego

La evaluación de la aplicación de las láminas de riego, se realizó en base a: la uniformidad de distribución, el coeficiente de uniformidad y la eficiencia de aplicación; de acuerdo al método de evaluación sugerido por Tarjuelo (2005), según las siguientes expresiones:

- Uniformidad de distribución (UD):

$$UD = \frac{LMC_{25\%} - LI}{LMC} * 100 \quad (8)$$

- Coeficiente de uniformidad (CU):

$$CU = \left[ 1 - \left( \frac{\sum_{i=1}^n |Ci - VMC|}{VMC * n} \right) \right] * 100 \quad (9)$$

- Eficiencia de aplicación (Ea):

$$Ea = \left[ \frac{LMC}{LA} \right] * 100 \quad (10)$$

- LI : Láminas inferiores colectados (mm)
- LMC : Lámina media colectada (mm)
- Ci : Volumen de agua recogido en cada punto de control (cm<sup>3</sup>)
- LA : Lámina aplicada (mm)
- VMC : Volumen media colectada (cm<sup>3</sup>)
- n : Número de puntos de control

La evaluación se realizó en un marco de riego rectangular (12 x 24 m), por la baja tasa de infiltración del suelo (16.2 mm/h), ya que la tasa de aplicación de la lámina A3 fue de 16 mm/h y de 10 mm/h en la lámina A2 (Cuadro A.13).

El 90 % de  $E_a$  obtenida en la lámina A3 refleja, que casi la totalidad del área regada recibió la misma lámina del agua proyectada, entre tanto el CU de 89.4 % según Fuentes (1998), refleja un reparto uniforme del agua en el área regada y la UD del 81 % según Tarjuelo (2005), representa a un mínimo porcentaje del área menos regada con déficit hídrico. Asimismo la lámina A2 presentó una  $E_a$  del 79 %, un CU de 86 % y UD de 73 %, parámetros que representaron una aceptable distribución del agua sobre la área regada.

#### 4.3.2.13. Humedad del suelo

La humedad del suelo fue determinada mediante un censor de humedad, con un rango de 0.0 a 200 cb (centibares), dentro de esta escala la saturación de agua en el suelo, fue representada por el valor 0.0 cb de tensión.

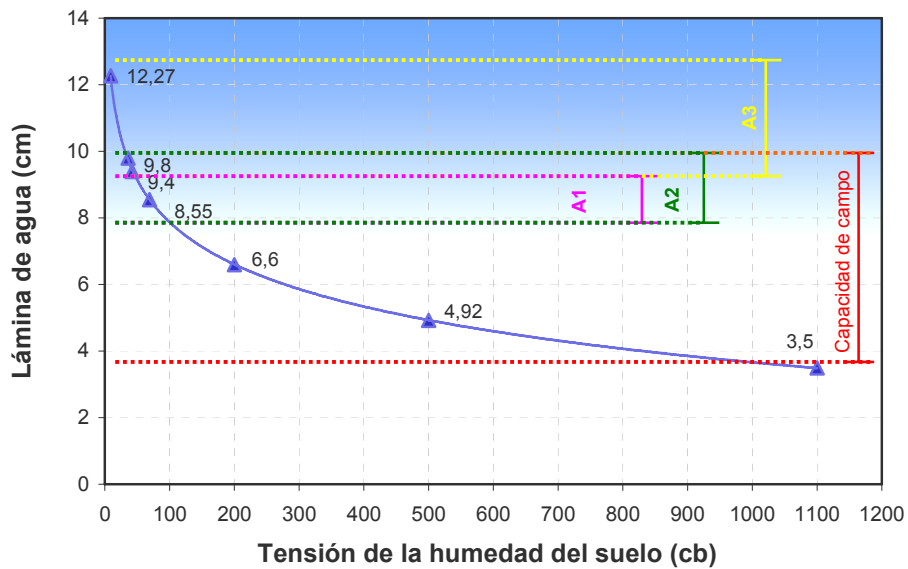
La lámina de agua en el suelo, fue calculada a partir de la tensión de humedad del suelo, registrada en el momento del muestreo (Cuadro A.18), de acuerdo al método propuesto por Fuentes (1998), obteniendo 9.41 cm de lámina de agua para la CC y 3.5 cm para el PMP a 25 cm de prof. del suelo. Asimismo la relación de tensión y la lámina de agua en el suelo, mostró una relación logarítmica (Ec. 11), con un coeficiente de correlación de ajuste  $r = -0,999$ .

$$Y = 16.30 - 1.83 \cdot \ln X \quad (11)$$

- Y : Variable dependiente, representa la variación de lámina de agua en el suelo (cm)
- X : Variable independiente tensión de humedad representado en centibares (cb)

La Figura 4.2, muestra la relación logarítmica de la humedad del suelo, representada por  $Y=16.30-1.83 \cdot \ln X$ ; deducida en función a la relación del porcentaje de humedad del suelo, para la tensión dada en el momento de la toma de muestras (Cuadro A.19).





**Figura 4.2.** Representación gráfica de la humedad de suelo.

#### 4.3.2.14. Disponibilidad del agua en el suelo

El agua disponible en el suelo, fue considerada como la lámina de agua existente entre la capacidad de campo (CC) y el punto de marchites permanente (PMP), obtenida por la diferencia entre las láminas de agua contenidas entre estos coeficientes hídricos.

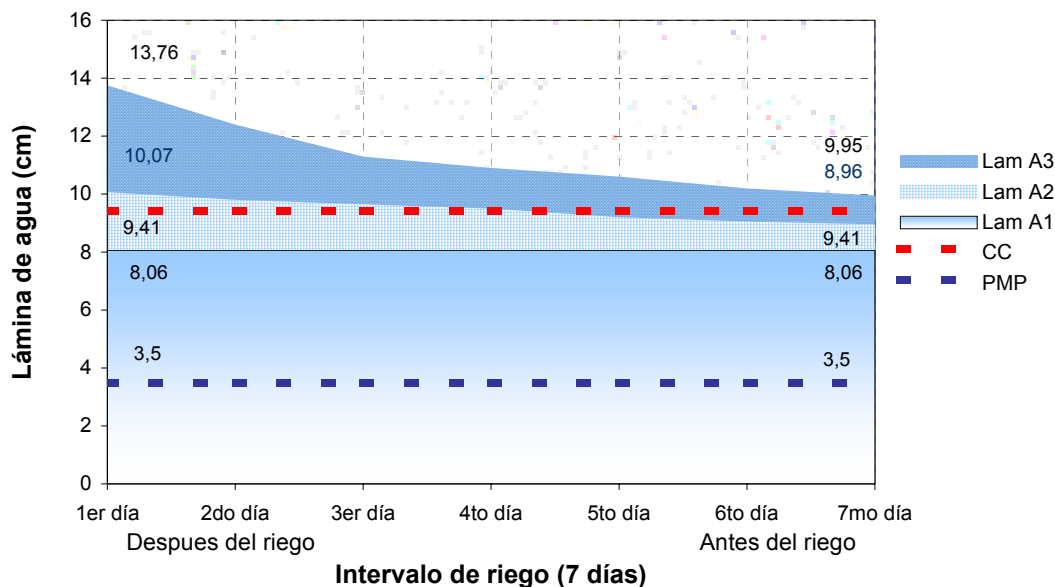
En el Cuadro 4.12, se muestra la variación media de la lámina de agua existente en el suelo a 25 cm de profundidad entre los intervalos de riego. En el mismo Cuadro (4.12), también se observa la lámina de agua disponible (AD) en el suelo, antes y después de cada riego.

**Cuadro 4.12.** Lámina media del agua (LA) en el suelo entre los intervalos de riego

Riego	LPMP (cm)	LCC (cm)	Disponibilidad del agua en el suelo							
			Antes del riego				Después del riego			
			Tensión (cb)	LTAs (cm)	AD (cm)	AG (cm)	Tensión (cb)	LTAs (cm)	AD (cm)	AG (cm)
A3	3.5	9.41	32	9.95	6.45	0.5	4	13.76	10.26	4.35
A2	3.5	9.41	55	8.96	5.46	0.0	30	10.07	6.57	0.60
A1	3.5	9.41	90	8.06	4.56	0.0	90	8.06	4.56	0.00

LPMP = Lámina a punto de marchites permanente; LCC = Lámina a capacidad de campo; LTAs = Lámina total del agua en el suelo; AD = Agua disponible; AG = Agua gravitacional.

En la Figura 4.3, se muestra la variación media de la lámina de agua en el suelo entre los intervalos de riego, donde la lámina A3 (32 mm/semana) registró 5.44 mm/día que fue superior al 1.6 mm/día registrado en la lámina A2 (21 mm/semana).



**Figura 4.3.** Variación de las láminas de agua en el suelo entre los intervalos de riego.

### 4.3.3. Fase de evaluación

La evaluación de la materia seca, altura de planta, relación hoja/tallo y la eficiencia del uso agua, se realizó en tres cortes en estado de madurez a los 81, 137, 200 días y un cuarto corte en la fase de crecimiento a los 217 días, al registrarse las primeras heladas (-2.8° C), permitiendo abarcar un periodo de producción de 7 ½ meses (33 semanas).

#### 4.3.3.1. Altura de planta de la alfalfa y la festuca alta

La altura de planta se midió desde el nivel del suelo hasta el extremo más alto, sin tomar en cuenta la inflorescencia, en cuatro plantas seleccionadas al azar en cada UE, como recomiendan Delgadillo y Espinoza (2000). También se midió el peso de MS de la alfalfa, por el incremento de cada 10 cm en la altura de planta, para determinar la tasa media del crecimiento absoluto propuesta por Rodríguez (1991), mediante la siguiente expresión:

$$TCA = \frac{dP}{dt} \quad (12)$$

TCA : Tasa de crecimiento absoluto (g/día planta)  
dP : Incremento del peso de materia seca planta (g)  
dt : Intervalo de tiempo (día)

Para determinar el efecto de la temperatura en el crecimiento de la planta, se determinó la altura de crecimiento diario, en base a la altura media alcanzada por la alfalfa durante el corte, por el periodo de su desarrollo, de acuerdo a la siguiente relación matemática:

$$ACD = \frac{Apc}{TPD} \quad (13)$$

ACD : Altura de crecimiento diario (cm/día)  
TPD : Tiempo del periodo de desarrollo ( días)  
Apc : Altura de planta media al corte (cm)

La altura de la festuca alta se determinó midiendo desde el nivel de la formación del mantillo, hasta el punto más alto alcanzado por la hoja, sin tomar en cuenta la altura del tallo o culmo floral.

#### 4.3.3.2. Rendimiento de materia seca de la alfalfa y la festuca alta

La materia seca se determinó después del corte de la materia verde de 1 m<sup>2</sup> de área, a 8 cm de altura con una densidad media de 10 plantas m<sup>-2</sup>, al observarse la aparición de los nuevos rebrotes (Berlijn y Bernardon, 1996), del cual se tomó una submuestra de 200 g que fue secado inicialmente al ambiente y posteriormente en estufa a 75° C durante 24 h, hasta lograr un peso constante. El cálculo de la MS se realizó según la Ec. 14, modificada de Calderón (1995).

$$RMS = PHTM * \left[ \frac{PSSM}{PHSM} \right] * 10 \quad (14)$$

RMS : Rendimiento de materia seca hectárea (TM/ha)  
PHTM : Peso húmedo de la muestra (kg) del área cosechada (1m<sup>2</sup>)  
PSSM : Peso seco de la submuestra (g)  
PHSM : Peso húmedo de la submuestra (g)  
10 : Factor de transformación a TM/ha

La festuca alta se evaluó en dos cortes a los 13 y 25 semanas del inicio del trabajo, debido a su bajo crecimiento y desarrollo presentado. La materia seca fue evaluada con el mismo procedimiento utilizado para la alfalfa, realizando su corte desde el nivel del mantillo, en un 40 % de las UE donde tuvo al rededor un 20 % de participación.

#### 4.3.3.3. Relación hoja/tallo de la alfalfa

Esta variable fue medida tomando al azar 10 tallos de alfalfa por cada UE durante el corte, los cuales fueron desfoliados y pesados por separado, para luego ser secados en sobres al ambiente y posteriormente en estufa a 75° C durante 24 h; para luego obtener el valor de la relación H/T a través de la siguiente expresión:

$$RHT = \frac{PSF}{PST} \quad (15)$$

RHT : Relación hoja/tallo (g/g)  
 PSF : Peso seco de la parte foliar (g)  
 PST : Peso seco de la parte del tallo (g)

El contenido de proteína de la materia seca de la alfalfa se determinó a partir de la relación hoja/tallo; para ello se desarrolló la siguiente relación matemática (Ec. 16), en función al análisis bromatológico de materia seca de la alfalfa presentado por Sánchez (2004):

$$CTP = \left[ PH(h/t) * PPH + PT(h/t) * PPT \right] \quad (16)$$

CTP : Contenido total de proteína, para un determinado valor de la relación hoja/tallo (kg/kg MS)  
 PH : Porcentaje de hoja dentro de la MS cosechada (Cuadro A.34)  
 PPH : Porcentaje de proteína en la hoja, obtenida por análisis bromatológico  
 PT : Porcentaje total del tallo, dentro de la MS cosechada (Cuadro A.34)  
 PPT : Porcentaje de proteína del tallo por análisis químico. (Todos los porcentajes deben estar en tanto por uno)

#### 4.3.3.4. Eficiencia del uso de agua de la alfalfa

Esta variable fisiológica, fue determinado sobre la base del rendimiento de materia seca, obtenida por unidad de superficie, en relación a la lámina de agua aplicada hasta la etapa de corte, de acuerdo a la siguiente expresión matemática (17) modificada de Hillel (1980).

$$EUa = \frac{MS}{VAU} \quad (17)$$

EUa : Eficiencia de uso de agua (kg MS/m<sup>3</sup>de agua)  
 MS : Materia seca (kg)  
 VAU : Volumen de agua aplicado (m<sup>3</sup>)

#### 4.3.3.5. Análisis del costo de producción de una pradera de alfalfa asociada con festuca alta bajo riego por aspersión y fertilización fosfatada

El análisis económico se realizó sobre la base del beneficio/costo (B/C) para las láminas de riego, para una superficie de una hectárea. También se realizó el análisis de la tasa de retorno marginal (TRM), para establecer el tratamiento más recomendable.

Los costos fijos (CFa) fueron conformados, por el costo del establecimiento de la pradera asociada, la compra e instalación del sistema de riego. Los costos variables (CV) fueron estructurados por la fertilización, el roturado parcial, el mantenimiento y operación del sistema de riego, donde el costo total (CT) se determinó por la suma de ambos costos.

$$CT = CFa + CV \quad (18)$$

CT : Costos totales  
 CFa : Costos fijos anuales  
 CV : Costos variables

A la red de conducción y la motobomba del sistema de riego, fue asignada una vida útil de 10 y 6 años respectivamente, según las recomendaciones de fábrica; en cambio a la pradera asociada fue asignada 10 años de utilidad; donde el B/C fue analizado según las recomendaciones de Perrin *et al.*, (1998) y Yupanqui (2006).

La tasa de retorno marginal se determinó según la Ecuación 19, propuesta por Evans (2005), en base al porcentaje de beneficios que se obtienen, con relación a los costos variables totales utilizados por el cambio de tratamiento, al realizar una investigación agropecuaria.

$$TRM = \left[ \frac{^{\circ}BN}{^{\circ}CV} \right] * 100 \quad (19)$$

- $^{\circ}BN$  : Beneficios netos derivados del cambio de tratamiento
- $^{\circ}CV$  : Costos variables derivados del cambio de tratamiento

El precio de campo de la alfalfa y la festuca alta, se determinó según la recomendación hecha por Reyes (2001); extrayendo de cada unidad del precio de mercado, el costo de la cosecha, transporte y la comercialización del producto, mediante la siguiente relación matemática:

$$PCQ = PMQ - CU_{CTC} \quad (20)$$

- PCQ : Precio de campo del producto
- PMQ : Precio de mercado del producto
- $CU_{CTC}$  : Costo unitario de cosecha, transporte y comercialización

La tasa mínima de retorno (TAMIR), se determinó según la metodología propuesta por Reyes (2001), donde el costo de oportunidad del costo variable ( $COCV_i$ ) se determinó mediante la Ec. 21. Asimismo el tratamiento más rentable y los residuos fueron calculados mediante la Ec. 22.

$$COCV_i = CV_i * \left[ \frac{TAMIR}{100} \right] \quad (21)$$

$$RES_i = BN_i - \left[ \left( \frac{TAMIR}{100} \right) * CV_i \right] \quad (22)$$

- $RES_i$  : Residuo del i-ésimo tratamiento
- $BN_i$  : Beneficio neto del i-esimo tratamiento
- TAMIR : Tasa mínima de retorno
- $CV_i$  : Costo total variable del i-ésimo tratamiento
- $COCV_i$  : Costo de oportunidad de los costos variables

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

El rendimiento de materia seca, altura de planta, la relación hoja/tallo y el uso de agua de la alfalfa asociada con festuca alta, presentaron diferencias estadísticas significativas (P 0.05) principalmente por la aplicación de las láminas de riego y las profundidades del roturado parcial espaciado; los cuales se describen en los siguientes acápite.

### 5.1. Análisis del efecto de las láminas de riego en las variables de respuesta

#### 5.1.1. Rendimiento de materia seca de la alfalfa por las diferentes láminas de riego

Los rendimientos de materia seca de la alfalfa presentados en el Cuadro 5.1, son el resultado de la aplicación de las diferentes láminas de riego, que han permitido realizar tres cortes en estado de madures y un cuarto corte en la fase de crecimiento, ratificando el número de cortes logrados por Mendoza (2004), en la producción de alfalfa bajo riego por aspersión en el altiplano norte.

**Cuadro 5.1. Rendimiento de materia seca de la alfalfa por el efecto de las láminas de riego**

Laminas de riego (mm/semana)	Rendimiento de Materia Seca (TM/ha)					
	1er Corte	2do Corte	3er Corte	4to Corte	*Promedio	Total
Lámina A3 (32)	3.77	3.43	2.75	0.45	3.32	10.4
Lámina A2 (21)	2.39	1.5	1.15	0.41	1.68	5.46
Lámina A1 (Testigo)	1.01	0.7	0.74	0.39	0.82	2.81

\* = No toma en cuenta el RMS del 4to corte.

El mayor rendimiento de materia seca (10.4 TM/ha), registrado por la aplicación de una lámina semanal de 32 mm, fue atribuido a la mayor variación media del agua en el suelo entre los intervalos de riego; el cual registró 5.4 mm/día en la lámina A3, que fue superior al 1.6 mm/día registrado en la lámina A2.

Esta condición según Marchsner (1995), es esencial para la disolución y el transporte de nutrientes en el ámbito radicular de la planta; el mismo que puede haber originado una mayor asimilación de nutrientes, para dar lugar a una mayor producción de materia seca.

**Cuadro 5.2. Análisis de varianza del rendimiento de materia seca de la alfalfa por cortes**

Fuentes de Variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrados Medios	F Cal.	F Tab.	Sign.
Factor A	2	86 . 10209136	43 . 05104568	2042 . 31	6 . 94	*
Factor B	2	2 . 45675802	1 . 22837901	58 . 27	3 . 88	*
A x B	4	1 . 53650123	0 . 38412531	18 . 22	3 . 26	*
Factor C	2	0 . 36510617	0 . 18255309	8 . 66	3 . 26	*
A x C	4	0 . 32106420	0 . 08026605	3 . 81	2 . 63	*
B x C	4	0 . 08017531	0 . 02004383	0 . 95	2 . 63	ns
A x B x C	8	0 . 03765432	0 . 00470679	0 . 22	2 . 21	ns
Error	36	0 . 75886670	0 . 02107960			
Total	80	104 . 91721730				
Coeficiente de Variación		7 . 50				

\* = Significativo; ns = No significativo

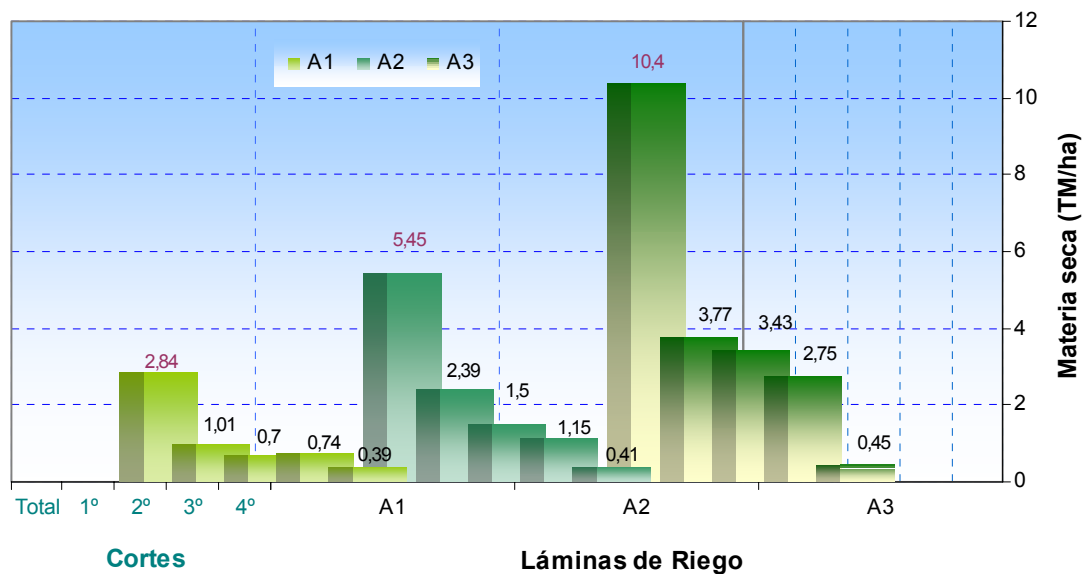
El coeficiente de variación de 7.5, registrada en el análisis de varianza del Cuadro 5.2, refleja la confiabilidad de los datos del rendimiento de materia seca obtenidos en campo, tomando en cuenta que esta representa, una poca variación de los datos registrados con relación a la media.

Las diferencias estadísticas significativas del rendimiento de materia seca entre cortes, por el efecto de las láminas de riego, profundidades del roturado parcial, fertilización fosfatada, la interacción del riego por las profundidades y el fósforo, presentadas en el Cuadro 5.2; fueron atribuidas a las diferencias: en la humedad del suelo, la aireación, la aproximación del agua al ámbito radicular y la diferencia en la disponibilidad del fósforo en el suelo respectivamente.

La diferencia del rendimiento de MS presentada en la Figura 5.1, de 10.4, 5.46 y 2.81 TM ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, correspondientes a las láminas A3, A2 y A1 respectivamente, refleja una amplia superioridad del rendimiento de MS, registrada en la lámina A3; el cual según Rodríguez (1991), surgiría por una mayor absorción del agua del suelo por la parte foliar y con ella las sales minerales necesarias para dar lugar a un mayor desarrollo de la planta.

Por tanto esta mayor producción de materia seca en la lámina A3, fue atribuida a la mayor humedad generada en el suelo entre 24 y 31 % (> CC: 25.4 %), después de la aplicación de una lámina de 4.57 mm/día, que fue 17 % mayor a la ET media diaria de la zona (3.82 mm/día); estableciendo que la alfalfa responde favorablemente a una humedad que permaneció alrededor del límite superior de la capacidad de campo.



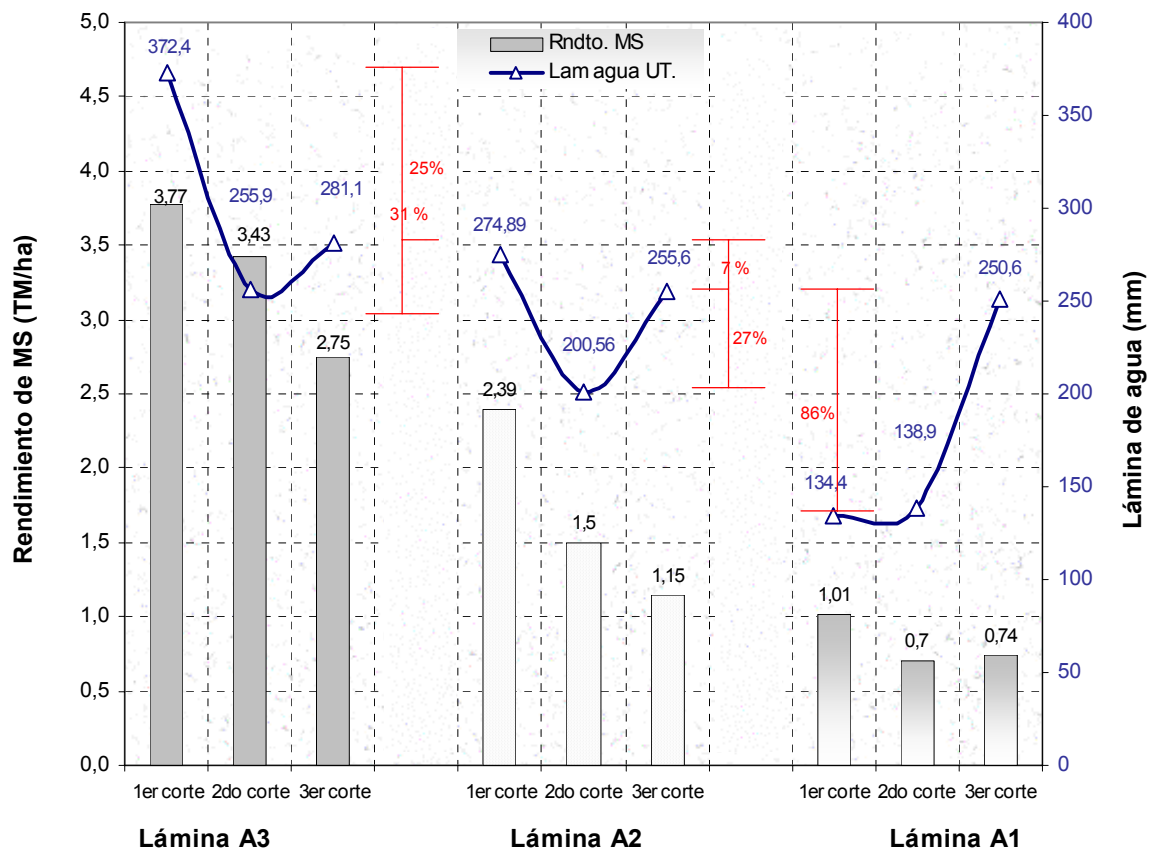


**Figura 5.1.** Rendimiento anual y por cortes de materia seca de la alfalfa, por la aplicación de las diferentes láminas de riego por aspersión.

Los rendimientos de materia seca de 3.77, 3.43 y 2.75 TM/ha, registrados en la lámina A3 en el 1er, 2do y 3er corte respectivamente, registró una superioridad del 9 y 27 % de MS del 1er corte con relación a los logrados en el 2do y 3er corte. Entre tanto la lámina de agua aplicada en el 1er corte fue 31 y 25 % mayor con relación a los aplicados en el 2do y 3er corte respectivamente.

Esta menor disminución de MS con relación a la lámina de agua aplicada, registrada en el 2do corte en la lámina A3, originó una mayor eficiencia del uso de agua (acápite 5.5); el cual fue atribuido en parte al incremento de la temperatura mínima, de 0.5 hasta 3.8° C próximo a los 5° C, que es considerado como la temperatura mínima óptima para el desarrollo de la alfalfa, según el MAGDR-PDLA (2001).

Según la FAO (2006), la disminución de la ETc afecta a la productividad, debido a la poca disponibilidad del agua útil en el suelo, ya sea por la salinidad o el estrés hídrico. Tomando en cuenta la importancia de la ET para la absorción del agua, esta también puede haber afectado a la producción de materia seca durante el 3er corte, al registrar una ET media de 3.3 mm/día que resultó ser el más bajo registrado en el estudio.



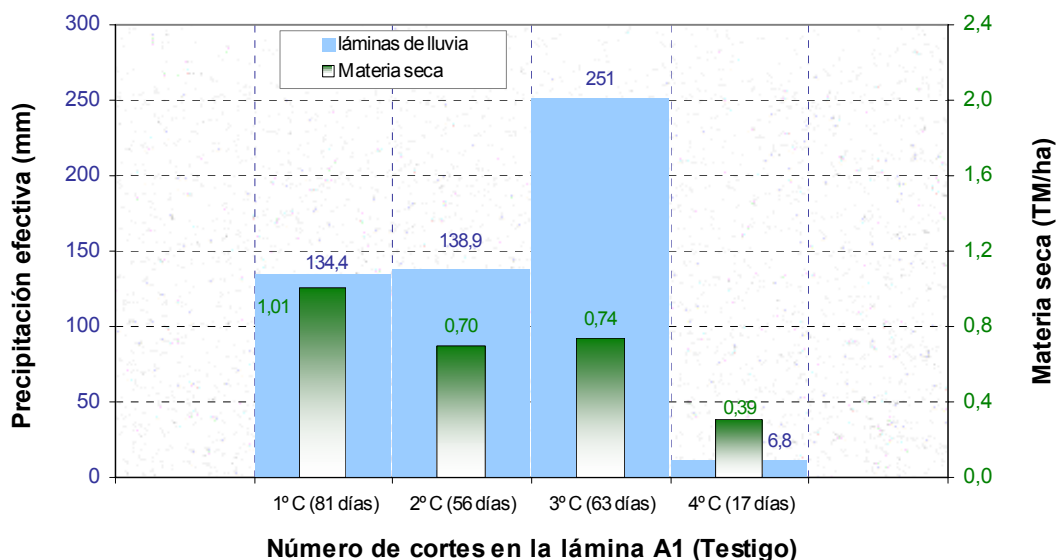
**Figura 5.2.** Rendimiento de materia seca de la alfalfa con relación a la lámina de agua aplicada en cada periodo de corte.

Los rendimientos de materia seca registrados en la lámina A2, de: 2.39, 1.5 y 1.15 TM/ha correspondientes al 1er, 2do y 3er corte, registraron una disminución del 37 y 52 % de MS durante el 2do y 3er corte con relación al 1er corte; en cambio la lámina de agua aplicada en el 2do y 3er corte fue 27 y 7 % inferior al 1er corte, reflejando de esta forma una mayor disminución de MS con relación a la lámina de agua aplicada.

Esta mayor disminución de materia seca, causó una baja eficiencia en el uso de agua, el cual se estima que fue causado por factores genéticos de la alfalfa; descartando el efecto del periodo de corte, debido a que este se realizó de acuerdo a la aparición de los nuevos rebrotes y la formación de los tallos secundarios, como signo de madures después de la acumulación de reservas en las raíces, como afirman Delgadillo y Espinoza (2000).

Pese a registrarse elevadas láminas de lluvia en el 2do y 3er corte con relación al 1er corte, el rendimiento de MS del testigo presentó una disminución del 31 y 27 % en el 2do y 3er corte respectivamente; lo que puede confirmar una reducción de origen genético, ya que el fin productivo de la alfalfa (semilla) en la región, es modificado para la producción de forraje verde o seco, por las adversas condiciones climáticas.

Asimismo esta mayor disminución de materia seca registrado en el 2do y 3er corte, en la lámina A1 (Figura 5.3), también puede haber sido agravada por la muy poca formación floral presentado durante el 1er corte (< 10 %), el cual se reflejó en el bajo vigor mostrado durante el 2do y 3er corte, a pesar de recibir una mayor lámina de agua con relación al 1er corte.



**Figura 5.3.** Rendimiento de materia seca de la alfalfa con relación a la precipitación pluvial, en los tratamientos sin riego (testigo).

La producción de materia seca de la alfalfa por el efecto de las láminas de riego, registró durante el cuarto corte un promedio de 0.416 TM/ha; esta similitud en la producción de materia seca, fue atribuida a la misma humedad alcanzada en todos los tratamientos, el cual registró 21.9 % (en base a peso) logrado a 85 cb de tensión, siendo el mismo uno de los más bajos registrados durante la investigación.

La poca diferencia en el rendimiento de MS, registrada en la lámina A3 durante el 1er y 2do corte, para diferentes periodos de desarrollo (81 y 56 días), también fue atribuida al ascenso de las temperaturas registradas en los meses de diciembre y enero; el cual según Aranda (1999), puede haber favorecido el uso oportuno de la demanda de agua de la alfalfa, porque la absorción del agua mejora con el ascenso de las temperaturas.

Asimismo la producción de MS, puede haber estado condicionado por el agua fácilmente aprovechable del suelo (AFA), como señala la FAO (2006), el cual registró después de 4 días del riego 3.87, 3.2 y 2,7 cm de agua en las láminas A3, A2 y A1 respectivamente; por lo que se puede afirmar, que el mayor agua aprovechable registrado en la lámina A3, puede haber originado una mayor y rápida absorción de los nutrientes del suelo.

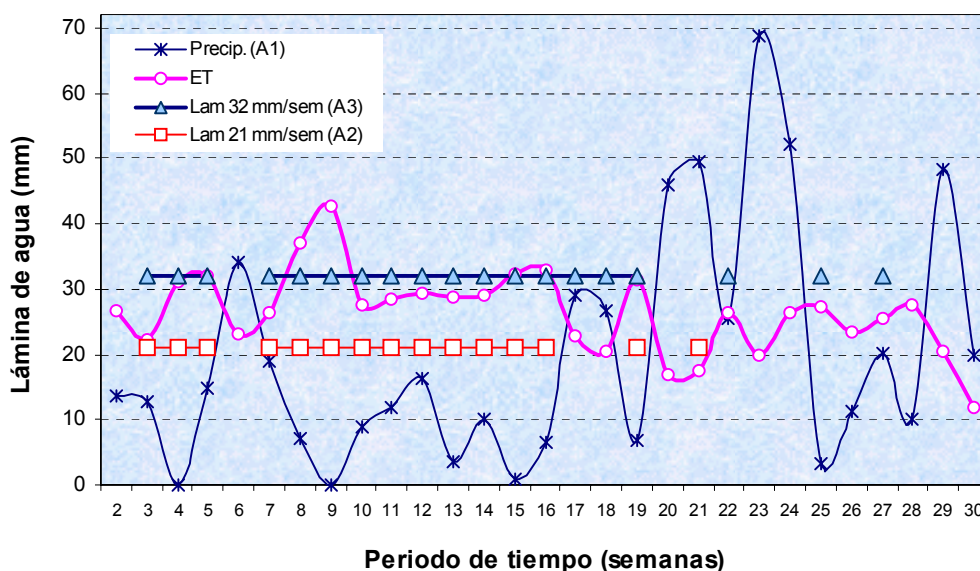
Por tanto, el incremento del 95 % en la producción de materia seca en la lámina A2, tiene relación con el 111 % del incremento de MS de la alfalfa (3.97 a 8.38 TM/ha), obtenido bajo riego por aspersión en el altiplano norte por Mendoza (2004), debido a que ambos riegos utilizaron láminas próximas e iguales a la ETc respectivamente.

La producción de 3.77 TM, MS/ha en la lámina A3, tiene relación con el 4.4 TM, MS/ha por corte bajo condiciones óptimas de riego y nutrientes, establecido para la *var. Bolivia 2000*, en los primeros años de producción por el MAGDR-PDLA (2001), en el altiplano norte; esto además permite afirmar que un adecuado proceso de riego, disminuye las diferencias en el rendimiento de MS, a pesar de la diferencia de edad de las praderas.

En consecuencia la mayor producción de MS lograda con una lámina semanal de 32 mm a 30 cm de profundidad, aclara que la alfalfa tiene una mayor actividad radicular en la capa arable; el cual puede confirmar lo señalado por Del Pozo (1983), que indica que la alfalfa extrae el 46 % de todo el agua que utiliza de los primeros 30 cm de profundidad del suelo, el 22 % de los siguientes 30 cm y el resto de las capas más profundas.

La mayor producción de MS lograda en la lámina A3, fisiológicamente puede haber estado relacionado a una mayor diferencia osmótica entre la interfase suelo-planta, el cual puede haber suscitado una mayor absorción del agua y nutrientes, como señala Baber (1980).

En la Figura 5.4, se muestra la ligera superioridad de la lámina A3 a la ET; asimismo se muestra la inferioridad de la lámina A2 y la precipitación (A1) con relación a la ET, los cuales conforme a su baja productividad con relación a la lámina A3, fueron considerados como láminas de agua insuficientes para la producción de la alfalfa.



**Figura 5.4.** Comparación de las láminas de riego aplicadas en la pradera, con la precipitación y la evapotranspiración semanal registrada en la zona.

### 5.1.2. Regresión y correlación lineal de la materia seca con la altura de planta en la producción de la alfalfa

El análisis de la regresión lineal (Cuadro 5.3), del rendimiento de materia seca en función a la altura de planta, fue altamente significativa con un coeficiente de correlación de 0.92, que representa una correlación directa. Esta relación lineal ( $Y = -1.61 + 0.104x$ ) representó un incremento promedio de 104 kg, MS/ha de alfalfa, por el incremento de cada centímetro en la altura de planta.

**Cuadro 5.3.** Regresión y correlación lineal de la materia seca con la altura de planta

Variable Dependiente	Variable Independiente	Ecuación de Regresión	Coefficiente de correlación	Significancia
Materia seca	Altura de planta	$Y = -1.61 + 0.104x$	0.92	**

\*\* = Altamente significativo

### 5.1.3. Altura de planta de la alfalfa por el efecto de las diferentes láminas de riego

**Cuadro 5.4. Análisis de varianza de la altura de planta de la alfalfa por cortes**

Fuentes de Variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrados Medios	F Cal.	F Tab.	Sign.
Factor A	2	7883 . 389877	3744 . 536790	4135 . 07	6 . 94	*
Factor B	2	7489 . 073580	85 . 183086	94 . 07	3 . 88	*
A x B	4	170 . 366173	12 . 890864	14 . 24	3 . 26	*
Factor C	2	51 . 563457	3 . 820864	4 . 22	3 . 26	*
A x C	4	7 . 641728	3 . 360864	3 . 71	2 . 63	*
B x C	4	13 . 443457	1 . 333272	1 . 47	2 . 63	ns
A x B x C	8	5 . 333086	0 . 662716	0 . 73	2 . 21	ns
Error	36	5 . 301728	0 . 905556			
Total	80	32 . 600000				
Coeficiente de Variación		2 . 78				

\*= Significativo; ns = No significativo

El coeficiente de variación de 2.78, del análisis de varianza de la altura de planta del Cuadro 5.4, representa una poca dispersión de los datos con relación a la media, el cual representa la confiabilidad de los datos de la altura de planta obtenidas en campo.

El análisis de varianza de la altura de planta (Cuadro 5.4), mostró diferencias estadísticas significativas por el efecto de las láminas de riego, profundidades del roturado parcial, niveles de fósforo, la interacción del riego por las profundidades y la interacción del riego por los niveles de fósforo. Los cuales pueden ser atribuidos a la diferencia de humedad del suelo originada por las diferentes láminas de riego, la variación de la aireación del suelo y la diferencia de la disponibilidad del fósforo en el suelo.

La altura media de la alfalfa, registrada por el efecto de las láminas de riego A3, A2 y A1 registró 43.6, 33.7 y 21.8 cm respectivamente, reflejando una mayor altura lograda bajo una lámina semanal de 32 mm, con 21.8 cm más de altura con relación a los registrados en los tratamientos sin riego, como se muestra en el siguiente Cuadro (5.5).

**Cuadro 5.5. Altura media de la alfalfa por cortes**

Láminas de riego (mm/semana)	Altura de planta (cm)				
	1er corte	2do corte	3er corte	4to corte	Promedio*
Lámina A3 (32)	44.83	45.72	40.38	14.6	43.64
Lámina A2 (21)	33.69	35.75	31.78	13.9	33.74
Lámina A1 (sin riego)	22.95	20.72	21.95	14.2	21.87

\* = Promedio de la altura de planta, no toma en cuenta la altura media de planta del 4to corte

Las mayores alturas de planta registradas en el 2do corte, en las láminas A3 y A2 (Cuadro 5.5), se estima que fueron favorecidos en parte por el incremento de las temperaturas, permitiendo un mayor alargamiento de los tallos; ya que una temperatura mínima mayor a los 5° C, favorece una adecuada actividad enzimática, el cual es la base del crecimiento y el desarrollo de las plantas como afirma Lira (1994).

Esta mayor altura lograda por la alfalfa en las láminas A3 y A2 durante el 2do corte, fue atribuida a un mayor alargamiento de los tallos, el cual originó una menor producción de materia seca con relación a los logrados en el 1er corte.

Según Muslera (1984), el alargamiento de los tallos de la alfalfa se origina debido a una mayor asimilación de los hidratos de carbono; el cual puede haber sido expresado en la lámina A3 al lograrse las mayores alturas de planta, los mismos que pueden haber estado favorecidos por la mayor humedad alcanzada en el suelo entre 24 y 31 %.

Asimismo el buen desarrollo foliar mostrado por la alfalfa bajo condiciones de riego, según Muslera (1984), representa a su alto nivel proteínico, debido a una mayor absorción del N<sub>2</sub> que proviene principalmente del 70 % de la fijación microbiana, el mismo que en la pradera se localizó a partir de los 6 cm de profundidad, bajo una temperatura media de 14° C, muy por debajo de los 22° C establecido como el óptimo por el citado autor.

#### **5.1.3.1. Altura de crecimiento diario de la alfalfa**

Las alturas medias del crecimiento diario de la alfalfa (ACD), registraron una variación de acuerdo a las láminas de riego y la variación de la temperatura mínima registrada en cada corte, como se muestra en el Cuadro 5.6, y la Figura 5.5.

Las mayores diferencias en la ACD registradas en el 2do corte en las láminas A3 y A2, fueron atribuidas al incremento de la temperatura mínima de 0.5 a 3.8° C; el cual según Lira (1994), puede haber originado una mayor tasa transpirativa en la alfalfa, motivando una mayor absorción del agua y nutrientes.

**Cuadro 5.6. Altura media del crecimiento diario de la alfalfa**

Riego	Altura media del crecimiento diario de la alfalfa									
	1er Corte		2do Corte		3er Corte		4to Corte		Promedio	
	Apc (cm)	ACD (cm/día)	Apc (cm)	ACD (cm/día)	Apc (cm)	ACD (cm/día)	Apc (cm)	ACD (cm/día)	Apc* (cm)	ACD (cm/día)
A3	44.83	0.55	45.72	0.80	40.38	0.63	14.6	0.42	43.64	0.57
A2	33.69	0.41	35.75	0.62	31.78	0.49	13.9	0.40	33.74	0.46
A1	22.95	0.28	20.72	0.36	21.95	0.34	14.2	0.41	21.87	0.32

Apc = Altura de planta media al corte; ACD = Altura media del crecimiento diario; Apc\* = Altura promedio anual no toma en cuenta el Apc del cuarto corte.

Durante el crecimiento de la alfalfa, se ha observado que la parte foliar tolera hasta  $-1^{\circ}$  C de temperatura mínima, con la consiguiente retención del crecimiento; asimismo este parámetro disminuyó hasta 0.1 cm/día en la fase inicial del desarrollo del 1er corte, al registrarse temperaturas mínimas de  $0^{\circ}$  C.

### 5.1.3.2. Tasa de crecimiento absoluto de la alfalfa

La tasa media del crecimiento absoluto presentada en el Cuadro 5.7, registró durante el 2do corte en la lámina A3: 2.11 g MS/día planta, que resultó ser el más alto registrado en el estudio, originando un mayor y rápido desarrollo de la alfalfa; el cual a su vez dio lugar a un acortamiento del periodo de corte en 25 días, con relación al 1er corte.

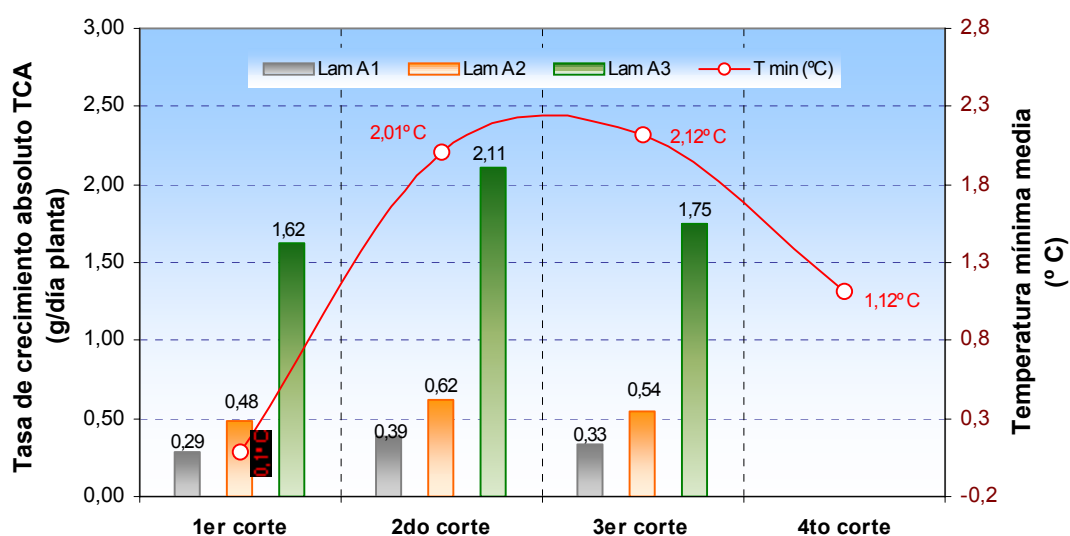
**Cuadro 5.7. Tasa media del crecimiento absoluto de la alfalfa**

Láminas de riego (mm/semana)	Tasa de crecimiento absoluto (TCA) (g/día planta)			
	1er Corte	2do Corte	3er Corte	Promedio
Lámina A3 (32)	1.62	2.11	1.75	1.83
Lámina A2 (21)	0.48	0.62	0.54	0.55
Lámina A1 (sin riego)	0.29	0.39	0.33	0.34

La mayor TCA registrada en el 2do corte, puede haber estado favorecido por una mayor actividad enzimática en la alfalfa por el aumento de las temperaturas, el cual puede haber acelerado sus reacciones bioquímicas, motivando una mayor y rápida formación del tejido vegetal, como señala Rodríguez (1991); el cual para Meneses *et al.*, (1996), está limitado por la temperatura cardinal, el mismo que en la alfalfa varía de 5 a  $30^{\circ}$  C.



Según la Figura 5.5, las mayores limitantes de la TCA fueron la temperatura mínima y el agua, los cuales alcanzaron una mayor notoriedad durante el 2do corte en la lámina A3, al registrar una TCA media de 2.11 g MS/día planta; en cambio en las láminas A2 y A1 se lograron durante este corte 0.62 y 0.39 g MS/día planta, reflejando un bajo incremento en el peso de la alfalfa, debido a la escasa disponibilidad del agua en el suelo.



**Figura 5.5.** Tasa de crecimiento absoluto de la alfalfa (TCA), analizada a partir del incremento de la temperatura mínima.

De la misma forma la Figura 5.5, evidencia lo manifestado por el MAGDR-PDLA (2001), que señalan, que el desarrollo de la alfalfa depende de la temperatura del medio, el cual puede ocasionar la disminución y la retención del crecimiento, al registrarse temperaturas inferiores a los 5° C.

#### 5.1.4. Relación hoja/tallo de la alfalfa por el efecto de las láminas de riego

La relación hoja/tallo, fue considerada como el parámetro cualitativo más importante, para determinar la calidad del forraje, el cual en el presente trabajo de investigación, tuvo un patrón de variabilidad en función a la longitud del tallo.

**Cuadro 5.8. Análisis de varianza de la relación hoja/tallo de la alfalfa por cortes**

Fuentes de Variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrados Medios	F Cal.	F Tab.	Sign.
Factor A	2	0.40222963	0.20111481	159.40	6.94	*
Factor B	2	0.03860000	0.01930000	15.30	3.88	*
A x B	4	0.00588148	0.00147037	1.17	3.26	ns
Factor C	2	0.00606667	0.00303333	2.40	3.26	ns
A x C	4	0.00394815	0.00098704	0.78	2.63	ns
B x C	4	0.00891111	0.00222778	1.77	2.63	ns
A x B x C	8	0.00798519	0.00099815	0.79	2.21	ns
Error	36	0.04542222	0.00126173			
Total	80	0.58115556				
Coeficiente de Variación		3.18				

\* = Significativo; ns = No significativo

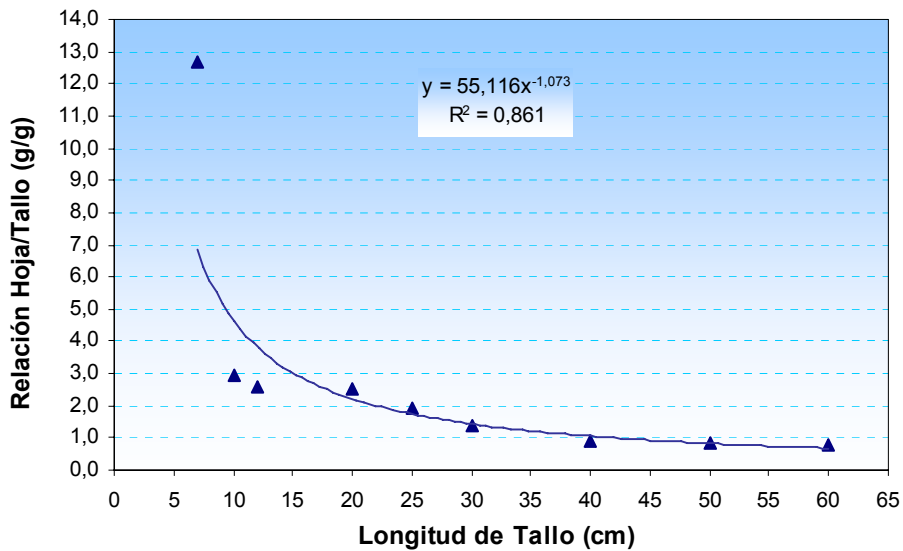
El análisis de varianza del Cuadro 5.8, con un CV de 3.18 refleja la confiabilidad de los datos obtenidos en campo; donde las diferencias estadísticas significativas de la relación hoja/tallo registradas por el efecto de las laminas de riego y las profundidades del roturado parcial, fueron atribuidas a la diferencia en la altura de planta logradas bajo riego y las profundidades de aireación del suelo.

#### 5.1.4.1. Análisis de la relación hoja/tallo de la alfalfa

Para Burgoa (1995), citado por Tarqui (2005), la relación hoja/tallo en la alfalfa representa a su valor nutritivo, el mismo que varía según su estado de madures; esta afirmación coincide con los análisis realizados en el presente estudio, al establecer que la materia seca de las hojas y los tallos varían de acuerdo al estado de madures de la alfalfa.

En el presente trabajo de investigación, se determinó que la relación hoja/tallo estuvo en función a la altura de planta como se muestra en la Figura 5.6, el cual fue representado mediante la siguiente relación potencial  $Y=55,116x^{-1.073}$ , que establece que a una mayor longitud del tallo disminuye la relación hoja/tallo.

Por lo que la relación H/T también está relacionado con la determinación de la altura de corte, al asumir que el rebrote requiere de un remanente con cierta área foliar, para aportar al crecimiento de la planta mediante la fotosíntesis, como afirma Sánchez (2004); por ello una mayor altura de planta requerirá una mayor altura de corte, el cual puede ser orientado por el análisis de la Figura 5.7.

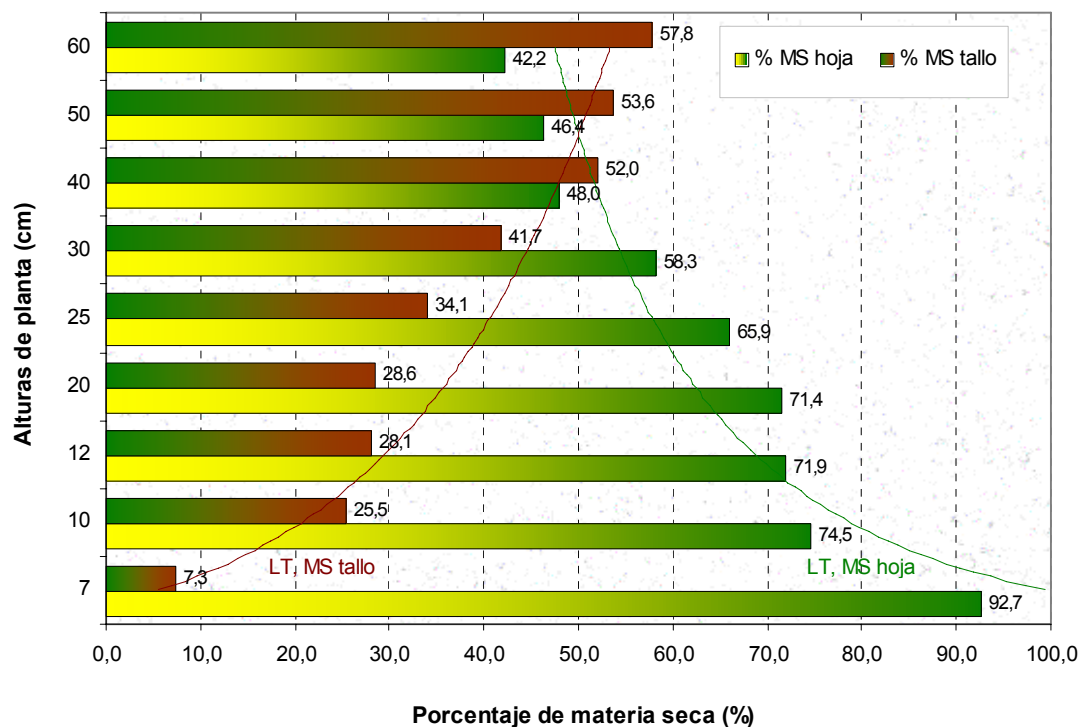


**Figura 5.6.** Variación de la relación hoja/tallo de la alfalfa, con relación a la longitud del tallo.

Las diferencias del contenido de materia seca tanto en la hoja como en el tallo, están relacionados con el contenido de proteína, el cual está en función a la fase de desarrollo y el objetivo de su uso. Estas condiciones para Cooper y Morris (1986), están afectadas por el estado de madures progresiva del forraje, el cual reduce el contenido de proteínas con el consiguiente aumento del contenido de fibra.

En la Figura 5.7, se muestra la variación del contenido de materia seca de las hojas y los tallos a diferentes alturas de la alfalfa, el cual permite estimar que el mayor porcentaje de materia seca en la hoja, puede obtenerse en plantas jóvenes con una altura media de 40 cm, cuando la planta alcanza cerca de un 60 % de MS en la hoja.

Asimismo el análisis de la misma Figura (5.7), muestra una disminución progresiva de la MS de la hoja con el incremento de la altura de planta; el cual según Cooper y Morris (1986), disminuye la digestibilidad del forraje debido a un alto contenido de fibra y bajo de proteína, ocasionado por la madures fisiológica de la planta.

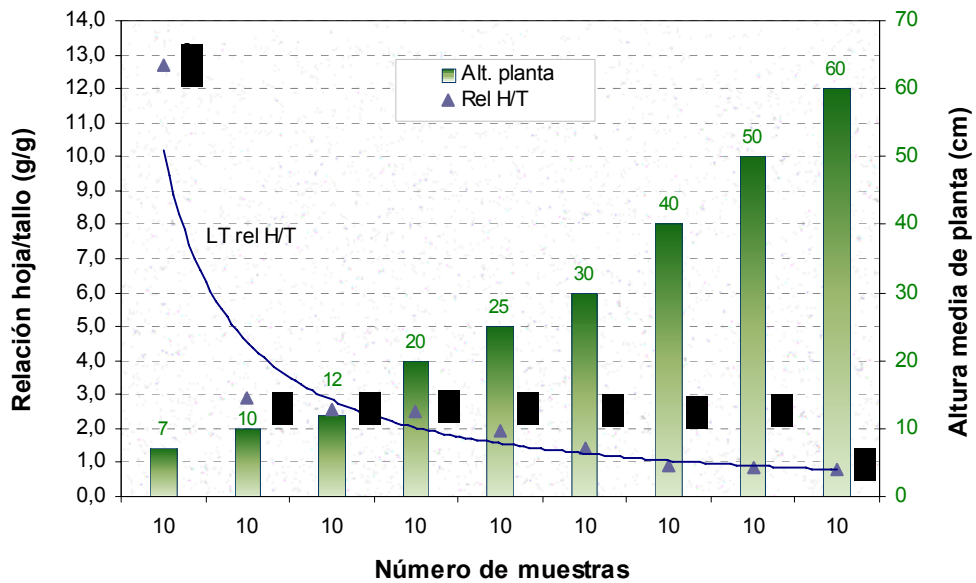


LT, MS = Línea de tendencia de la materia seca

**Figura 5.7.** Contenido de materia seca en las hojas y tallos de la alfalfa, con relación a la altura de planta.

De acuerdo al contenido proteínico de Sánchez (2004), Alzérreca y Cardozo (1991), se estima que las  $\frac{3}{4}$  partes correspondientes a la parte superior del tallo, contienen el mayor porcentaje de hojas y por consiguiente un alto contenido de proteína y bajo de fibra. Esta variación de la concentración de hojas en los forrajes según Cooper y Morrís (1986), también representa el grado de palatabilidad de las especies forrajeras.

En la Figura 5.8, se muestra la relación hoja/tallo obtenida a diferentes alturas de planta, observándose que la relación H/T es mayor a una menor altura de planta y es menor al registrarse una mayor altura. Lo que permite señalar que la mayor relación H/T registrado en las plantas a secano, son el resultado de una ligera superioridad foliar registrado en la poca altura alcanzada por la alfalfa, debido al estado de madures avanzada.



LT rel H/T = línea de tendencia de la relación hoja/tallo

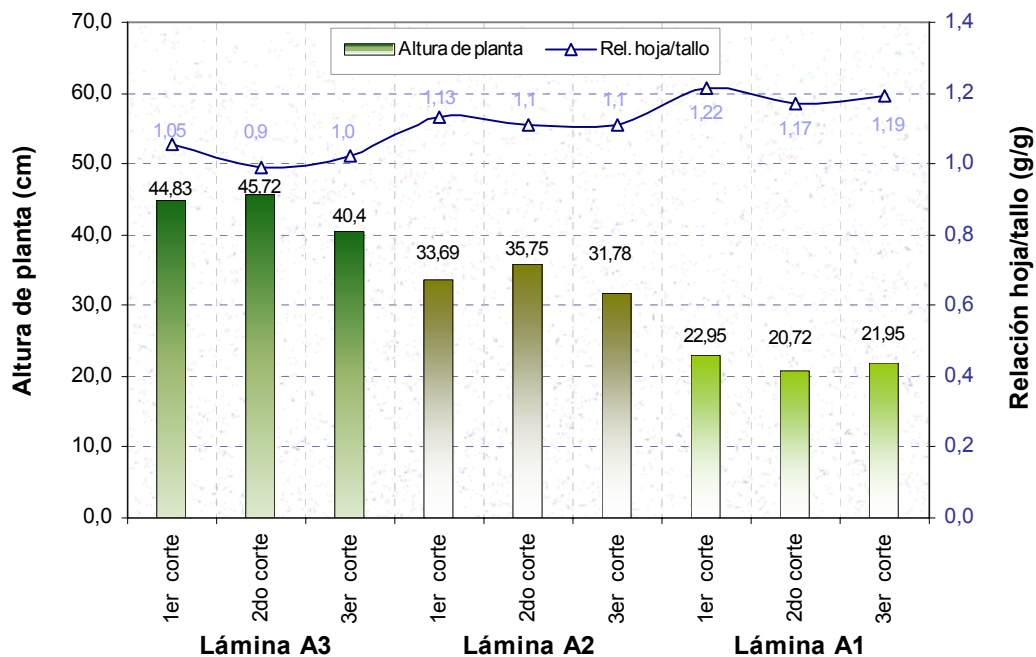
**Figura 5.8.** Variación de la relación hoja/tallo con la altura de planta en la alfalfa.

El valor uno (1) de la relación H/T, representaría cerca del 69 % de proteína aprovechable en la hoja y 31 % en el tallo (analizado según porcentaje de proteína de Sánchez (2004)); el cual varía de acuerdo a la relación H/T y disminuye en forma general con la madures avanzada de la planta. Por tanto así como señalan Berlijn y Benardon (1996), la relación hoja/tallo es el parámetro más importante para determinar la calidad de los forrajes con relación al contenido de proteínas.

**Cuadro 5.9.** Relación hoja/tallo de la alfalfa por el efecto de las diferentes láminas de riego

Láminas de riego (mm/semana)	Relación hoja/tallo (g/g)			Promedio (g/g)
	1er corte	2do corte	3er corte	
Lámina A3 (32)	1.056	0.99	1.02	1.02
Lámina A2 (21)	1.131	1.11	1.11	1.12
Lámina A1 (sin riego)	1.214	1.17	1.19	1.19

La mayor relación hoja/tallo registrada en los tratamientos sin riego, presentados en el Cuadro 5.9 y la Figura 5.9, son el resultado de la menor altura alcanzada por la alfalfa (A1: 22 cm), poniendo en evidencia que la relación hoja/tallo, tiene una estrecha relación con la longitud del tallo.



**Figura 5.9.** Relación hoja/tallo de la alfalfa, por la aplicación de las diferentes láminas de riego.

Durante el 2do corte, la relación hoja/tallo registró los valores más bajos, los cuales fueron atribuidos al mayor alargamiento de los tallos, que fue reflejada en las mayores alturas de crecimiento diario al registrar 0.36, 0.62 y 0.8 cm/día correspondientes a las láminas A1, A2 y A3 respectivamente.

De acuerdo a los resultados obtenidos por Tarqui (2005), respecto a la relación H/T de la alfalfa bajo condiciones de riego por aspersión, registró una media de 0.7 para una altura de 70 cm, el cual refleja una disminución de la materia seca de las hojas a una mayor altura de planta, así como se registró en el presente estudio.

Asimismo el análisis de los resultados de la relación H/T, establece que por cada  $\pm 0.1$  del valor 1.0 de la relación H/T se registraría una pérdida o ganancia de  $\pm 5\%$  de proteína; estableciendo que el corte a una mayor altura de planta, registrará un menor contenido de proteína, ratificando lo señalado por Muslera (1984), que indica que la reducción del valor nutritivo del forraje, aumenta al disminuir el peso de la materia seca de las hojas.

En consecuencia la relación hoja/tallo, permite estimar la cantidad de fibra y proteína de la alfalfa, el cual varía de acuerdo a la fenología, altura y estado de madures de la planta, donde su aprovechamiento depende del objetivo de su uso; ya que así como señala Sánchez (2004), el valor energético y proteínico de las leguminosas forrajeras disminuye considerablemente cuando la planta alcanza hasta el 90 % de contenido de fibra.

## 5.2. Análisis del efecto de las profundidades del roturado parcial espaciado en las variables de respuesta

### 5.2.1. Rendimiento de materia seca de la alfalfa por el efecto de las profundidades

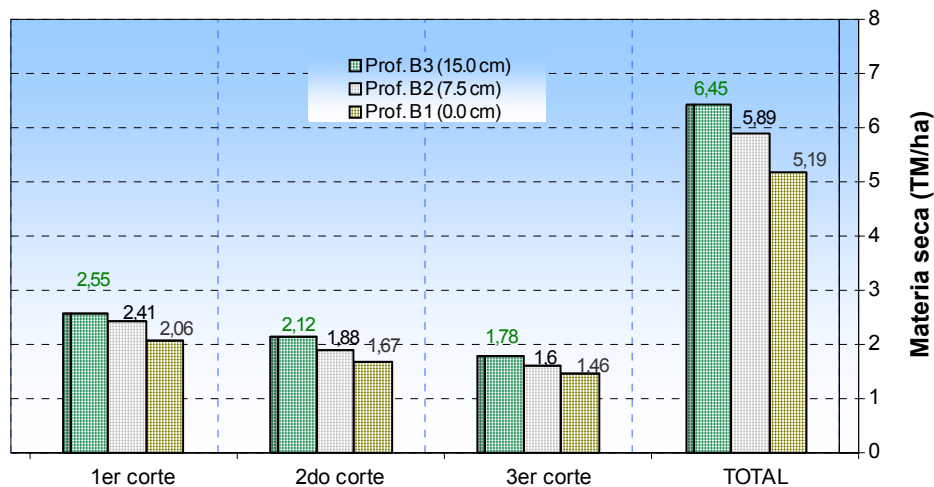
El rendimiento de materia seca por el efecto de las profundidades (Cuadro 5.10), registró 6.45, 5.89 y 5.15 TM/ha correspondientes a las profundidades B3 (15 cm), B2 (7.5 cm) y B1 (0.0 cm) respectivamente, que representó el 9.5 y 25.2 % superior del rendimiento de MS de la profundidad B3, con relación a las profundidades B2 y B1 respectivamente.

Estas diferencias en el rendimiento de materia seca por el efecto de las profundidades, pueden ser atribuidos a una mayor aireación del suelo producida a 15 cm de profundidad (B3), fundamentalmente durante el primer corte como se muestra en el siguiente Cuadro (5.10).

**Cuadro 5.10. Rendimiento de materia seca de la alfalfa por el efecto de las profundidades**

Profundidades del roturado parcial y espaciado (cm)	Rendimiento de Materia Seca (TM/ha)				
	1er Corte	2do Corte	3er Corte	Promedio	Total
Profundidad B3 (15.0)	2.55	2.12	1.78	2.15	6.45
Profundidad B2 (7.5)	2.41	1.88	1.60	1.96	5.89
Profundidad B1 (0.0)	2.06	1.67	1.46	1.73	5.19

La poca diferencia porcentual registrada entre los rendimientos de materia seca de la profundidad B3 y B2, presentados en la Figura 5.10, puede ser el resultado de una poca diferencia de aireación del suelo, producido entre 7.5 y 15 cm de profundidad, o en su caso a la misma actividad radicular entre estas profundidades.



**Figura 5.10.** Rendimiento de materia seca de la alfalfa por el efecto de las profundidades.

La creciente disminución del rendimiento de MS, en la profundidad B3 de 20 a 43 % y de 28 al 51 % en la profundidad B2 durante el 2do y 3er corte respectivamente, fue atribuida a la reducción de la aireación del suelo; en cambio la menor disminución de 23 al 40 % registrado en la profundidad B1, puede ser atribuido a la genética de la alfalfa, tomando en cuenta que en este tratamiento no se realizó el roturado parcial.

La disminución del rendimiento de MS durante el 3er corte, en las profundidades B3 y B2 en un 43 y 51 % respectivamente, fue mayor al 40 % registrado en el testigo (B1); esta diferencia puede confirmar el corto efecto periódico de la aireación del suelo y un mayor efecto genético.

Asimismo para Baber (1980), el alto contenido de MO (4.05 %) registrada en la pradera de alfalfa, concentraría una mayor cantidad de CO<sub>2</sub> antes de la época de lluvias, el cual puede haber sido equilibrada con la aireación del roturado parcial realizado en la pradera, permitiendo la renovación del aire principalmente en el primer corte.

Esta diferencia entre la concentración del O<sub>2</sub> y el CO<sub>2</sub> en el suelo, se equilibraría en los siguientes cortes por el O<sub>2</sub> aportado por el agua del riego y las lluvias, según lo señalado por Baber (1980), el cual también puede haber ocasionado, la escasa diferencia en la producción de materia seca por el efecto de las profundidades.



Por tanto la disminución del rendimiento de MS, registrado en el 2do y 3er corte en las profundidades B3 y B2, puede ser atribuida a la reducción de la aireación del suelo, por el efecto del riego y las lluvias caídas sobre la pradera, como afirma Ramos (1994), quien además estableció que el aumento de la porosidad del suelo, por un subsolado superficial entre 8-18 cm de profundidad, persiste alrededor de 90 días y después de este periodo de tiempo, vuelve a ser igual a su estado inicial.

De acuerdo a Narro (1994), la oxigenación del suelo favorece la solubilidad del  $\text{Fe}^3$ ,  $\text{Mg}^2$  y aumenta la solubilidad de los minerales fosfatados, debido al  $\text{CO}_2$  disuelto en la solución del suelo; al parecer estos procesos de aireación hasta 15.0 cm de profundidad y la mayor presencia del *Rizobium meliloti* a partir de los 6 cm de profundidad, favorecieron una mayor formación del  $\text{NO}_3^-$  y otros elementos básicos, que dieron origen a una mayor producción de MS de la alfalfa.

En consecuencia la aireación del suelo realizada en la pradera, tuvo un efecto relevante en la producción de materia seca especialmente en el 1er corte; el cual según Morales (1987), vendría de una mayor asimilación de sustancias nutritivas, a partir de una mayor actividad de microorganismos aeróbicos, como son los *Nitrosomas*, *Nitrobacters* y otros.

### **5.2.2. Altura de planta de la alfalfa por el efecto de las profundidades**

Las diferencias estadísticamente significativas de la altura de planta, por el efecto de las profundidades (Cuadro 5.11), presentó una estrecha diferencia en los tres cortes, donde la altura media anual de la alfalfa de la profundidad B3, registró una superioridad del 3 y 11 %, que representó 1.1 y 3.2 cm más de altura que los logrados en las profundidades B2 y B1 respectivamente.

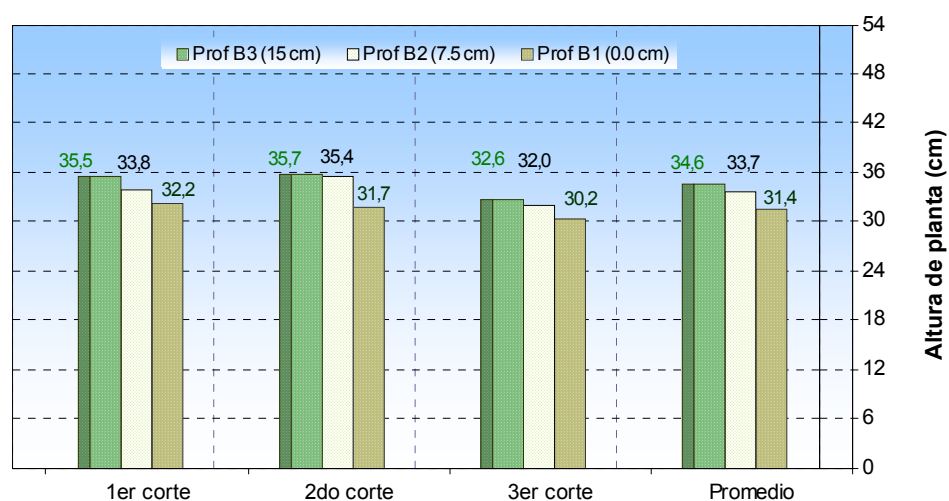
La poca diferencia registrada en la altura de planta, entre las profundidades B3 y B2 durante el 2do y 3er corte, confirma lo señalado por Ramos (1994), en que la aireación del suelo tiene un corto periodo de duración; por lo que su efecto fue más notorio sobre la altura de planta durante el primer corte.

**Cuadro 5.11. Altura media de la alfalfa por el efecto de las profundidades**

Profundidades del roturado parcial (cm)	Altura de planta (cm)			
	1er Corte	2do Corte	3er Corte	Promedio
Profundidad B3 (15.0)	35.5	35.7	32.6	34.6
Profundidad B2 (7.5)	33.8	35.4	32.0	33.7
Profundidad B1 (0.0)	32.2	31.7	30.2	31.4

B1 = Testigo

En la Figura 5.11, se representan las alturas medias de la alfalfa por el efecto de las profundidades, donde se observa una muy poca diferencia entre las alturas logradas en las profundidades B3 y B2; el cual fue atribuida a las mismas condiciones de aireación producida entre 7.5 y 15 cm de profundidad, dando como resultado una similitud en las alturas medias de la planta.



**Figura 5.11. Altura media de la alfalfa por el efecto de las profundidades del roturado parcial espaciado.**

La poca diferencia registrada en la altura de planta por el efecto de las profundidades, le constituyen en un factor de poca importancia en el desarrollo de la altura de planta; estableciendo su poca efectividad a partir del segundo corte, el cual también puede haber sido causado por las diversas actividades desarrollados sobre la pradera.

Tomando en cuenta que la aireación del suelo, también favorece una mayor absorción del agua y nutrientes como señala Narro (1994); este presentó diferencias poco relevantes en el incremento de la altura de planta a 7.5 y 15 cm de profundidad, el cual puede haber estado relacionado a una deficiente actividad radicular, limitado por otro factor que no favoreció alcanzar una mayor diferencia en la altura de planta.

Por tanto la ineficiencia de las profundidades del roturado parcial, para producir un mayor crecimiento de la alfalfa, puede ser mejorado al ser asociado a factores de importancia como el riego, para permitir una mayor absorción de elementos estructurales como los hidratos de carbono, los cuales según Muslera (1984), favorecen el crecimiento de los tallos de la alfalfa, a partir de una mayor actividad foliar.

En consecuencia, para mejorar la pobre eficiencia de las profundidades de aireación del suelo sobre la altura de planta, resultaría importante realizar un roturado parcial espaciado en cada corte, debido a su efímera permanencia como factor de importancia después del primer corte.

### 5.2.3. Relación hoja/tallo de la alfalfa por el efecto de las profundidades

La relación hoja/tallo por el efecto de las profundidades, registró características similares a los obtenidos por el efecto de las láminas de riego, al presentar una menor relación hoja/tallo al registrarse una mayor altura de la alfalfa, como se muestra en el siguiente Cuadro (5.12).

**Cuadro 5.12. Relación hoja/tallo de la alfalfa por el efecto de las profundidades**

Profundidades del roturado parcial (cm)	Relación hoja/tallo (g/g)			
	1er corte	2do corte	3er corte	Promedio
Prof. B1 (0.0)	1.16	1.10	1.14	1.13
Prof. B2 (7.5)	1.14	1.11	1.09	1.11
Prof. B3 (15.0)	1.10	1.06	1.09	1.08

H/T = Relación hoja/talo (gramo/gramo)

Las diferencias estadísticas significativas de la relación H/T, presentadas en el 1er y 2do corte por el efecto de las profundidades (Cuadro A.23), registró en la profundidad B1 una mayor relación hoja/tallo con relación a las profundidades B2 y B3. Esta superioridad fue atribuida a la menor altura alcanzada por la alfalfa en los tratamientos sin roturado.

La poca diferencia de la altura de planta lograda en los diferentes niveles de profundidad, originó una relación H/T de muy poca variación, logrando un 2 y 4.4 % de superioridad de la relación H/T de la profundidad B1 (0.0 cm), con relación a las profundidades B2 y B3. Esta pequeña diferencia ratifica que la relación hoja/tallo, varía muy poco en plantas que alcanzan la misma altura.

La relación H/T con valores promedios alrededor de uno (1), obtenidas en la pradera bajo diversas condiciones, confirma el carácter promisorio que posee la *variedad Bolivia 2000* mencionada por el MGDR-PDLA (2001), quienes además indican que esta es la variedad con una mayor relación hoja/tallo y por consiguiente posee una mayor productividad.

### **5.3. Análisis del efecto de los niveles de fertilización fosfatada en las variables de respuesta**

#### **5.3.1. Rendimiento de materia seca de la alfalfa por el efecto de la fertilización fosfatada**

El rendimiento de materia seca de la alfalfa por el efecto de los niveles de fósforo, fueron estadísticamente no significativas durante el primer y segundo corte (Cuadro A. 21), el cual fue atribuido a la fijación temporal del fósforo en el suelo.

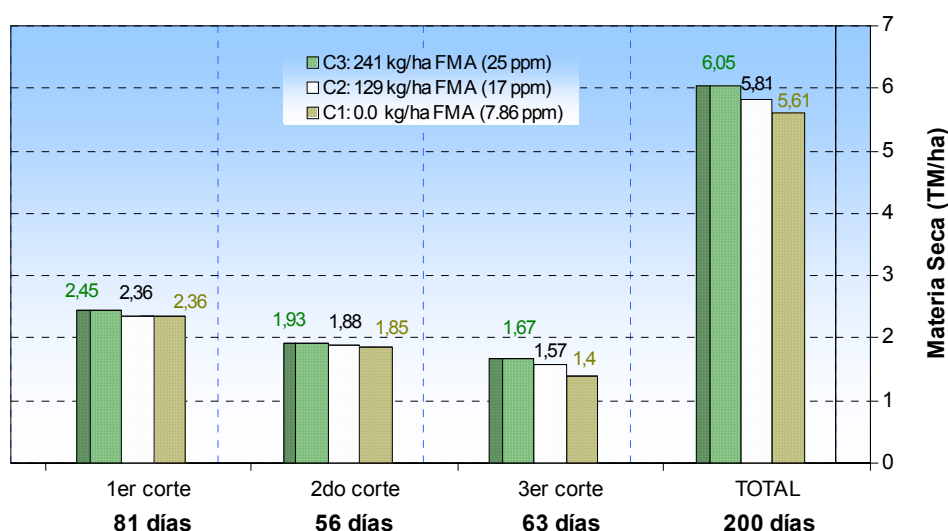
En el Cuadro 5.13, el rendimiento anual de materia seca por el efecto del fósforo, registró un 4.1 y 7.8 % superior del nivel C3 con relación a los niveles C2 y C1 respectivamente; esta diferencia fue el resultado de una mayor diferencia en la producción de MS durante el 3er corte, debido a que se registró una mayor disponibilidad del fósforo en el suelo.

**Cuadro 5.13. Rendimiento de materia seca de la alfalfa por el efecto de la aplicación de los diferentes niveles de fósforo**

Niveles de Fósforo (ppm)	Rendimiento de Materia Seca (TM/ha)				
	1er Corte	2do Corte	3er corte	Promedio	Total
C3: 25.0 (241 kg/ha FMA)	2.45	1.93	1.67	2.02	6.05
C2: 17.0 (129 kg/ha FMA)	2.36	1.88	1.57	1.94	5.81
C1: 7.86 (0.0 kg/ha FMA)	2.36	1.85	1.40	1.87	5.61

C1 = Sin fertilización fosfatada

La disminución progresiva del rendimiento de materia seca de la alfalfa, presentada en la Figura 5.12, también fue atribuida a la genética de la alfalfa y la escasa diferencia de la disponibilidad de fósforo entre los niveles aplicados, causado por el mayor porcentaje de fijación registrado en el suelo, según el análisis del Cuadro 5.14.



**Figura 5.12. Rendimiento de Materia seca de la alfalfa, por el efecto de los diferentes niveles de fertilización fosfatada.**

Según los resultados logrados en el rendimiento de materia seca, se estima que durante el 1er y 2do corte se presentaron, los más elevados porcentajes de retención del fósforo aplicado; el mismo que durante el 3er corte registró 11.8 y 14.7 ppm de disponibilidad en los niveles C2 y C3 respectivamente, el cual puede haber originando las diferencias estadísticas significativas en la producción de materia seca.

El análisis de la disponibilidad del fósforo en el suelo del Cuadro 5.14, se realizó por la exigua respuesta de la producción de la alfalfa al fósforo aplicado en el 1er corte. Como resultado de los análisis realizados, se ha establecido un alto porcentaje de fijación en la medida que se aplicó mayores niveles de fósforo al suelo.

**Cuadro 5.14. Análisis de la disponibilidad del fósforo en el suelo de la pradera asociada**

Nº de Muestras	Fósforo existente en el suelo (ppm)	Expectativa de disponibilidad del P <sub>5</sub> complementado (ppm)	Cantidad de P <sub>5</sub> complementado (ppm)	Relación de 1ppm=8.6 kg de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Cantidad de fósforo (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha)	Cantidad de fertilizante (FMA) (kg/ha)	Tiempo de muestreo (días)	P <sub>5</sub> disponible después de la fertilización (ppm)	Disponibilidad del P <sub>5</sub> complementado (ppm)	Porcentaje fijado del fósforo complementado (%)
1	7.86	7.86	0	8.6	0	0	nd	7.86	-	-
1	7.86	10	2.14	8.6	18	29.5	80	7.92	0.06	-
1	7.86	13	5.14	8.6	61	100.0	80	10.73	2.87	44
1	7.86	17	9.14	8.6	78	129.0	80	11.80	3.94	57
1	7.86	25	17.14	8.6	147	241.4	80	14.79	6.90	60
1	7.86	55	47.14	8.6	405	663.9	80	25.55	17.70	62
1	7.86	62	54.14	8.6	466	763.9	80	26.46	18.60	66
1	7.86	85	77.14	8.6	663	1086.9	80	29.60	21.70	72

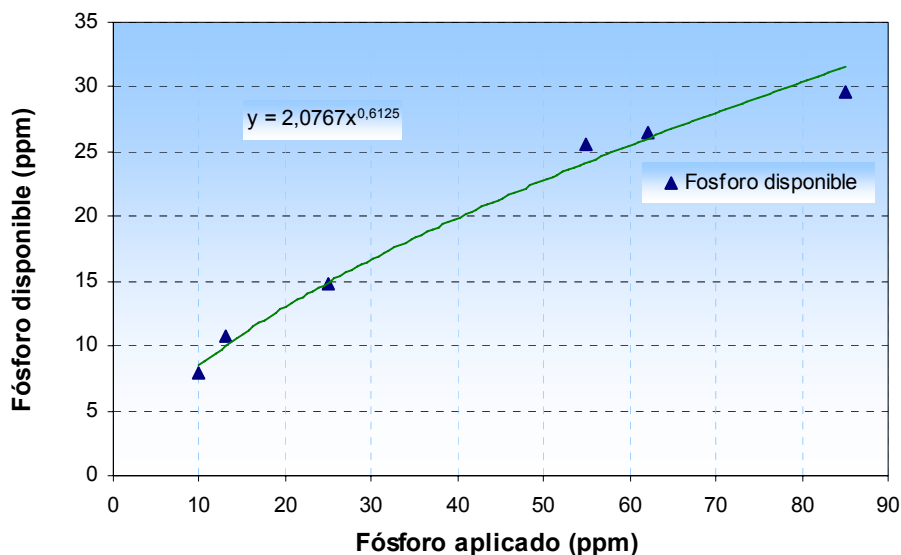
ppm = Partes por millón; nd = No determinado; P<sub>5</sub> = Fósforo

De acuerdo a los resultados del Cuadro 5.14, la fijación del fósforo en el suelo del nivel C3 fue de 60 %, el cual dio lugar a la adición de 6.9 ppm de fósforo disponible; asimismo en el nivel C2 se adicionó 3.9 ppm de fósforo asimilable por el 57 % de fijación registrado, coincidiendo con lo señalado por Quintero y Boschetti (2001), quienes indican que en los suelos FY, se inmovilizan fácilmente entre el 50 y 60 % del fósforo aplicado.

Según Fassbender (1980), el fósforo adicionado a los suelos cálcicos se cristaliza rápidamente como: fosfato monocálcico ((PO<sub>4</sub>H<sub>2</sub>)<sub>2</sub> Ca), dicálcico (CaHPO<sub>4</sub>) y sus formas hidratadas (((PO<sub>4</sub>H<sub>2</sub>)<sub>2</sub> Ca·H<sub>2</sub>O); (CaHPO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O)), los cuales también precipitan en formas más rígidas como los octofosfatos de calcio (Ca<sub>4</sub>H<sub>2</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>OH) y las taranakitas.

Para Rodríguez (1991), el fosfato monovalente (H<sub>2</sub>PO<sub>3</sub><sup>-</sup>) es la forma fácilmente absorbida por las plantas, el cual a medida que aumenta el pH del suelo, se transforma en fosfato divalente (HPO<sub>3</sub><sup>=</sup>), el cual es difícilmente absorbido; en cambio el ión fosfato trivalente (PO<sub>3</sub><sup>=</sup>) no se encuentra en forma disponible para las plantas.

La Figura 5.13, muestra al fósforo disponible en el suelo bajo a una relación potencial ( $Y=2.08x^{0.61}$ ), obtenido después de la aplicación de diferentes niveles al suelo, el cual muestra una mayor fijación a medida que se aplicó mayores niveles de fósforo al suelo.



**Figura 5.13.** Relación de disponibilidad del fósforo asimilable (ppm) en el suelo de la pradera asociada, elaborada en base a los análisis químicos del suelo.

Según el análisis físico-químico del suelo (Cuadro 5.15), la poca disponibilidad del fósforo asimilable en la pradera, puede ser originado por el alto porcentaje de arcilla (34 %), materia orgánica (4.05 %) y los sales del suelo; los cuales según Cepeda (1991), pueden retener al ión fosfato en sus sitios de intercambio de forma más rígida que otros cationes.

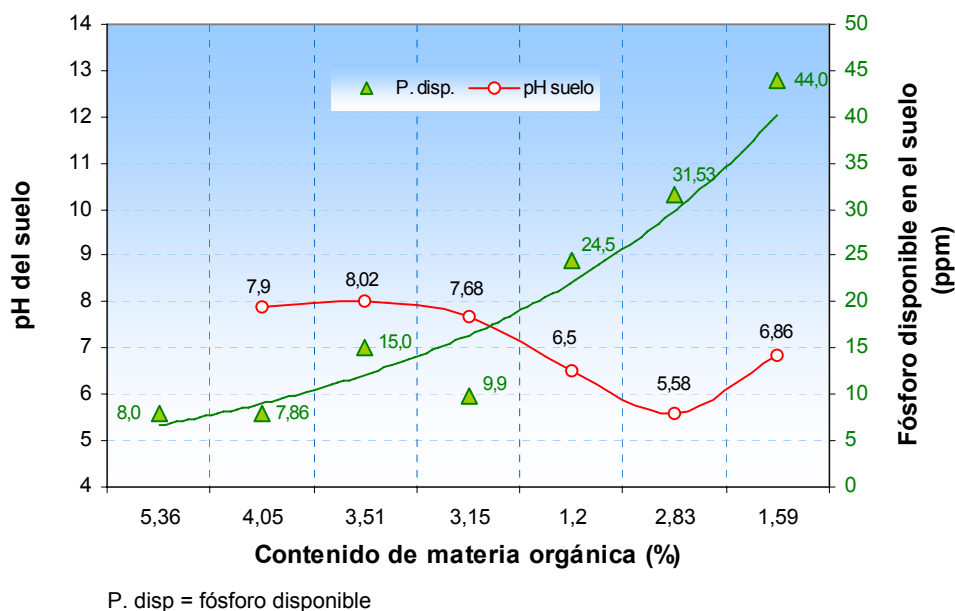
**Cuadro 5.15.** Disponibilidad del fósforo en la pradera de alfalfa asociada con festuca alta

Localidad	Características Químicas						Características Físicas						
	pH	CE mS/cm	MO %	P ppm	Calcio meq/100gs	PSCa %	Dap g/cm <sup>3</sup>	CC %	PMP %	A %	L %	Y %	Textura
Choquenaira	7.96	0.283	4.05	7.86	9.03	59.7	1.25	25.4	13.5	30.0	36.0	34.0	FY

CE = Conductividad eléctrica; MO = Materia orgánica; P = Fósforo; PSCa = Porcentaje de saturación del calcio; Dap = Densidad aparente; CC = Capacidad de campo; PMP = Marchites permanente; A = Arena; L = Limo; Y = Arcilla.

Asumiendo lo señalado por Cepeda (1991), la fijación del fósforo en la pradera puede haber estado relacionado a una absorción química, debido a que un suelo alcalino se caracteriza por un alto contenido de calcio y la combinación del fósforo con este elemento, puede haber formado fosfatos de calcio poco solubles, originando su baja disponibilidad.

En la siguiente Figura (5.14), se representa la disponibilidad del fósforo en el suelo, con relación al pH y la materia orgánica (MO), realizada sobre la base de los análisis físico-químicos de los diferentes tipos de suelos presentadas en el Cuadro 3.4.



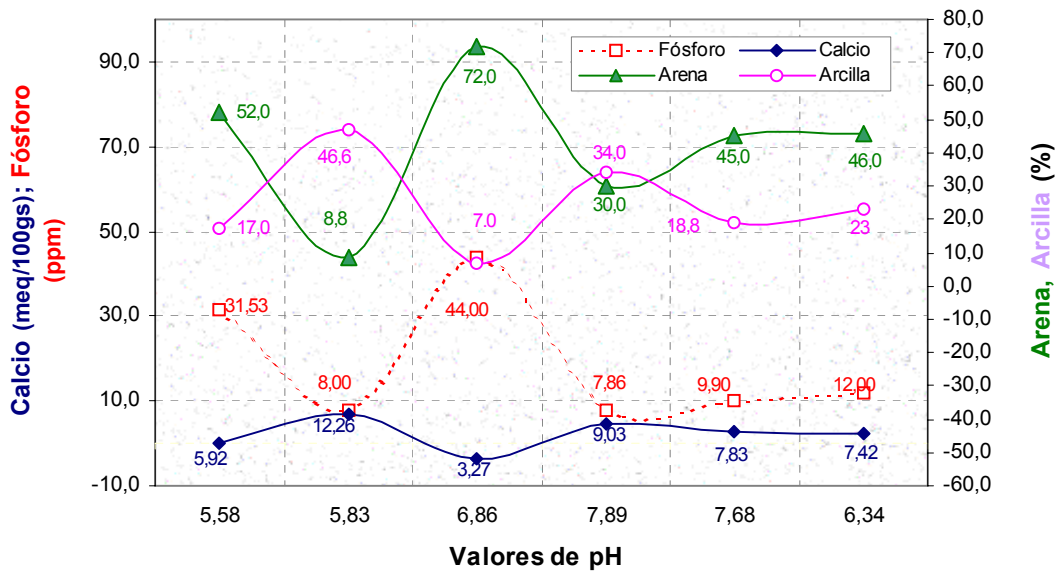
**Figura 5.14.** Disponibilidad del fósforo en el suelo con relación al pH y materia orgánica.

Para Cepeda (1991), el fosfato y otros los aniones son retenidos en los ácidos húmicos y enlaces aminos, de la humificación de la materia orgánica; el cual también puede haber sido el factor orgánico que ha disminuido la disponibilidad del fósforo en el suelo.

La Figura 5.15, estructurada en base al Cuadro 3.4, muestra una baja disponibilidad de fósforo en los suelos arcillosos; en cambio la mayor disponibilidad de fósforo presentado en los suelos arenosos, puede estar favorecido por el bajo contenido de calcio, materia orgánica y sales solubles registrados en estos suelos.

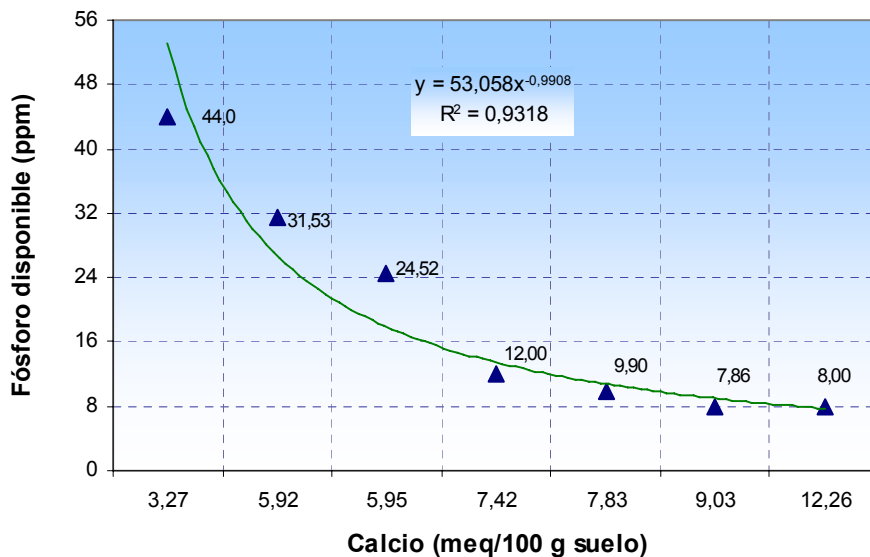
En la misma Figura (5.15), la disponibilidad del fósforo presenta una disposición antagónica al contenido de calcio del suelo. Este comportamiento según Olsen (1977), surge a raíz de la precipitación del fósforo en forma de fosfatos octocálcicos insolubles, al registrarse una mayor concentración de los  $\text{CaCO}_3$  en el suelo.





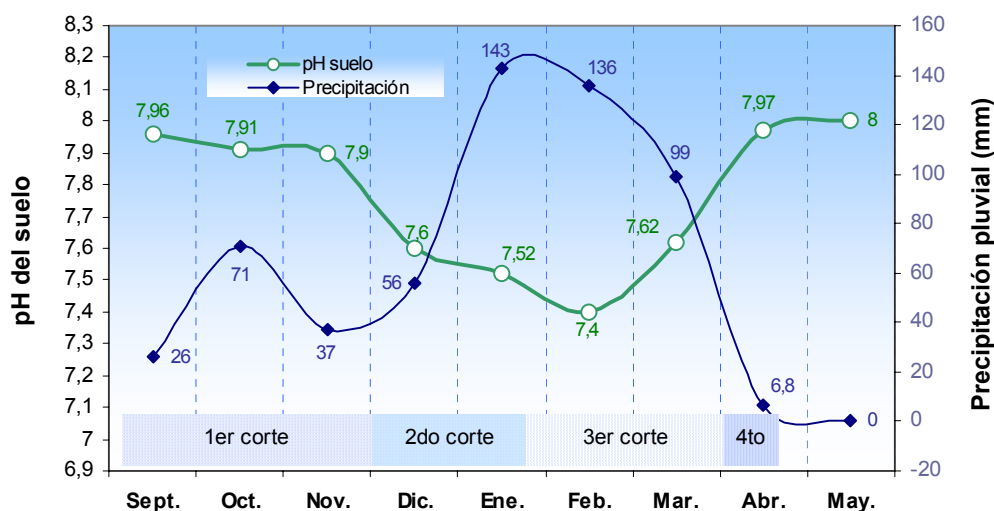
**Figura 5.15.** Disponibilidad del fósforo asimilable en el suelo, con relación al contenido de Calcio (meq/100g suelo), el porcentaje de arena y arcilla.

En la siguiente Figura (5.16), se muestra la disminución de la disponibilidad del fósforo en el suelo, en la medida que se registra un mayor contenido de  $\text{Ca}^{2+}$ ; el cual según Cepeda (1991), se originaría por una mayor retención del fósforo en forma de fosfatos insolubles (fosfatos dicálcicos y tricálcicos).



**Figura 5.16.** Disponibilidad del Fósforo en el suelo (ppm) con relación al contenido de Calcio (meq/100g de suelo).

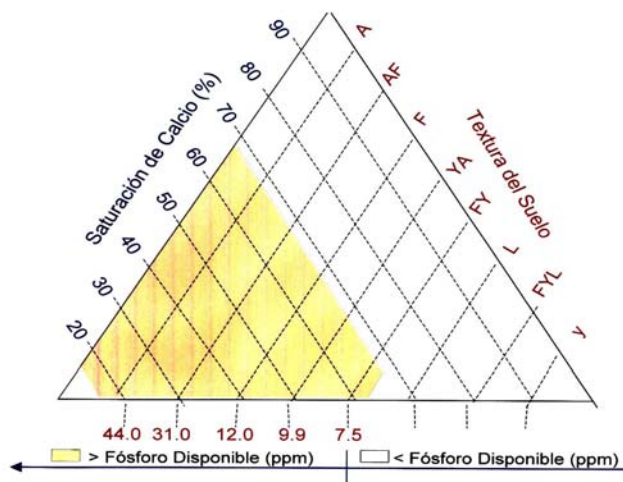
Las diferencias significativas de MS de la alfalfa por el efecto de la fertilización fosfatada logradas durante el 3er corte, registró 6.4 y 19.3 % de superioridad la MS lograda en el nivel C3, con relación a los niveles C2 y C1 respectivamente. Esta diferencia también fue atribuida al descenso del pH del suelo de 7.9 hasta 7.4, debido a las altas precipitaciones pluviales registradas para este corte, como se muestra en la siguiente Figura (5.17).



**Figura 5.17.** Variación del pH del suelo de la pradera de alfalfa, con relación a la precipitación pluvial registrada durante la gestión agrícola 2005-2006.

De acuerdo al resultado de la anterior Figura (5.17), el descenso del pH del suelo puede haber surgido por el lavado del  $\text{Ca}^{2+}$  en forma de bicarbonato de calcio, debido a que la pequeña cantidad del gas carbónico existente en el agua de lluvia, es capaz de disolver y lixiviarlo a la caliza existente en el suelo, como afirman Ginés y Mariscal (2005).

Por tanto las diferencias de materia seca logradas en el 3er corte por la aplicación del fósforo, pueden ser el resultado de una mayor disponibilidad del fósforo asimilable; el cual puede haber sido favorecido por una mayor presencia del  $\text{NH}_4$ , en el complejo de cambio para sustituir principalmente al  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ , como sostiene Fassbender (1980). Asimismo se ha establecido que la disponibilidad del fósforo en el suelo depende del porcentaje de saturación del Calcio ( $\text{PSCa}^{2+}$ ) y la textura del suelo, como se muestra en la siguiente Figura (5,18).



**Figura 5.18.** Disponibilidad del fósforo en función a la textura del suelo y el porcentaje de saturación del Calcio ( $PSCa^{2+}$ ), en los suelos de la región.

Por tanto la disponibilidad del fósforo en el suelo, según el análisis de la Figura 5.16 y 5.18, presentó una relación muy directa, con el contenido de Calcio, Textura del suelo y la Materia Orgánica; en cambio esta disponibilidad, no presentó una relación muy directa con el pH del suelo, como se presentó en la Figura 5.14.

#### 5.4. Análisis estadístico de Tukey de la interacción de los factores de estudio en las variables de respuesta

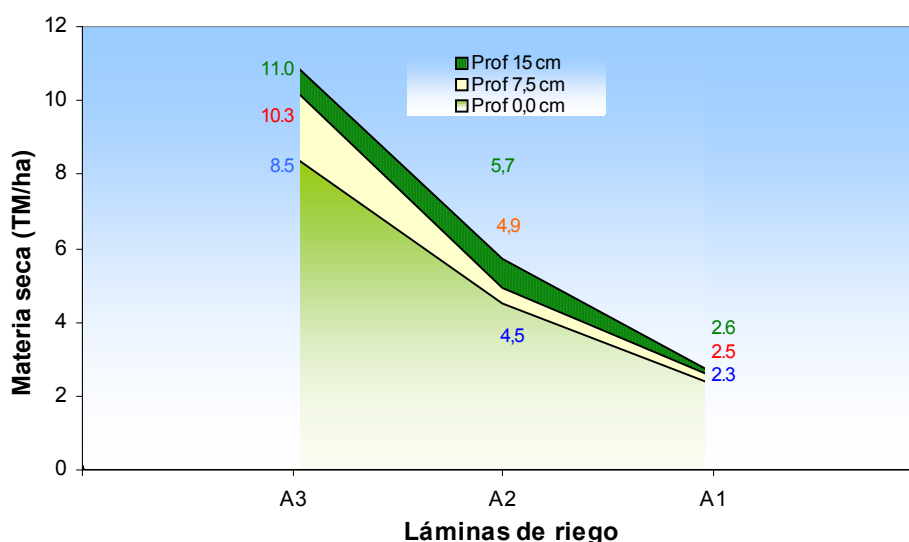
##### 5.4.1. Rendimiento de materia seca de la alfalfa por la interacción del riego por las profundidades

Asumiendo lo señalado por Rodríguez (1991), y Calzada (1979), las interacciones de los factores de estudio, fueron analizados de acuerdo al mayor o menor grado de paralelismo entre las gráficas de interacción de los factores estudiados.

**Cuadro 5.16.** Rendimiento de materia seca de la alfalfa por la interacción de las láminas de riego por las profundidades

Láminas de riego (mm/semana)	Rendimiento de Materia Seca (TM/ha)											
	1er corte			2do Corte			3er Corte			Total		
	B1	B2	B3	B1	B2	B3	B1	B2	B3	B1	B2	B3
Lámina A3 (32)	3.42	3.87	4.00	3.01	3.54	3.74	2.06	2.93	3.25	8.5	10.3	11.0
Lámina A2 (21)	2.22	2.35	2.62	1.25	1.37	1.87	1.06	1.15	1.25	4.5	4.9	5.7
Lámina A1(Testigo)	0.98	1.02	1.03	0.63	0.72	0.73	0.68	0.71	0.82	2.3	2.5	2.6

Los rendimientos de MS, por la interacción del riego por las profundidades (Cuadro 5.16), muestran en las interacciones B2 (7.5 cm) y B3 (15 cm) por las láminas A2 (60 cm) y A3 (90 cm), diferencias significativas en el rendimiento de MS, reflejando una interacción directa entre estos factores, como se muestra en la siguiente Figura (5.19).



**Figura 5.19.** Análisis del rendimiento de materia seca de la alfalfa, por la interacción de las láminas de riego por las profundidades.

En el Cuadro 5.17, se muestra el rendimiento de materia seca por la interacción A3B3 y A3B2 estadísticamente iguales dentro de los cortes, pero con una mayor producción de materia seca en todos los cortes; el cual fue atribuido a una mayor humedad proporcionada por la lámina A3 y aproximada en forma eficiente entre 7.5 y 15 cm de profundidad.

**Cuadro 5.17.** Análisis de Tukey del rendimiento de materia seca de la alfalfa por el efecto de la interacción de las láminas de riego por las profundidades

Tratamientos	Nº de medias	1er Corte		2do Corte		3er Corte		Total MS (TM/ha)
		MS (TM/ha)	Tukey (0.05)	MS (TM/ha)	Tukey (0.05)	MS (TM/ha)	Tukey (0.05)	
Lam A3 x prof B3	9	4.00	A	3.75	A	3.25	A	11.00
Lam A3 x prof B2	9	3.87	A	3.54	A	2.93	A	10.34
Lam A3 x prof b1	9	3.42	B	3.01	B	2.06	B	8.49
Lam A2 x prof B3	9	2.62	C	1.88	C	1.25	C	5.75
Lam A2 x prof B2	9	2.35	C	1.37	D	1.15	CD	4.87
Lam A2 x prof B1	9	2.22	C	1.25	D	1.06	CD	4.53
Lam A1 x prof B3	9	1.03	D	0.73	E	0.82	CD	2.58
Lam A1 x prof B2	9	1.02	D	0.73	E	0.72	D	2.47
Lam A1 x prof b1	9	0.98	D	0.64	E	0.68	D	2.30

Letras iguales del análisis de Tukey representan diferencias estadísticas no significativas entre medias

Las interacciones A2B3 y A2B2, reportaron rendimientos estadísticamente iguales y superiores a la interacción A2B1; esta paridad estadística fue atribuida a las mismas condiciones de humedad aportada al suelo. En cambio las interacciones A1B1, A1B2 y A1B3 no reportaron diferencias significativas en el rendimiento de MS en ninguno de los cortes, debido a una efímera y discontinua humedad suministrada al suelo por las lluvias.

La interacción A3B3, registró el rendimiento más alto de materia seca (11.0 TM/ha), esta amplia superioridad registrada con relación a los demás tratamientos, le constituye como el tratamiento más recomendable para mejorar la producción de las praderas de alfalfa con varios años de producción.

#### 5.4.2. Rendimiento de materia seca de la alfalfa por la interacción de las láminas de riego por los niveles de fósforo

El rendimiento de MS lograda por la interacción del riego por la fertilización fosfatada, durante el 2do presentó diferencias estadísticamente significativas pero con muy pocas diferencias en la producción de MS; en cambio durante el 3er corte se registraron las mayores diferencias de MS, como se muestra en el siguiente Cuadro (5.18).

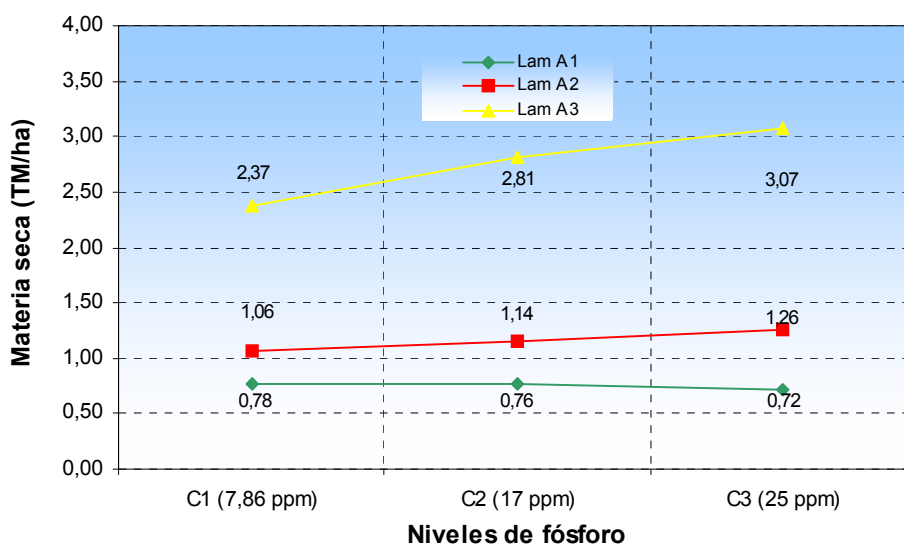
**Cuadro 5.18. Rendimiento de materia seca de la alfalfa por la interacción de las láminas de riego por los niveles de fertilización fosfatada**

Tratamientos	Nº de Medias	Materia seca (TM/ha)	Tukey (0.05)
lam A3 fert C3	9	3.07	A
lam A3 fert C2	9	2.81	AB
lam A3 fert C1	9	2.37	B
lam A2 fert C3	9	1.26	C
lam A2 fert C2	9	1.14	CD
lam A2 fert C1	9	1.06	CD
lam A1 fert C1	9	0.78	CD
lam A1 fert C2	9	0.76	D
lam A1 fert C3	9	0.69	D

Letras iguales representan diferencias estadísticas no significativas entre medias

Los rendimientos de MS por la interacción de las láminas A1 y A2 por los distintos niveles de fertilización presentó diferencias no significativas; en cambio las interacciones A3C3 y A3C2, presentaron una superioridad del 29 % con relación al tratamiento A3C1, el cual fue atribuido a una mayor disponibilidad del fósforo en el suelo.

En la Figura 5.20, el rendimiento de MS por la interacción A3C3, registró una superioridad del 9 y 29 % a los producidos en las interacciones A3C2 y A3C1; el cual se estima que se logró por el 40 y 43 % de incremento del fósforo disponible durante el 3er corte, del 100 % aplicado en los niveles C3 y C2 respectivamente.



**Figura 5.20.** Rendimiento de materia seca de la alfalfa, por la interacción de las láminas de riego por los niveles de fertilización fosfatada durante el tercer corte.

Las diferencias estadísticas significativas de materia seca, registradas por la interacción A3C3 (14.7 ppm de P disponible registrado en el suelo) durante el 3er corte, puede haber estado sujeto a una mayor restitución del fósforo fijado, por la disminución del pH del suelo como se muestra en la Figura 5.17.

Según Blanchet (1973), citado por Muslera (1984), al disminuir la humedad del suelo la difusión del fósforo disminuye y se logran mayores respuestas al fósforo en años secos que en los húmedos; lo cual puede ratificarse al hallar diferencias significativas de MS a una humedad reducida a capacidad de campo durante el 3er corte.

Asimismo Cepeda (1991), señala que el  $P_2O_5$  tiene una menor movilidad que los iones  $NO_3$  y  $Cl^-$  al registrarse una mayor humedad en el suelo; el cual también puede haber aportado a la nula diferencia estadística de materia seca logrado en el 1er y 2do corte por la aplicación del fósforo.

Por su parte para Soliz (2005), los elementos importantes como el fósforo, hierro, boro, manganeso y otros, bajan su disponibilidad al elevarse el pH del suelo; además señala que la alfalfa desarrolla adecuadamente a un pH de 7.5; el mismo que tiende a ratificarse al obtener diferencias significativas en la MS por el efecto del fósforo, durante el 3er corte al registrarse en el suelo un pH de 7.4 (Figura 5.17).

Por otro lado Vivas *et al.*, (1999), señalan que a un pH muy próximo a 7, la disponibilidad del fósforo aumenta a pesar de existir un déficit hídrico; además señalan que en los suelos cálcicos la posible disponibilidad del fósforo, puede lograrse por una mayor mineralización de la materia orgánica, al disminuir el pH hasta valores cercanos al neutro.

#### 5.4.3. Altura de la alfalfa por la interacción del riego por las profundidades

La altura de la alfalfa por la interacción del riego por las profundidades presentada en el Cuadro 5.19, muestra que la interacción A3B3 registró la mayor altura media (47.5 cm) al igual que la interacción A3B2 (45.6 cm), los cuales fueron estadísticamente iguales; en cambio las láminas A2 y A1 (sin riego) en interacción con las tres profundidades dentro de cada lámina, no presentaron diferencias estadísticas significativas en todos los cortes.

**Cuadro 5.19. Altura de la alfalfa por la interacción del riego por las profundidades**

Tratamientos	Nº de medias	1er corte		2do corte		3er corte		Promedio (cm)
		Altura (cm)	Tukey (0.05)	Altura (cm)	Tukey (0.05)	Altura (cm)	Tukey (0.05)	
lam 3 prof 3	9	48.22	A	47.32	A	46.90	A	47.5
lam 3 prof 2	9	44.01	B	47.04	A	45.71	A	45.6
lam 3 prof 1	9	42.08	B	42.80	B	43.55	B	42.8
lam 2 prof 3	9	34.33	C	38.50	C	38.87	C	37.2
lam 2 prof 2	9	33.60	C	36.94	C	37.90	C	36.1
lam 2 prof 1	9	32.03	C	31.82	D	33.59	D	32.5
lam 1 prof 3	9	23.76	D	21.48	E	22.14	E	22.5
lam 1 prof 2	9	22.55	D	20.11	E	22.40	E	21.7
lam 1 prof 1	9	22.53	D	20.50	E	21.33	E	21.5

Letras iguales del análisis de Tukey representan diferencias estadísticas no significativas entre medias

Según Rodríguez (1991), las diferentes condiciones de temperatura, riego y aireación del suelo, pueden haber condicionado fisiológicamente una adecuada o deficiente actividad enzimática del sistema regulador encargado de la elongación de la planta.

La similitud de las alturas de planta, por la interacción del riego por las profundidades 15.0 y 7.5 cm, fueron atribuidas a las mismas condiciones de humedad y aireación del suelo, los cuales según Chilón (1996), originarían el equilibrio del CO<sub>2</sub> del suelo con el del ambiente, donde la formación del H<sub>2</sub>CO<sub>2</sub> por la hidrólisis del CO<sub>2</sub> adquiere vital importancia en la disolución, carbonatación y los procesos acidificantes para la planta.

Por tanto la altura de la alfalfa, está sujeta a una condición apropiada que propicie una mayor absorción de nutrientes a nivel radicular; el cual según Marchsner (1995), está en función a una adecuada humedad del suelo, que posibilite situar una mayor cantidad de nutrientes sobre la superficie de las raíces.

### 5.5. Eficiencia del uso de agua de la alfalfa

El uso de agua de la alfalfa presentada en el Cuadro 5.20, muestra la cantidad de agua utilizada para transformar 1.0 kg de MS; donde el tratamiento A3B3 registró una mayor eficiencia durante el 2do corte, logrando transformar 1.47 kg MS por cada 1.0 m<sup>3</sup> de agua aplicado, representando el uso de 682.4 litros de agua por cada 1.0 kg MS.

**Cuadro 5.20. Materia seca de la alfalfa por el volumen del agua utilizada**

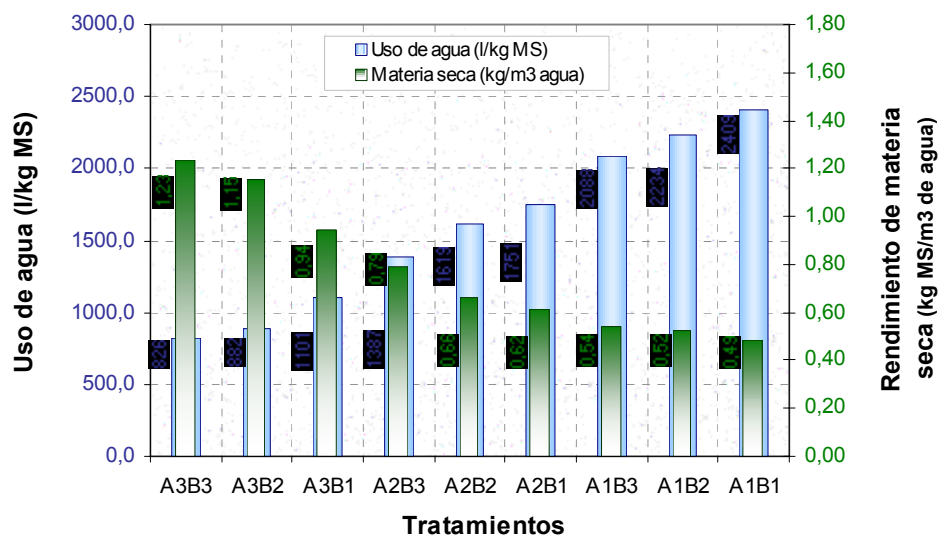
Trat.	Primer Corte			Segundo Corte			Tercer Corte			Promedio
	RMS		Uso de agua (UA)	RMS		Uso de agua (UA)	RMS		Uso de agua (UA)	(UA)
	κγ ΜΣ ηα	κγ ΜΣ μ <sup>3</sup> αγρα	λ αγρα κγ ΜΣ	κγ ΜΣ ηα	κγ ΜΣ μ <sup>3</sup> αγρα	λ αγρα κγ ΜΣ	κγ ΜΣ ηα	κγ ΜΣ μ <sup>3</sup> αγρα	λ αγρα κγ ΜΣ	λ αγρα κγ ΜΣ
A3B3	4.00	1.07	931.0	3.75	1.47	682.4	3.25	1.16	864.9	826.1
A3B2	3.87	1.04	962.3	3.54	1.38	722.9	2.93	1.04	959.4	881.5
A3B1	3.42	0.92	1088.9	3.01	1.18	850.2	2.06	0.73	1364.6	1101.2
A2B3	2.62	0.95	1049.2	1.88	0.94	1066.8	1.25	0.49	2044.8	1386.9
A2B2	2.35	0.85	1169.8	1.37	0.68	1463.9	1.15	0.45	2222.6	1618.8
A2B1	2.22	0.81	1238.3	1.25	0.62	1604.5	1.06	0.41	2411.3	1751.4
A1B3	1.03	0.77	1304.8	0.73	0.53	1902.7	0.82	0.33	3056.1	2087.9
A1B2	1.02	0.76	1317.6	0.73	0.53	1902.7	0.72	0.29	3480.6	2233.6
A1B1	0.98	0.73	1371.4	0.64	0.46	2170.3	0.68	0.27	3685.3	2409.0

RMS = Rendimiento de materia seca; λ αγρα = Litros de agua

Las mayores eficiencias del uso de agua logradas en las interacciones A3B3 y A3B2, pueden ser atribuidas a una eficiente aproximación de una lámina semanal de 32 mm de agua al sistema radicular de la alfalfa, situada entre 7.5 y 15 cm de profundidad.



En la Figura 5.21, se muestra el volumen promedio anual del agua utilizada en los diferentes tratamientos, para la transformación de MS de la alfalfa; donde el tratamiento A3B3 registró 1.23 kg, MS/m<sup>3</sup> de agua, el cual representó una TCA de alrededor de 55 kg, MS/ha día, el mismo que durante el 2do corte logró hasta 66 kg, MS/ha día, reflejando una mayor eficiencia en el uso del agua.



**Figura 5.21.** Volúmenes del agua utilizado en la transformación de materia seca de la alfalfa.

En el presente estudio la mayor eficiencia del uso de agua se logró durante el 2do corte en la lámina A3, el cual también puede haber estado favorecido por el incremento de la temperatura media; en cambio la disminución de la misma para el 3er corte, puede haber sido afectado por factores genéticos de la alfalfa.

Con relación al uso de agua Sánchez (2004), señala que la alfalfa requiere entre 0,15 a 0,2 m<sup>3</sup> agua/m<sup>2</sup> por corte; asimismo Rodríguez y Orona (1991), señalan que en el norte de México la producción de la alfalfa requiere entre 2.4 y 2.7 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> año; de la misma forma Céspedes (1992), señala que la alfalfa requiere en los valles entre 330 y 600 litros de agua para transformar 1.0 kg de MS.

La mayor eficiencia del uso de agua registrada en el tratamiento A3B3 de 1.23 kg MS/m<sup>3</sup> de agua, representa el uso de 826.1 l/kg MS, el cual muestra una relativa relación con los resultados mencionados respecto al uso de agua por los autores citados, debido a las diferencias climáticas entre las zonas de estudio señalados.

### 5.6. Rendimiento de materia seca de la Festuca alta por la aplicación de las diferentes láminas de riego

El rendimiento de materia seca y la altura de planta de la festuca alta, registró una poca diferencia tanto en condiciones de riego como a secano, como se muestra en el Cuadro 5.21; además mostró un lento desarrollo foliar, con un notorio crecimiento diametral del mantillo, que desplaza a la alfalfa y disminuye la permeabilidad del suelo.

**Cuadro 5.21. Producción de materia seca y altura de planta de la festuca alta**

Láminas de riego	Materia seca y altura de planta								
	1er corte			2do corte			Total	Promedio	Promedio
	RMS (kg/ha)	Alpl (cm)	PMS (%)	RMS (kg/ha)	Alpl (cm)	PMS (%)	RMS (kg/ha)	Alpl (cm)	PMS (%)
A3 (32 mm/semana)	556.0	18.2	27.3	660.2	17.9	26.8	1.22	18.05	27.0
A2 (21 mm/semana)	435.2	19.8	26.9	580.0	17.0	26.5	1.01	18.40	26.7
A1 (Testigo)	410.3	16.7	27.0	480.0	18.2	27.8	0.89	17.40	27.4

MS = Materia seca; Alpl = Altura de planta; PMS = Porcentaje de materia seca

La producción total de materia seca por el efecto de la lámina A3, registró 1.22 TM/ha que significó un 17 y 27 % superior a los rendimientos producidos por las láminas A2 y A1 respectivamente, los cuales fueron atribuidos a la poca respuesta de la festuca al riego.

Además la producción de MS por el efecto del fósforo presentó diferencias estadísticas no significativas en las medias muestreadas, lo que puede ratificar lo señalado por Berlijn y Bernardon (1996), que indican que en una pradera asociada, las leguminosas forrajeras son las especies que responden mejor que los pastos a la fertilización fosfatada.

Por tanto la baja producción de materia seca de la festuca alta, no tuvo relación con lo señalado por Hannaway *et al.*, (1999), que indica que el rendimiento de MS de la festuca alta bajo una lámina de 900 mm, puede alcanzar fácilmente hasta 15 TM, MS ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>; el cual fue atribuida a su baja densidad y su bajo vigor mostrado durante su producción.

## 5.7. Análisis económico de la producción de alfalfa asociada con festuca alta bajo riego por aspersión y profundidades de fertilización fosfatada

Los costos de producción de la pradera asociada de alfalfa con festuca alta, bajo riego por aspersión, roturado parcial y fertilización fosfatada, fueron analizados en base al beneficio/costo y la tasa de retorno marginal (TRM), para una producción de 10 años, según la persistencia y producción registrada en las zonas productoras de alfalfa.

### 5.7.1. Costos fijos y costos variables

Los costos fijos de la producción de la pradera, fueron conformados por los costos de establecimiento de la pradera, la adquisición e instalación del sistema de riego (Cuadro A.25); en cambio los costos variables de producción fueron conformados, por los gastos en mano de obra, el roturado parcial, la compra de insumos, los gastos de operación y el mantenimiento del sistema de riego (Cuadro A.26).

**Cuadro 5.22. Estructura de costos**

Factores	Costos Fijos (\$Bs)		Costo Var. anual (\$Bs)	Costos Totales anuales (\$Bs)
	Total CTe	Anual CFae		
Lámina A1 (sin riego)	3193.00	319.30	0.00	319.30
Lámina A2 (21 mm/semana)	12977.40	1427.07	2480.80	3907.87
Lámina A3 (32 mm/semana)	12977.40	1427.07	2593.60	4020.67
Profundidad B1 (0.0 cm)	0.00	0.00	0.00	0.00
Profundidad B2 (7.5 cm)	0.00	0.00	400.00	400.00
Profundidad B3 (15.0 cm)	0.00	0.00	480.00	480.00
Fertilización C1 (0.0 kg/ha FMA)	0.00	0.00	0.00	0.00
Fertilización C2 (129 kg/ha FMA)	0.00	0.00	2253.00	2253.00
Fertilización C3 (241 kg/ha FMA)	0.00	0.00	4157.00	4157.00

CTe = Costo total de establecimiento; CFae = Costo fijo anual por establecimiento.

En el anterior Cuadro (5.22), se presenta la estructura de costos para las láminas de riego por aspersión, las profundidades del roturado parcial espaciado y el fertilizante fosfatado, estructurado para una hectárea de pradera; los mismos que al combinarse de acuerdo a los tratamientos establecidos proporcionan los costos totales anuales requeridos en la producción de la pradera.

### 5.7.2. Precio de campo

El precio de campo de la alfalfa fue determinado, extrayendo los precios de cosecha, transporte y comercialización del precio de mercado de las ciudades de La Paz y El Alto, de acuerdo al siguiente Cuadro (5.23).

**Cuadro 5.23. Estructura del precio de campo de la alfalfa y la festuca alta**

Especie	Costos (\$Bs/kg, MS)		Precio de venta (\$Bs/kg, MS)	
	Cosecha	Transporte y comercialización	Mercado	Campo
Alfalfa (var. Bolivia 2000)	0.08	0.12	1.74	1.54
Festuca alta	0.08	0.12	1.0	0.8

### 5.7.3. Relación de beneficio/costo

El análisis del beneficio/costo del Cuadro 5.24, muestra una mayor factibilidad económica de la producción de la pradera asociada en la lámina A3, al registrar un B/C de 2.5; asimismo los índices de rentabilidad elaborados según Yupanqui (2006), a un valor de actualización del 12 %, con el reemplazo de la motobomba al sexto año de producción, registró un B/C de 2.2 (Cuadro A.33).

**Cuadro 5.24. Análisis de la relación beneficio/costo de la pradera asociada de alfalfa con festuca alta**

Riego	CFa (Bs)	CV (Bs)	CT (Bs)	MSaa (k/ha)	MSaf Kg/ha	IBa (Bs)	IBf (Bs)	IBt (Bs)	BN (Bs)	B/C
A3	1427.07	5023.60	6450.67	9861.0	1159.0	15230.26	927.90	16158.16	9707.49	2.50
A2	1427.07	4910.80	6337.87	5112.9	959.5	7896.85	768.18	8665.02	2327.15	1.37
A1	319.30	2430.00	2749.30	2669.5	845.5	4123.03	676.91	4799.94	2050.64	1.75

CFa = Costos fijos anuales; CV = Costos variables; CT = Costos totales; MSaa = Materia seca ajustado de la alfalfa; MSaf = Materia seca ajustado de la festuca; IBa = Ingreso bruto de la alfalfa; IBf = Ingreso bruto de la festuca; IBt = Ingreso bruto total; BN = Beneficio neto; B/C = Beneficio/costo.

El bajo B/C logrado en la lámina A2, fue atribuido a la menor producción de materia seca obtenida bajo una lámina semanal de 21 mm, el cual a pesar de registrar una mayor producción de materia seca con relación a la lámina A1 (testigo), muestra su infactibilidad económica en la producción de la pradera asociada.

#### 5.7.4. Tasa de retorno marginal

Para determinar la tasa de retorno marginal (TRM), inicialmente se determinó los costos variables de las láminas de riego, profundidades del roturado parcial, niveles de fósforo y el precio de campo de la alfalfa, los cuales fueron presentados en los Cuadros 5.22 y 5.23.

El análisis de dominancia se realizó ordenando de menor a mayor los costos variables de los tratamientos (CV<sub>i</sub>), considerando dominados a los tratamientos que presentaron un alto costo y un menor beneficio, los cuales son excluidos del siguiente Cuadro (5.25), de análisis marginal.

**Cuadro 5.25. Análisis de la tasa de retorno marginal**

Nº Trat.	Tratamiento	BB (\$Bs)	BN (\$Bs)	CV (\$Bs)	*BN (\$Bs)	*CV (\$Bs)	TRM (%)
T1	A1B1C1	4154.92	4154.92	0.00	4154.92	-	-
T10	A2B1C1	6788.32	4307.52	2480.80	152.60	2480.80	6.15
T19	A3B1C1	12771.99	10178.39	2593.60	5870.87	112.80	5204.67
T22	A3B2C1	15200.57	12206.97	2993.60	2028.58	400.00	507.15
T25	A3B3C1	15800.40	12726.80	3073.60	519.83	80.00	649.79

BB = Beneficios brutos; BN = Beneficios netos; CV = Costos variables; BN = Beneficios netos derivados del cambio de tratamiento; \*CV = Costos variables derivados del cambio de tratamiento; TRM = Tasa de retorno marginal.

El análisis marginal del Cuadro 5.25, muestra que en el tratamiento T19 se obtiene 52 \$Bs por cada 1.0 \$Bs invertido con relación al tratamiento T10; de la misma forma el tratamiento T22 tiene un TRM que representa la obtención de 5.0 \$Bs por cada 1.0 \$Bs adicional invertido con relación al T19; asimismo el T25 tiene una TRM que representa la obtención de 6.49 \$Bs por cada 1.0 \$Bs adicional invertido en relación al tratamiento T22.

La mayor tasa de retorno marginal (TRM) obtenido en el tratamiento T25 (A3B3C1), comparado con el TAMIR (100 %) cumple la regla de decisión planteada  $TRM > TAMIR$ , por lo que económicamente se constituye, como el tratamiento más recomendable en la producción de alfalfa.

### 5.7.5. Tasa mínima de retorno aceptable

La tasa mínima de retorno (TAMIR), fue estructurada sobre la base del 30.0 % de la tasa anual de prestamos ofrecidos por las entidades financieras en la región, el cual fue multiplicado por dos debido al riesgo que la actividad agrícola muestra en la región y el 40 % proviene de cultivos alternativos a fin de cubrir el TAMIR = 100 % establecido.

### 5.7.6. Residuos

Los residuos se determinaron extrayendo del beneficio neto (BN), el costo de oportunidad del capital (COCV<sub>i</sub>), dando lugar de esta forma al tratamiento más rentable, el cual fue obtenido en la lámina A3 por la profundidad B3 y sin fertilización (A3B3C1), como se muestra en el siguiente Cuadro (5.26).

**Cuadro 5.26. Costos de oportunidad del capital y residuos**

Nº de Tratamiento	Tratamiento	Beneficio neto BN (\$Bs)	Costos variables CV (\$Bs)	COCV <sub>i</sub> (\$Bs)	Residuos (\$Bs)
T1	A1B1C1	4154.92	0.00	0.00	4154.92
T10	A2B1C1	4307.52	2480.80	2480.80	1826.72
T19	A3B1C1	10178.39	2593.60	2593.60	7584.79
T22	A3B2C1	12206.97	2993.60	2993.60	9213.37
T25	A3B3C1	12726.80	3073.60	3073.60	9653.20

COCV<sub>i</sub> = Costo de oportunidad de los costos variables; TAMIR = 100 %

De acuerdo al análisis de Dominancia y la TRM, se ha establecido que los tratamientos bajo riego por aspersión por las profundidades del roturado parcial y sin fertilización, son los que han presentado una mayor rentabilidad económica, debido al elevado costo del fertilizante utilizado.

Por tanto conforme a los resultados logrados en la presente investigación, la producción de la alfalfa en la región puede ser económicamente factible, al ser producido bajo una lámina de riego semanal ligeramente superior a la ETc, combinado con un roturado parcial espaciado a 15 cm de profundidad y sin fertilización.

## 6. CONCLUSIONES

La producción de una pradera de alfalfa asociada con festuca alta, evaluada en base al rendimiento de materia seca, altura de planta, relación hoja/tallo y la eficiencia del uso de agua en un periodo de 33 semanas, presentó amplias diferencias por el efecto de las láminas de riego, profundidades del roturado parcial y la interacción de estos factores.

El riego con una lámina de 32 mm/semana (17 % > ET) a 30 cm de profundidad, permitió incrementar de 2.81 a 10.4 TM, MS/ha, que representó un incremento de 270 % de MS; en cambio bajo una lámina de 21 mm/semana (21 % < ET), incrementó de 2.81 a 5.46 TM, MS/ha; estableciendo que una humedad que persistió cerca del límite superior de la CC como se registró en la lámina A3, posibilitó una mayor producción de MS a la alfalfa.

Las profundidades mostraron efectos poco relevantes en la producción de la alfalfa, sin embargo en interacción con la lámina A3, produjeron el mayor rendimiento de materia seca (11.0 TM/ha) y la mayor altura de planta (47.5 cm), reflejando que el roturado parcial espaciado a 15 cm de profundidad, combinado con una lámina de riego semanal de 32 mm, mejoró notablemente la producción de la alfalfa.

El fósforo aplicado a diferentes profundidades del suelo, no mostró efectos significativos en la producción de alfalfa, debido a su elevada fijación al suelo por el alto contenido de calcio (9.03 meq/100g suelo) y materia orgánica (4.05 %); en cambio el mayor nivel fósforo (25 ppm) en interacción con la mayor lámina de riego, registró un incremento significativo de MS (29 %) durante el 3er corte, al disminuir el pH del suelo de 7.96 a 7.4.

La mayor eficiencia del uso de agua en la alfalfa, se registró en el tratamiento A3B3 logrando 1.23 kg, MS/m<sup>3</sup> de agua, el mismo que se optimizó durante el verano al registrar 1.47 kg, MS/m<sup>3</sup> de agua (682.4 litros de agua/kg, MS); en cambio en las láminas A2 y A1 se obtuvieron una media de 0.64 y 0.45 kg, MS/m<sup>3</sup> de agua, respectivamente.

El análisis del beneficio/costo (B/C) de la producción de la pradera asociada, registró 2.5, 1.37 y 1.75 en las láminas A3, A2 y A1 respectivamente, mostrando una mayor factibilidad económica en la lámina A3. El análisis marginal registró una mayor tasa de retorno marginal (TRM) en los tratamientos bajo la lámina A3 por la profundidad B3 y sin fertilización (A3B3C1), el mismo que resultó ser el tratamiento más rentable, debido al alto costo del fertilizante utilizado.

El rendimiento de materia seca y la altura planta de la festuca alta, presentó diferencias muy reducidas por el efecto de la aplicación de las diferentes láminas de riego, debido a su bajo vigor y baja densidad mostrada por los varios años de producción; por lo que no tuvo un aporte importante en la producción de la pradera asociada.



## 7. RECOMENDACIONES

Conforme a los resultados logrados en la producción de alfalfa bajo riego por aspersión, se recomienda utilizar un riego semanal de 32 mm en la capa arable del suelo en los dos primeros cortes, para aportar una lámina de agua constante y ligeramente superior a la capacidad de campo y la evapotranspiración, con el propósito de contribuir en forma adicional al lavado de las sales presentes en los suelos de la región.

Debido a la mejora de la producción de alfalfa por la aireación del suelo, se recomienda establecer en surcos, para realizar estudios del efecto del subsolado, en la producción de estas praderas al reducir su densidad después de cumplir varios años de producción.

Se recomienda establecer las praderas de alfalfa en suelos franco arenosos (FA), debido a que estos suelos presentan una mayor disponibilidad de fósforo; su implantación en suelos arcillosos requerirá una adición anual hasta de 5 ppm de fósforo disponible como máximo, siendo innecesarios niveles más altos por su elevado porcentaje de fijación.

Asimismo se recomienda que la fertilización fosfatada, pueda realizarse después de los análisis de disponibilidad del Fósforo, Calcio y MO, ya que un elevado porcentaje de MO (> 4 %) permite que un elevado porcentaje de saturación del Calcio ( $PSCa^{2+} > 55 \%$ ), origine una muy poca disponibilidad del fósforo asimilable en el suelo.

La red de conducción del sistema de riego por aspersión debe tener una instalación fija, para garantizar su vida útil evitando deterioros por traslado, exposición a la intemperie y el pisoteo; también se recomienda utilizar aspersores con caudales superiores a  $1.3 \text{ m}^3/\text{h}$  para reducir los tiempos de riego y tener una mayor eficacia por el uso del riego.

No se recomienda realizar prácticas de fertilización y riego en praderas demasiado viejas de festuca alta, debido a la poca respuesta mostrada en el estudio; por ello convendría establecer y producir estas praderas bajo riego y realizar su renovación al disminuir su densidad según los criterios técnicos, que se establecen después de su evaluación.

Debido a los altos costos de energía y mano de obra en el uso del sistema de riego por aspersión, que alcanzaron el 31 y 29 % de los costos totales anuales respectivamente, se recomienda realizar estudios de automatización y el uso de energía alternativa, para la operación de estos sistemas, tomando en cuenta que los mismos deben cumplir eficientemente las exigencias técnicas que los diseños del sistema requieran.

## 8. BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

- Alzérreca, H. y Cardozo, A. 1991. Valor de los alimentos para la ganadería andina. Serie técnica: IBTA/SR-CRSP/001. La Paz, Bolivia. pp 11-68.
- Aranda, B. 1999. Manual de técnicas de aplicación en riego parcelario. Ed. CID. La Paz, Bolivia. pp 9.
- Atahuachi, V. 2001. Riego y fertilización fosforada en once cultivares de alfalfa en dos zonas del altiplano del departamento de La Paz. Tesis de grado, Facultad de Agronomía, UMSA. La Paz, Bolivia. pp 55-83.
- Barrientos, E. 2002. XIV Reunión de ABOPA (Asociación Boliviana de Producción Animal): Cereales Menores en Asociación con Leguminosas para Forraje, Bajo Condiciones del Altiplano Central de Oruro. ABOPA, CIF-UMSS, Cochabamba, Bolivia. (en línea). Consultado el 5 de agosto de 2005. Disponible en: <http://www.forrajes.umss/XIV.reunion.abopa/forrajes55.html>.
- Baver, L.D. 1980. Física de suelos. 4ta, ed. Ed. HISPANOAMÉRICA. México. pp 243-417.
- Berlijn, J.D. y Benardon, A.E. 1996. Manuales para la educación agropecuaria: Cultivos forrajeros. 2da, ed. Ed. Trillas. México. pp 10-59.
- Bottega, A. y Hoogendam, P. 2004. Obras de riego para zonas montañosas. 1ra, ed. MACA-PRONAR. Cochabamba, Bolivia. pp 1-20.
- Calderón, O. 1995. Estudio del comportamiento de la Avena forrajera (*Avena sativa*) a secano y bajo riego en tres épocas de siembra en la región de Kallutaca. Tesis de grado, Facultad de agronomía, UMSA. La Paz, Bolivia. pp 21-36.
- Calle, G. 2004. Efecto del subsolado en las propiedades físico-químicas del suelo y en el rendimiento de la soya (*Glicine max* (L.) Merrill), Colonia Okinawa, Santa Cruz. Tesis de grado, Facultad de Agronomía, UMSA. La Paz, Bolivia. 148 p.
- Callisaya, I. 1994. Caracterización de las tierras de la Estación Experimental de Choquenaira según su uso y aptitud de riego. Tesis de grado, Facultad de agronomía, UMSA. La Paz, Bolivia. 148 p.
- Calzada, J. 1970. Métodos Estadísticos para la Investigación. 3ra, ed. Ed. The Iowa State University Press. Lima, Perú. pp 295-476.
- Cepeda, J.M. 1991. Química de suelos. 2da, ed. Ed. Trillas. México. 153 p.
- Céspedes, A. 1992. Consumo de agua y producción de materia seca de la alfalfa en el valle de Cochabamba. Tesis de grado, Facultad de Ciencias Agrícolas, UMSS. Cochabamba, Bolivia. 100 p.
- Chilón, E. 1997. Manual de fertilidad y nutrición de plantas. C.I.D.A.T. La Paz, Bolivia. pp 82-130.
- Chilón, E. 1996. Manual de Edafología: Prácticas de campo y laboratorio. 1ra, ed. Ed. CIDAT, UMSA. La Paz, Bolivia. 290 p.

- Chipana, R. 1996. Principios de riego y drenaje. IRTEC. La Paz, Bolivia. pp 33-178.
- Condori, J. 1998. Producción y manejo de la alfalfa (*Medicago sativa* L.), bajo los sistemas tradicionales y técnico en dos comunidades de la provincia Ingavi-La Paz. Tesis de grado, Facultad de Agronomía, UMSA. La Paz, Bolivia. pp 1-20.
- Cooper, M. y Morris, D.W. 1986. Agricultura Forrajera. 5ta, ed. Ed. El Ateneo. Buenos Aires, Argentina. pp 37-101.
- Delgadillo, J. y Mendieta, H. 1996. Alfalfa (*Medicago sativa* L.). En: Meneses, R; Waainjenberg, H. y Piérola, L. Las Leguminosas en la Agricultura Boliviana: Revisión de información. Proyecto Rhizobiología Bolivia (CIAT-CIF-PNLG-CIFP-WAU). Cochabamba, Bolivia. pp 299-315.
- Evans, E.A. 2005. Análisis Marginal: Un Procedimiento Económico para Seleccionar Tecnologías o Practicas alternativas. Pub, IFAS. University of Florida Gainesville. FE, 573. pp 1-6.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación). 2006. Riego y Drenaje: Evapotranspiración del cultivo. No, 56. Roma, Italia. 276 p.
- Fassbender, H.W. 1980. Química de suelos. Ed. IICA. San José, Costa Rica. pp 156-301.
- Fuentes, J.L. 1998. Técnicas de riego. 3ra, ed. Ed. Mundi-Prensa. Madrid, España. 471 p.
- García, J. 1992. Agrometeorología: Energía y agua en la agricultura. Ed. MARTELL. UNIVERSIDAD AUTÓNOMA LA MOLINA. Lima, Perú. 174 p.
- Garman, W.H. 1996. Manual de Fertilizantes. 2da, ed. Ed. Limusa. Balderas, México. pp 47-105.
- Ginés, I. y Mariscal, I. 2005. Actuación de los fertilizantes sobre el pH del suelo. (en línea). Consultado el 12 de Diciembre del 2005. Disponible en:  
[http://www.consultoradelvalle.cl/biblioteca/fertilizantes\\_sobre\\_el\\_ph\\_del\\_suelo.pdf](http://www.consultoradelvalle.cl/biblioteca/fertilizantes_sobre_el_ph_del_suelo.pdf)
- Gómez, P. 1979. Riegos a presión, aspersión y goteo. 2da, ed. Ed. AEDOS. Barcelona, España. pp 9-71.
- Gurovich, L.A. 1985. Fundamentos de diseño de sistemas de riego. 1ra, ed. Ed. CIDIA-IICA. Costa Rica. pp 7-393.
- Hannaway, D; Fransen, S; Cropper, J; Teel, M; Chaney, M; Griggs, T; Halse, R; Harst, J; Cheeke, P; Hansen, D; Klinger, R; y Lane, W. 1999. Festuca alta (*Festuca arundinaceaea* Scherb.). (en línea). Consultado el 5 Agosto de 2005. Disponible en:  
<http://www.forages.oregonstate.edu/organizations/seed/osc/tech-pubs/tf-span.pdf>.
- Haquim, D. 2000. Perspectivas de la economía campesina en la globalización. PNDU, CF-11. La Paz, Bolivia. pp 87-121.
- Hopfen, H.J. 1982. Aperos de labranza para regiones áridas y tropicales. Servicio de Ingeniería rural. Dirección de servicios agrícolas. FAO, Roma. pp 136.
- IICA (Instituto Interamericano de cooperación para la Agricultura). 1996. Evaluación y seguimiento del impacto ambiental en proyectos de inversión para el desarrollo agrícola y rural. San José, Costa Rica. pp 204-207.

- Journet. 1993. Valor energético de la alfalfa. (en línea). Consultado el 12 de Febrero de 2006. Disponible en: <http://www.infoagro.com/herbaceos/forrajes/alfalfa7.asp>
- Lira, R.H. 1994. Fisiología Vegetal. 1ra, ed. Ed. Trillas. UAAAN, México. 207 p.
- Luque, J.A. 1981. Hidrología Agrícola Aplicada. 1ra, ed. Ed. Hemisferio Sur. Buenos Aires, Argentina. pp 3-88.
- MAGDR-PDLA (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural - Programa de Desarrollo Lechero del Altiplano). 2001. Producción de Forrajes. Tomo I, 2da, ed. La Paz, Bolivia. pp 15-52.
- Marchsner, H. 1995. Mineral Nutrition of Higher Plants. 2da, ed. U.S. Edition published by ACADEMI PRESS INC. San Diego, CA. pp 131-265.
- Mariscal, A. 1994. Riegos y Drenajes e Hidráulica Agrícola. Universidad Autónoma Tomás Frías. Potosí, Bolivia. pp 5-289.
- MDSP (Ministerio de Desarrollo Sostenible y Planificación), 1997. Delimitación de cuencas hidrográficas de Bolivia. PFIDCH, FAO/TCP-BOL/6611. 12 p.
- Mendoza, G. 2004. Evaluación de dos métodos de riego: Aspersión e Inundación en el cultivo de alfalfa en la provincia los Andes-La Paz. Tesis de grado, Facultad de Agronomía, UMSA. La Paz, Bolivia. pp 21-122.
- Meneses, R; Campos, H. y Humerez, M. 2002. XIV Reunión de ABOPA (Asociación Boliviana de Producción Animal): Cultivares y agronomía en ensayos regionales con once cultivares de alfalfa en el altiplano Central y Norte. ABOPA, CIF-UMSS. Cochabamba, Bolivia. (en línea). Consultado el 5 de Agosto de 2005. Disponible en: <http://www.forrajes.umss/XIV.reunion.abopa/contenido.html>.
- Meneses, R; Waaijenberg, H. y Piérola, L. 1996. Las leguminosas en la agricultura Boliviana: Revisión de Información. Proyecto Rhizobiología Bolivia (CIAT-CIF-PNLG-CIFP-WAU), COSUDE. Cochabamba, Bolivia. pp 5-314.
- Miranda, L. 1993. Análisis: El Aparente dilema de la tecnología de la producción. Jiltañani, Fac. de Agronomía UMSA. N° 1 año 1. La Paz, Bolivia. pp 32-33.
- Miranda, R. 2002. Edafología: Propiedades físicas y químicas de los suelos. UMSA, La Paz, Bolivia. pp 27-33.
- Montes de Oca, I. 1997. Geografía y Recursos Naturales de Bolivia: Climatología. EDOBOL. La Paz, Bolivia. pp 125-143.
- Montgomery, D.C. 1991. Diseño y Análisis de Experimentos. 3ra, ed. Ed. Iberoamericana. México. pp 424-428.
- Morales, J.P. 1987. Suelos y agroquímica. 1ra, ed. Ed. PUEBLO Y EDUCACIÓN. La Habana, Cuba. pp 97-128.
- Moya, J.A. 1998. Riego localizado y fertirrigación. 2da, ed. Ed. Mundi-Prensa. Madrid, España. pp 23-64.

- Muslera, E. 1984. Praderas y Forrajes: Producción y aprovechamiento. Ed. Mundi-Prensa. Madrid, España. pp 90-676.
- Narro, E. 1994. Física de suelos, con enfoque agrícola. 1ra, ed. Ed. Trillas. México. 174 p.
- Orsag, V. 1992. Altiplano: Agricultura, riego y medio ambiente. 1er Seminario Nacional sobre recursos hídricos y medio ambiente. Pub. USAID. Cochabamba, Bolivia. pp. 4-6.
- Palacios, E. 1999. La Eficiencia en el uso del agua en los distritos de riego. Colegio de Postgrado, Montecillo, México. 10 p. (en línea). Consultado el 10 de Diciembre de 2006. Disponible en: [http://www.unesco.org.uy/phi/libros/uso\\_eficiente/palacios.html](http://www.unesco.org.uy/phi/libros/uso_eficiente/palacios.html)
- Perrin, R; Winkelmann, D; Moscardi, E. y Anderson, J. 1979. Manual metodológico de evaluación económica. "Formulación de recomendaciones a partir de datos agronómicos". (CIMMYT) Centro de investigación y mejoramiento del Maíz y Trigo. México. pp 5-50.
- Pozo, M. del. 1983. La Alfalfa: Cultivo y aprovechamiento. 2da, ed. Ed. Mundi-Prensa. Madrid, España. pp 65-100.
- PRONAR (Programa Nacional del Riego), 2002. Evaluación de los sistemas de riego: Causas y efectos, investigación aplicada. Cochabamba, Bolivia. pp 32-96.
- PRONAR (Programa Nacional del Riego), 2005. Proyectos de riego La Paz. Bolivia. pp 40-57
- Quintero, C. y Boschetti, N. 2001. Manejo del Fósforo en Pasturas. Facultad de Ciencias Agropecuarias UNER. (en línea). Consultado 10 de agosto de 2005. Disponible en: <http://www.fertilizar.org.ar/articulos/ManejodelFosforoenPasturas.htm>
- Ramos, D.G. 1994. Efecto del subsolado en las propiedades físicas del suelo y el sistema radicular de dos cultivos (cebada y quinua) en el altiplano central. Tesis de grado, Facultad de Agronomía, UMSA. La Paz, Bolivia. 130 p.
- Reyes, M. 2001. Análisis económico de experimentos agrícolas con presupuestos parciales. BI, 1-2001. Ed. CIAGROS. Fac. de Agronomía, Universidad San Carlos. Guatemala. 31 p.
- Rodríguez, A. y Orona. I. 1991. Los sistemas de riego por aspersión en el Cultivo de alfalfa en el norte de México (Comarca Lagunera). C.N.I.D. Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera. Durango, México. 8 p.
- Rodríguez, J.M. 1991. Métodos de investigación pecuaria. 1ra, ed. Ed. Trillas. México. pp 134-150
- Rodríguez, M. 1991. Fisiología Vegetal. Colección Ciencia Técnica 309. Ed. Los Amigos del Libro. Cochabamba, Bolivia. pp 85-361.
- Rojas, F. 2000. Botánica Sistemática. UMSA. La Paz, Bolivia. pp 38-43.
- Sánchez, C. 2004. Cultivo y producción de Pastos, Forrajes y Alfalfa. Ed. RIPALME. Lima, Perú. 135 p.
- Sánchez, C. 2005. Sistemas de riego: Uso, Manejo e Instalación. Ed. RIPALME, E.I.R.L. Lima, Perú. 134 p.

- SAR (Servicio Agronómico la Rural), 2004. Análisis de suelo y agua. España. 19 p. Disponible en: <http://www.larural.es/servagro/framini.htm>
- Sheng, T. 1992. Manual de campo para la ordenación de cuencas hidrográficas: Estudio y planificación de cuencas hidrográficas. FAO, conservación 13/6. pp 9-130.
- Soliz, J.B. 2005. Manual de producción y utilización de forrajes. CEDE-AG, Estación Experimental de Choquenaira, UMSA. Viacha, Bolivia. pp 62-63.
- Suppo, F. 1982. Fertilizantes: Nutrición Vegetal. 1ra, ed. Ed. AGT. México. pp 69-76.
- Tarjuelo, J.M. 2005. El riego por aspersión y su tecnología. 3ra, ed. Ed. Mundi-Prensa. Madrid, España. pp 55-315.
- Tarjuelo, J.M. 1995. El riego por aspersión y su tecnología. 1ra, ed. Ed. Mundi-Prensa. Madrid, España. pp 39-65.
- Tarqui, M. 2005. Efecto del riego por aspersión en el establecimiento y producción de tres variedades de alfalfa en dos métodos de siembra en la estación experimental de Belén. Tesis de grado, Facultad de Agronomía, UMSA. La Paz, Bolivia. 70 p.
- Torres, E. 1995. Agro-meteorología. 1ra, ed. Ed. Trillas. México. 145 p.
- Vásquez, A. 2000. Manejo de Cuencas Altoandinas: Elementos básicos sobre cuencas hidrográficas. Ed. ESAA "Charles Sutton", UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA. Lima, Perú. Tomo I, pp 53-63.
- Vásquez, A. 2000. Manejo de Cuencas Altoandinas: Manejo de cultivos en laderas altoandinas. Ed. ESAA "Charles Sutton", UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA. Lima, Perú. Tomo II, pp 380-389.
- Villalpando, J.F. y Ruiz, J.A. 1993. Observaciones agrometeorológicas y su uso en la agricultura. 1ra, ed. Ed. Limusa, México. pp 87-131.
- Villarroel, F. 1990. I Seminario Nacional sobre la Fertilidad de Suelos en Bolivia. CIAT-IBTA. Proyecto Fertilizantes GCPF/BOL/18/NET. Santa Cruz, Bolivia. pp 332-336.
- Villela, S.M. y Mattos, A. 1975. Hidrología Aplicada. MAKROW books do Brasil, Ed. McGraw-Hill Ltda. San Paulo, Brasil. pp 81-85.
- Vivas, H; Guayta, S. y Quaino, O. 1999. Fertilización fosfatada y encalado sobre la producción de alfalfa en el departamento Las Colonias. Información técnica N° 230. INTA-EEA. (en línea). Consultada el 10 de agosto de 2006. Disponible en: <http://www.rafaela.inta.gov.ar/publicaciones/informac230.htm>
- Waaijenberg, H. 2000. Proyecto de Rizobiología Bolivia: experiencias con rhizobios y leguminosas en la zona andina de Bolivia 1994-2000. (CIAT-CIF-PNLG-CIFP-UAW/DHV-SEFO). Cochabamba, Bolivia. pp 23-24.
- Withers, B. y Stanley, V. 1979. El riego: diseño y práctica. 2da, ed. Ed. Diana. México. pp 55-153.
- Yupanqui, C. 2006. Formulación de proyectos en Excel (Inversiones, costos e ingresos). 2da, Ed. La Paz, Bolivia. pp 1-29.

## **9. ANEXOS**



**Cuadro A.1. Distribución de la densidad radicular de la alfalfa en la capa arable del suelo**

Profundidad (cm)	Número de raíces	Porcentaje de raíces (%)
0-8	85	45
8-22	77	41
22-31	18	9
31- 50	6	3
50-60	-	
Total	186	100

El porcentaje de raíces en las diferentes profundidades fue determinado, sobre el número de raíces secundarias contabilizados, obteniendo en la capa arable (30 cm profundidad)

**Cuadro A.2. Distribución de la densidad radicular de la festuca alta en la capa arable del suelo**

Profundidad (cm)	Número de raíces	Prof. De Hardpan (cm)	Porcentaje de raíces (%)
0-18	ND	30.0	60
> 18	ND		--

Donde: ND, no determinado cuantitativamente.

**Cuadro A.3. Determinación de los coeficientes hídricos del suelo CC y PMP por el método gravimétrico**

NE	Estrato (cm)	PSH (g)	PSS (g)	VT (cm <sup>3</sup> )	Dap (cm <sup>3</sup> )	Pa (g)	HCC (%)	HPMP (%)
1	0-20	172.7	139.31	114.4	1.22	33.39	24.0	12.0
2	20-40	184.8	144.4	114.4	1.26	40.4	28.0	14.0
3	40-60	185.9	149.7	114.4	1.31	36.2	24.2	12.1
Media					1.25		25.4	12.69

NE = Estrato

**Cuadro A.4. Determinación de los coeficientes hídricos del suelo (CC y PMP) por la fórmula de Peele y Briggs (Fuentes, 1998)**

Coeficiente hídrico	Arcilla (Y) (%)			Limo (L) (%)			Arena (A) (%)			Factor	Coeficiente hídrico (%)
	F	Y	F*Y	F	L	F*L	F	A	F*A		
CC	0,48	34	16,32	0,162	36	5,832	0,023	30	0,69	2,62	25,5
PMP	0,302	34	10,27	0,102	36	3,672	0,015	30	0,441	0,00	14,4

NE = número de estrato; P = profundidad; MSH = masa de suelo húmedo; MSS = masa de suelo seco; VT = volumen total; Dap = densidad aparente; CC = humedad a capacidad de campo; PMP = humedad a punto de marchites permanente.

**Cuadro A.5. Cálculo de la velocidad de infiltración del agua en el suelo (VIB)**

Nº	Tiempo Inst. (min)	Tiempo Acum. (min)	Lámina Inst. (cm)	Lámina Acum.. (cm)	X	Y	X*Y	X <sup>2</sup>	Zin (cm)	Inf (cm/h)
1	0	0	0.0	0					0	0
2	1	1	1.0	1	0	0	0	0	0.9794	28.9189
3	2	3	0.6	1.6	0.4771	0.2041	0.0974	0.2276	1.3776	20.3372
4	5	8	1.1	2.7	0.9031	0.4314	0.3896	0.8156	2.1624	12.7697
5	5	13	0.6	3.3	1.1139	0.5185	0.5776	1.2409	2.1624	12.7697
6	10	23	1.0	4.3	1.3617	0.6335	0.8626	1.8543	3.0414	8.9803
7	10	33	1.0	5.3	1.5185	0.7243	1.0998	2.3059	3.0414	8.9803
8	10	43	0.8	6.1	1.6335	0.7853	1.2828	2.6682	3.0414	8.9803
9	10	53	0.7	6.8	1.7243	0.8325	1.4355	2.9731	3.0414	8.9803
10	10	63	0.6	7.4	1.7993	0.8692	1.5640	3.2376	3.0414	8.9803
11	15	78	0.9	8.3	1.8921	0.9191	1.7390	3.5800	3.7131	7.3089
12	15	93	0.8	9.1	1.9685	0.9590	1.8879	3.8749	3.7131	7.3089
13	15	108	0.7	9.8	2.0334	0.9912	2.0156	4.1348	3.7131	7.3089
14	15	123	0.7	10.5	2.0899	1.0212	2.1342	4.3677	3.7131	7.3089
15	30	153	1.2	11.7	2.1847	1.0682	2.3337	4.7729	5.2224	5.1400
16	30	183	1.1	12.8	2.2625	1.1072	2.5050	5.1187	5.2224	5.1400
17	30	213	1.0	13.8	2.3284	1.1399	2.6541	5.4214	5.2224	5.1400
18	60	273	1.2	14	2.4362	1.1461	2.7922	5.9349	7.3453	3.6147
19	60	333	1.2	15.2	2.5224	1.1818	2.9811	6.3627	7.3453	3.6147
Sum		333		15.2	30.250	14.533	28.352	58.891		

Cálculo de los valores de la ecuación  $Zin=KT^a$

Cálculo de B

$$B = ((n \cdot S \cdot X \cdot Y - S \cdot X \cdot S \cdot Y) / (n \cdot S \cdot X^2 - (S \cdot X)^2))$$

$$B = 0,492107004$$

Por tanto:

$$a = 0,492107004$$

Cálculo de A; Donde: S = sumatoria

$$A = (S \cdot Y \cdot S \cdot X^2 - S \cdot X \cdot S \cdot X \cdot Y) / (N \cdot S \cdot X^2 - (S \cdot X)^2)$$

$$A = -0,02078854$$

Por tanto  $K = \text{invlog}(A)$

$$k = 0,97942605$$

La ecuación de infiltración acumulada será:

$$Zin = KT^a \quad Zin = 0,993995362T^{0,484992382}$$

Para la velocidad de Infiltración se tendrá

$$a' = -0,507893$$

$$I = 0,481982421 \cdot T^{-0,5150076} \quad (\text{cm/min})$$

$$I = 28,91894528 \cdot T^{-0,5150076} \quad (\text{cm/h})$$

$$I = 289,1894528 \cdot T^{-0,5150076} \quad (\text{mm/h})$$

Cálculo de la velocidad de infiltración básica (VIB), se asume que esta alcanza cuando VI cambia en un 10% o sea

$VIB = 0,1$  I luego se tiene:  $T(VIB) = (-10(a-1))$  donde el tiempo está en horas

$$T(VIB) = (-10(0,484992382-1)) = 5,08 \quad \text{horas} \quad (305 \quad \text{Minutos})$$

$$VIB = a \cdot k \cdot (-10(a-1))^a \quad VIB = 0,482080178 \cdot (309,0045708)^{-0,51500762} \quad (\text{cm/min})$$

Cálculo de la velocidad de infiltración básica (VIB)

$$VIB = 0,027 \quad \text{cm/min}$$

$$VIB = 1,617 \quad \text{cm/h}$$

$$VIB = 16,2 \quad \text{mm/h}$$

**Cuadro A.6. Diseño agronómico del sistema de riego por aspersión de la lámina A3**

Descripción	Valores	Unidades	Obs.
<b>Características del cultivo</b>			
Ciclo de producción	8	meses	240 días
Prof. radicular de mayor actividad	30	cm	Capa arable
Altura media de planta	60	cm	
Fracción de agotamiento	0.6	f	
<b>Características Edafológicas</b>			
Textura		FY	
HCC	25.4	%	
HPMP	14.4	%	
Dap	1.247	g/cm <sup>3</sup>	
VIB	16.2	mm/h	
<b>Características Climáticas</b>			
Velocidad media del viento	1.2	m/s	
ET	3.82	mm/día	Valor medio
PP	550	mm	Valor medio
Temperatura media	8.62	°C	
Conductividad Eléctrica del agua	3.29	dS/cm	análisis de Lab
<b>Características del sistema de riego Lámina A3</b>			
Aspersor RAIN BIRD 30H			
Eficiencia de aplicación (Ea)	90	%	Evaluación
Uniformidad de distribución (UD)	81	%	
Área de la boquilla "a"	1.6619E-05	m <sup>2</sup>	
Área de la boquilla "b"	4.1548E-06	m <sup>2</sup>	
<b>Características del sistema de riego Lámina A2</b>			
Aspersor DAN 4455			
Eficiencia de aplicación (Ea)	79	%	
Uniformidad de distribución (UD)	74	%	
Área de la boquilla "a"	6.1575E-06	m <sup>2</sup>	
Área de la boquilla "b"	5.9829E-06	m <sup>2</sup>	

Nº	Parámetros de Cálculo		Ecuaciones	Valores Calculados	
		Símbolo			Unidades
1	Lámina Neta	Zn	$Zn=(CC-PMP)*Dap*f*Pra$	24.75	mm
2	Relación del lavado	RL	$RLn=CEa/(5CEe-CEa)$	0.13	
2	Lámina Bruta	Zb	$Zb=Zn/((1-RLn)*CU)$	31.9	mm
3	Frecuencia de riego	F	$F=Zn/ETc$	7	Días
4	Lámina neta corregida	Znc	$Znc=ETc*F$	27	mm
5	Lámina bruta corregida	Zbc	$Zbc=Znc/((1-RLn)*CU)$	34	mm
6	El Aspersor	Hs		18	mca
	Diámetro de boquilla "a"	Øa		4.6	mm
	Diámetro de boquilla "b"	Øb		2.3	mm
	Espaciamento			12x24	m
	Espacio entre aspersores	Es		12.2	m
	Espacio entre laterales	EI		24 (21*)	m
7	Caudal del aspersor	Qs	$qs=Cd*A(2gHs)^{0.5}$	0.0003642	m <sup>3</sup> /s
8	Radio de alcance	r	$r=1,35\sqrt{(d*Hs)}$	12	m
9	Tasa de aplicación	Ip	$Ip=qs/(Es*EI)$		
			$Ip=qs/Ams (*)$	16.06	mm/h
	Velocidad de infiltración	VIB	$(Ip<VIB)$	16.2	mm/h
10	Tiempo de riego	Tr	$Tr=Zb/Ip$	2.1	h
	Long. de la línea principal	LLP		365	m
	Long de los Laterales	LLPL		210	m
11	Número de posiciones	NP	$NP=LLPL/EI$	10	Lat
	Número de posiciones día	NPd	$NPd=NP/F$	2	Laterales
11	Jornada de trabajo	JT	$JT=NPd*Tr$	4.2	h
12	Caudal del proyecto	Qp	$Qp=A*Zb/F*JT$	11.56	m <sup>3</sup> /h

\*= EL (12 % de solapamiento) para mejorar UD del agua durante el riego de la pradera

**Cuadro A.7. Diseño hidráulico del sistema de riego por aspersión de la Lámina A3**

	Parámetro Calculado	Simb.	Ecuación	Valor	Unid.
14	Núm mín de Aspersores en función	NMAF	$NMAF=Qs/q_s$	8	As
	Longitud de la línea lateral	LLL	LLL	45	m
15	Núm mín de aspersores en la línea L	NALL	$NALL=LLL/Es$	4	As
16	Caudal del sistema corregido	Qsc	$Qsc=NALL*qs$	5.24	m <sup>3</sup> /h
17	Num. Min. de Laterales en función	NMLF	$NMLF=NMAF/NALL$	2	Lat
18	Num. de Pos. En la línea principal	NPLP	$NPLP=LLP/EL$	10	Lat
19	Num. de días para completar el riego	Ndr	$Ndr=(NPLL/Npd)/NMLF$	2.5	Días
20	Diseño de la línea lateral	LL	$LL=Es*2+NALL*Es$	68.0	m
21	Factor de Christiansen	F	$F=1/(m+1)+1/(2n)+\sqrt{(m-1)/(6n^2)}$	0.46	
	Número de salidas	n		4	
	Exp. Velocidad (F.Darcy)	m		2	
22	Caudal de la línea lateral	Qll	$Qll=qs*n$ 5.24	0.00146	m <sup>3</sup> /h
23	Pérdida de carga admisible	$\Delta H$	$\Delta H=0,2*Hs$	3.4	m
	Diámetro de tubería 1½ "				
	Cálculo de hf	hf	$hf=0.0014*Qll^{1.75}/D^{4.75}$	0.085	1.5"
	Cálculo de hf'	hf'	$hf'=hf*F*L$	2.627	m
	Condición de hf'		$hf'<\Delta H$	2.2<3.4	m
	Altura de asta	AA		0.6	m
24	Presión de la entrada del lateral				
	Presión máxima	PMEL	$PMEL=Hs+1/4 hf+AA$	19.77	m
	Presión mínima	PmEL	$PmEL=Hs-1/4 hf+AA$	17.14	m
	Diferencia porcentual	dp		13,3	%
25	Diseño de línea principal	DLP			
	Caudal lateral A	Qla		5,24	m <sup>3</sup> /h
	Caudal lateral B*	Qlb		3,2	m <sup>3</sup> /h
	Caudal de la línea principal	Qlp		8,46	m <sup>3</sup> /h
26	Pérdida de carga admisible	$\Delta HLP$	$\Delta HLP=0,3*HS$	5.1	m
	Pendiente terreno	p		0.6	%
	Longitud total de la línea principal	LTLP		375	m
	Pendiente de la línea principal	pLL	$pLL=p*LTLP$	2.25	m
	Det. Pérdida carga admisible en LP	$\Delta H'LP$	$\Delta H'LP=\Delta HLP-pLL$	2.85	m
	Determinación de F	F		1	
	Diámetro de tubería	D 3"		0,076	m
		hf	$hf=0.0014*Qlp^{1.75}/D^{4.75}$	0.00731	m/m
	Determinación de hf'	hf''	$hf''=hf*F*L$	2.741	m
	Condición		$hf''<\Delta H'LP$		m
27	Presión crítico de la línea lateral	HscLL	$HscLL=PMEL+hf''+pLL$	24.8	m

Nº	Parámetro	Simb.	Ecuación	Valor	Unidad
1	Altura de succión	Hsc		1	m
2	Perdida por accesorios	Pac		4.95	m
3	Altura manométrica Total	Hman	$Hman=Hsc+Pac$	29.71	m
4	Rendimiento bomba	Rto		62	%
5	Potencia de la bomba	HP	$HP=Qlp(l/s)*Hman/75*Rndto$	2.4*	CV

\* = Potencia de bomba insuficiente, siendo el mínimo recomendable 4.5 HP

**Cuadro A.8. Diseño agronómico de la lámina A2**

Nº	Parámetros de Diseño		Ecuaciones	Valores	Unidades
1	Lámina neta	Zn	$Zn=(CC-PMP) Dap*f*Pra$	24.75	mm
2	Lámina bruta	Zb	$Zb=Zn/((1-RL)*CU)$	33	mm
3	Frecuencia de riego	F	$F=Zn/ETc$	7	días
4	Lámina neta corregida	Znc	$Znc=F*ETc$	27	mm
5	Lámina bruta corregida	Zbc	$Zbc=Znc/((1-RL)*CU)$	36	mm
6	Elección del aspersor	4455			
	Presión de servicio	Hs		18.5	mca
	Diámetro de boquilla	a		2.8	mm
	Diámetro de boquilla	b		2.76	mm
	Espaciamiento			12*24	m
	Coefficiente de descarga	Cd		0.96	
	Espacio entre aspersores	Es		12	m
	Espacio entre laterales	EL		24 (21*)	m
7	Caudal del aspersor	qs	$qs=Cd*A (2gHs)^{0.5}$	0.00022	m <sup>3</sup> /s
				0.8	m <sup>3</sup> /h
8	Radio de alcance	r	$r=1,35\sqrt{(d*Hs)}$	9.716	m
9	Tasa de aplicación	lp	$lp=qs/(Es*EL)$		
			$lp=qs/(Es*EL)*3600$	10.0	mm/h
	Relación lp-VIB		$lp<VIB$		
10	Tiempo de riego	Ti	$Ti=Zb/lp$	3	h
11	Jornada de trabajo	JT			
	Longitud de la línea principal	LLP		375	m
	Longitud de la línea para laterales	LLPL		210	m
12	Número de posiciones	NP	$NP=LLPL/EL$	10	Laterales
	Número de posiciones día	NPd	$NPd=NP/F$	2.0	posiciones
	Jornada de trabajo	JT	$JT=NPd*Ti$	6	h
13	Caudal del proyecto de Investigación	Qs'	$Qs'=A*Zb/F*JT$	0.95	m <sup>3</sup> /h
	Área del proyecto de Investigación	A'		1600	m <sup>2</sup>
	Área del proyecto	A		10000	m <sup>2</sup>
	Caudal del proyecto	Qs	$Qs=A*Zb/F*JT$	8,57	m <sup>3</sup> /h

**Cuadro A.9. Diseño hidráulico de la lámina A2**

Nº	Parámetros	Símb.	Ecuación	Valores	Unidades
1	Num. mínimo Aspersores en función	NMAF	$NAF=Qs/qs$	8	aspersor
2	Num. Aspersor en la línea Lateral	NALL	$NALL=LLL/Es$	4	Aspersor
	Longitud de la línea lateral	LLL		45	M
3	Caudal del sistema corregido	Qsc	$Qsc=NALL*qs$	3.20	m <sup>3</sup> /h
4	Num. mínimo de laterales en función	NMLF	$NMLF=NAF/NALL$	2	Laterales
5	Num. de posiciones en línea Principal	NPLP	$NPLP=LLPL/EL$	10	Laterales
6	Num. días para completar el riego	Ndr	$Ndr=NPLL/Npd$	4	días
7	Caudal de sistema corregido	Qsc		3.20	m <sup>3</sup> /h
8	Diseño de la línea Lateral	LL	$LL=Es*1,5+4*11$	66	m
9	Factor de Christiansen	F	$F=1/(m+1)+1/(2n)+\sqrt{(m-1)/(6n^2)}$	0.46	
	Número de salidas	N		4	
	Exp. Velocidad (F.Darcy)	m		2	
10	Caudal de la línea lateral	Qll	$Qll=qs*n (3.20)$	0.0009	m <sup>3</sup> /s
11	Pérdida de carga admisible	ΔH	$ΔH=0,2*Hs$	3.6	m
	Diámetro de tubería 1½ "				
	Cálculo de hf	hf	$hf=0,0014*Qll^{1.75}/D^{4.75}$	0.036	
	Cálculo de hf'	hf'	$hf'=hf*F*L$	1.082	m
	Condición de hf'		$hf'<ΔH$	1.108<3.6	m
	Altura de asta	AA		0.8	m
12	Presión de entrada en el lateral	PEL			
	Presión máxima	PMEL	$PMEL=Hs+\frac{3}{4} hf'+AA$	20.11	m
	Presión mínima	PmEL	$PmEL=Hs-\frac{1}{4} hf'+AA$	19.03	M
	Diferencia porcentual	dp		5.4	%

**Cuadro A.10. Características físico-químicas del agua de riego**

pH	CE dS/m	Na <sup>+</sup> mg/l	K <sup>+</sup> mg/l	Ca <sup>2+</sup> mg/l	Mg <sup>2+</sup> mg/l	Cl mg/l	S mg/l	C mg/l	Bicar- bonatos mg/l	Sólidos totales mg/l	Sólidos en suspensión mg/l	Sólidos disueltos mg/l	Boro mg/l
7.53	3.29	35.8	8.94	18.7	5.32	11.42	68.35	0.00	87.86	236.2	1.2	235.0	0.27

Cl = Cloruros; S = Sulfatos; C = Carbonatos

**Cuadro A.11. Determinación del pH y temperatura del agua de riego en campo**

Parámetro	pH obtenido durante la medición										Media
	7.9	8.1	7.7	8.1	7.9	7.6	7.8	8.2	7.6	7.7	
pH	7.9	8.1	7.7	8.1	7.9	7.6	7.8	8.2	7.6	7.7	7.86
T° agua	11.5	13.7	13.5	11.8	14.3	14.1	13.3	14.3	11.2	13.6	13.13

T° = Temperatura del agua en °C

**Cuadro A.12. pH de la solución suelo-agua de riego en campo, mediante el *Waterprof HI 98127***

Solución agua-suelo	Valores de pH obtenidos durante la medición										Media
	8.1	8.1	7.9	7.8	8.2	8.0	7.9	8.1	8.0	7.8	
1:1	8.1	8.1	7.9	7.8	8.2	8.0	7.9	8.1	8.0	7.8	7.99
1:2	8.0	8.2	7.9	8.3	8.0	8.1	8.2	7.8	7.7	8.2	8.04

Temperatura del agua: 13.5° C, prueba realizada en el mes de noviembre.

La relación fue en base a volumen, tomando 500 cm<sup>3</sup> de agua el cual fue adicionado a 500 cm<sup>3</sup> de suelo (1:1); también se tomó 250 cm<sup>3</sup> de agua el cual se adicionó a 500 cm<sup>3</sup> de suelo seco para la relación 1:2

**Cuadro A.13. Evaluación de la aplicación del agua de riego en la lámina A3**

Nº Puntos	Vol Recolectado cm <sup>3</sup> /H	Vol Ordenado	Lámina Aplicada mm/h	Lm 25% Li cm <sup>3</sup> /h	Lm 25%Li mm/h	Ci-M cm <sup>3</sup> /h
1	40,0	57,0	17,17	43,0	13,0	8,8
2	39,0	57,0	17,17	41,0	12,3	8,8
3	37,0	56,0	16,87	41,0	12,3	7,8
4	38,0	56,0	16,87	40,0	12,0	7,8
5	40,0	56,0	16,87	40,0	12,0	7,8
6	45,0	56,0	16,87	39,0	11,7	7,8
7	47,0	55,0	16,57	39,0	11,7	6,8
8	49,0	55,0	16,57	38,0	11,4	6,8
9	48,5	55,0	16,57	37,0	11,1	6,8
10	46,0	54,0	16,27	35,0	10,5	5,8
11	49,0	52,0	15,66			3,8
12	51,0	52,0	15,66			3,8
13	52,0	52,0	15,66			3,8
14	51,0	51,0	15,36			2,8
15	51,0	51,0	15,36			2,8
16	56,0	51,0	15,36			2,8
17	57,0	50,0	15,06			1,8
18	55,0	50,0	15,06			1,8
19	52,0	49,0	14,76			0,8
20	57,0	49,0	14,76			0,8
21	54,0	49,0	14,76			0,8
22	55,0	48,5	14,61			0,3
23	56,0	48,0	14,46			0,2
24	50,0	48,0	14,46			0,2
25	56,0	48,0	14,46			0,2
26	55,0	47,0	14,16			1,2
27	52,0	46,0	13,86			2,2
28	50,0	45,0	13,55			3,2
29	49,0	45,0	13,55			3,2
30	56,0	45,0	13,55			3,2
31	48,0	43,0	12,95			5,2
32	45,0	41,0	12,35			7,2
33	41,0	41,0	12,35			7,2
34	48,0	40,0	12,05			8,2
35	48,0	40,0	12,05			8,2
36	43,0	39,0	11,75			9,2
37	39,0	39,0	11,75			9,2
38	35,0	38,0	11,45			10,2
39	41,0	37,0	11,14			11,2
40	45,0	35,0	10,54			13,2
	1926,5	48,2	14,51	39,3	11,8	203,9

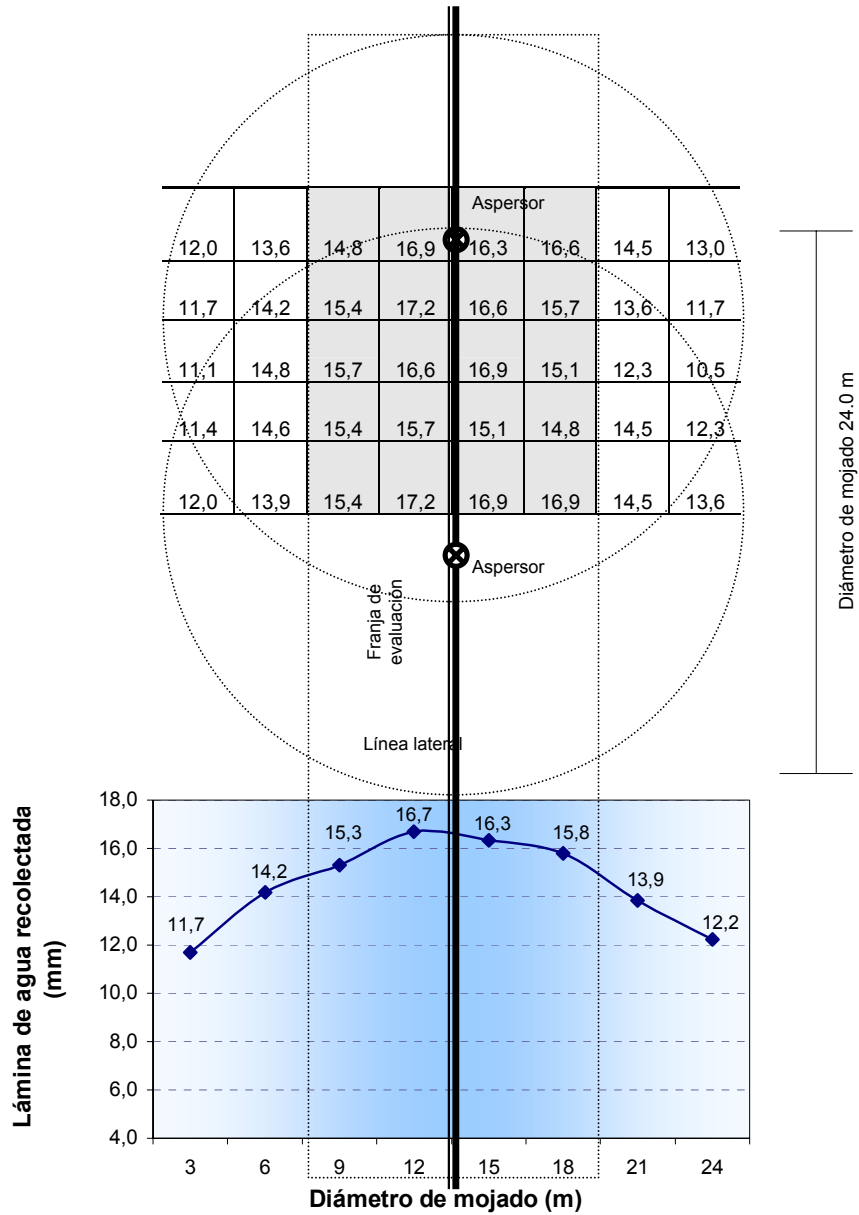
**Cuadro A.14. Parámetros de evaluación de la lámina A3 (32 mm/semana) y A2 (21 mm/semana)**

Parámetros De Evaluación	Símbolo	Valor	Unidades
Tasa de aplicación	lp	16	mm/h
Eficiencia de aplicación	Ea	90	%
Coefficiente de uniformidad	CU	89	%
Uniformidad de distribución	UD	81	%

Parámetros De Evaluación De La Lámina A2		
Área del recolector	33.2	cm <sup>2</sup>
Marco de riego (rectangular)	12 x 24	m
Tasa de aplicación	10	mm/h
Solapamiento entre aspersores	55	%
Lámina media colectada	7.86	mm/h
Lámina media de 25 % de LI	5.80	mm/h
Volumen media colectada	26.1	cm <sup>3</sup>
Volumen del 25 % de LI	19.2	cm <sup>3</sup>
Eficiencia de aplicación (Ea)	79	%
Coefficiente de uniformidad (CU)	86	%
Uniformidad de distribución (UD)	74	%

LI = láminas inferiores

**Esquema de evaluación de la aplicación del agua, para la lámina A3 (32 mm/semana)**



Representación pluviométrica de la evaluación del sistema de riego lámina A3 (32 mm semana), donde: LMCi, lámina media colectada mayor a la infiltración (15.6 mm/h); LMCii, lámina media colectada inferior a la infiltración del suelo (16.2 mm/h).

Descripción	
Marco de riego	Rectangular
Número de aspersores	4
Área del marco de riego	12.25x24 (m <sup>2</sup> )
Tiempo de riego	1 h
Separación entre colectores	2.5 x 3 m
Número de colectores	40
Área del colector	33.2 cm <sup>2</sup>
Área representa por el colector	7.5 m <sup>2</sup>
Fecha y hora de evaluación	9:30/3/11/05
Velocidad y dirección del viento	1.11 m/s; Sur



**Cuadro A.15. Cálculo de la cantidad de fósforo complementado al suelo**

Parámetros	Símbolo	Valores	Unidades
Prof. Suelo	ps	0.30	m <sup>2</sup>
Densidad aparente	Dap	1.25	g/cm <sup>3</sup>
Textura	-	-	FY
Área de referencia	A	10000.00	m <sup>2</sup>
Fósforo disponible	P	7.86	ppm
Peso de la Capa Arable	PCA	3750000.00	kg/ha

Determinación de la cantidad de fósforo en la capa arable

$$FS = \left[ \frac{PCA * PDisp}{1kgS} \right] / 10^6$$

FS = 29.47 kg/ha

Peso molecular del fósforo

Elemento	Peso atómico	Valencia	Peso molecular	% de participación
P	31	2	62	43.7
O	16	5	80	56.3
Σ			142	100

Donde:

62 kg P ⊗ 142 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>

Por relación se tiene:

$$XkgP_2O_5 = \frac{29.47 kgP * 142 kgP_2O_5}{62 kgP} = 67.51 kg P_2O_5$$

Por relación se tiene: 29.47 kg P = 67.51 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> = 7.86 ppm P

$$XkgP_2O_5 = \frac{1 ppmP * 67.51 kgP_2O_5}{7.86 ppm} = 8.6 kg P_2O_5$$

Por tanto 1 ppm = 8.6 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>

**Cuadro A.16. Cálculo de la cantidad de fertilizante (FMA) utilizado en la investigación**

Restando 67.51 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> que proporciona 7.86 ppm P (existente en el suelo)

Cantidad de Fosfato Mono Amónico (FMA) 12-61-00

Nivel fertil.	Ppm	kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	% riqueza	kg FMA/ha
B3	25.00	147.25	61	241.39
B2	17.00	78.52	61	128.73
B1	7.86	0.00	-	0.00

Cantidad de fertilizante utilizando en el trabajo de investigación

Nivel del fertilizante	ppm	kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /UE	kg FMA/AE
B3	25.00	4.77	0.290	7.82
B2	17.00	2.54	0.154	4.17
B1	7.86	0.00	0.000	0.00
Total				12.0

AE = Área de estudio; UE = Unidad experimental

**Cuadro A.17. Datos climáticos correspondientes al periodo de producción de la pradera asociada**

Sem	Fecha	Temp Amb	Temp Max	Temp Min	Temp Hum	Punto Rocío	Veloc. viento	Dir viento	M.V. viento	lndice M.V.	Presión Bar	Prec. (mm)	Int. Prec.	Rad. Solar	Rad/sol media	Energía Solar	M.R. solar	ET	Hum. suelo	Temp. suelo	hum. hoja	Tasa
Recept	(oC)	(oC)	(oC)	(oC)	(%)	(oC)	(Km/d)cuadr.	Dir	(Km/d)	cuadr. W/m2	(mb)	(mm)	mmh	W/m2	W/m2	W/m2	W/m2	mmh	(cb)	(oC)	(%)	
1	01-08-09-06	7,8	16,7	-2,4	41,5		NW					0										
2	09-15-09-06	8,1	17	0,5	44,5							13,74										
3	16-22-09-05	9,3	18	0,2	40		N					12,72						26,6				
4	23-29-09-05	10,93	18,7	0,1	48,77	-1,83	9,04	N	40,2	N	9,66	0	0	22622	327,9	14,10	1202	22,2	200	15,83	15	92,2
5	30-06-10-05	8,88	18,9	-0,7	66,09	1,69	10,10	NW	53,1	WSW	8,24	14,8	15,4	94628	281,63	12,11	1390	32,1	200	15,14	15	94,7
6	07-13-10-05	7,27	16,4	-0,3	73,08	2,04	7,39	NE	53,1	SW	6,88	34,2	15	76883	228,82	9,87	1471	23,2	27	12,94	15	94,4
7	14-20-10-05	8,61	16,6	-1,1	68,10	2,3	8,47	NE	49,9	E	8,13	640,84	58,4	76047	226,33	9,73	1568	26,4	31	13,34	15	94,6
8	21-27-10-05	9,89	18,4	-2,2	51,82	-1,21	8,29	NNW	59,5	NW	8,91	641,19	7	108179	321,96	13,85	1401	37,2	200	10,82	0	95,9
9	28-03-11-05	10,07	20,9	-3,6	42,36	-6,47	7,34	SW	62,8	W	8,74	642,14	0	103582	339,08	14,56	1310	42,8	5	13,46	15	96,6
10	04-10-11-05	8,88	19,2	-1,4	66,77	2,09	9,22	W	49,9	N	8,30	642,02	8,8	78605	233,94	10,03	1561	27,5	31	12,48	15	96,1
11	11-17-11-05	8,67	15,9	4,8	70,12	2,82	4,62	N	27,4	SE	8,19	641,38	12	8265	317,88	14,22	1382	28,6	32	12,45	15	96,5
12	18-24-11-05	7,51	11,9	3,5	82,53	4,63	7,82	E	29	ENE	7,40	640,2	4,2	8547	189,93	8,17	1095	29,2	7	12,30	7	96,6
13	25-01-12-05	10,43	19,4	2,2	65,17	3,11	6,82	E	38,6	ESE	9,77	639,6	3,6	89065	309,3	13,30	1698	28,7	44	15,94	13	97,5
14	02-08-12-06	10,39	19,1	1,5	63,48	2,93	7,18	NE	51,5	ENE	9,76	639,77	10	86724	258,11	11,10	1496	28,9	32	14,36	15	96,1
15	09-15-12-06	10,21	19,5	1,3	65,12	3,11	8,05	SE	59,5	E	9,57	641,14	0,8	94187	280,32	12,06	1531	32,2	20	14,20	0	96,3
16	16-22-12-06	10,80	19,9	0,5	61,53	2,54	8,32	E	51,5	ENE	10,02	641,76	6,6	92683	275,84	11,86	1475	33	23	14,20	15	97,0
17	23-29-12-06	9,25	20,9	1,7	72,17	3,83	7,30	SW	46,7	SSE	8,84	641,41	29	67037	199,51	8,58	1531	22,7	28	13,80	15	94,4
18	30-05-01-06	8,53	16,4	3,4	78,04	4,72	7,66	SE	53,1	SSE	8,35	640,21	26,6	65882	196,08	8,43	1450	20,3	12	14,45	3	93,5
19	06-12-01-06	9,63	14,3	2,1	66,51	2,70	7,55	SE	43,5	S	9,03	640,6	6,8	95605	284,54	12,24	1450	31,4	72	14,35	15	95,7
20	13-19-01-06	8,16	16,1	2,7	81,54	4,99	6,51	SE	37	N	8,02	641,2	40,8	58908	175,32	7,54	1586	16,9	8	13,25	13	93,0
21	20-26-01-06	8,09	15,1	3,8	82,01	5,08	6,61	N	35,4	SW	7,96	641,17	41,4	60100	178,87	7,69	1760	17,4	8	12,93	10	93,4
22	27-02-02-06	9,62	16,6	4,5	77,47	5,63	7,29	E	37	ENE	9,38	643,05	25,4	88342	262,92	11,31	1568	26,4	15	14,65	15	94,0
23	03-09-02-06	9,18	18,8	2,8	78,67	5,36	5,20	E	43,5	NW	8,96	641,65	68,8	69332	206,35	8,84	1491	19,8	8	14,28	15	93,2
24	10-16-02-06	8,85	17,5	2	72,35	3,63	6,11	NE	49,9	NNW	8,48	642,34	52,2	91678	272,85	11,73	1473	26,3	13	13,87	14	95,5
25	17-23-02-06	9,48	19,4	2,2	73,54	4,54	6,26	ESE	46,7	SW	9,11	642,21	3,4	92912	276,52	11,89	1459	27,4	67	14,91	15	97,6
26	24-02-03-06	9,38	18,9	1,8	74,49	4,66	5,08	NE	53,1	NNE	9,04	641,58	11,2	79495	253,98	10,92	1459	23,5	91	14,38	15	96,7
27	03-09-03-06	9,848	20,2	1,3	73,48	4,704	4,56	SW-SE	38,6	NW	18,9	642,98	16,4	101227	245,61	10,563	1420	25,4	102	14,15	15	95,4
28	10-16-03-06	9,595	18,9	2,3	72,11	4,214	4,82	NW	41,8	NW	9,155	641,93	10,2	92362	274,72	11,815	1419	27,6	200	14,63	15	97,1
29	17-23-03-06	9,07	17,9	2,9	77,60	5,30	4,03	NE	35	WSW	8,81	641,62	48,4	68970	265,26	8,83	1394	20,3	56	13,70	15	94,6
30	24-30-03-06	8,34	17,7	3,3	81,83	5,19	4,01	NNW	32,2	N	8,19	639,78	20	33922	146,84	6,31	1034	11,8	11	12,82	15	98,0
		<b>9,159</b>	<b>20,9</b>	<b>-3,6</b>	<b>67,09</b>	<b>3,05</b>	<b>6,88</b>		<b>62,8</b>	<b>9,10</b>	<b>641,39</b>	<b>548,1</b>	<b>73,4</b>	<b>74288</b>	<b>252,98</b>	<b>10,80</b>	<b>1447</b>	<b>736</b>	<b>57,15</b>	<b>13,84</b>	<b>12,78</b>	<b>95,4</b>
		P	M	m	P	P	P	M	M	P	P	S	M	P	P	P	P	S	P	P	P	P

Fuente: EM CH (2005-2006)  
P = Promedio; M = Máxima; m = Mínima; S = Sumatoria.

**Cuadro A.18. Relación de la tensión de humedad y lámina de agua del suelo**

Estrato	PSH	PSS	VB	Dap	Tensión	CC	PMP	Pa	Hg	Hv	L	HS
(cm)	(g)	(g)	(cm <sup>3</sup> )	(g/cm <sup>3</sup> )	(cb)	(%)	(%)	(g)	(%)	(%)	(cm)	
0 - 30	142.7	107.2	88.6	1.210	9	25.4	13.47	35.5	33.1	40.1	12.0	SS
0 - 30	140.1	106.2	84.2	1.261	9	25.4	13.47	33.9	31.9	40.3	12.1	SS
0 - 30	135.5	102.0	81.1	1.258	9	25.4	13.47	33.5	32.8	41.3	12.4	SS
0 - 30	155.0	116.3	92.4	1.259	9	25.4	13.47	38.7	33.3	41.9	12.6	SS
0 - 30	144.1	113.7	92.4	1.231	36	25.4	13.47	30.4	26.7	32.9	9.9	SS
0 - 30	131.8	104.3	84.2	1.239	36	25.4	13.47	27.5	26.4	32.7	9.8	CC
0 - 30	178.0	142.0	114.4	1.241	43	25.4	13.47	36.0	25.4	31.5	9.4	CC
0 - 30	176.5	143.9	114.4	1.258	69	25.4	13.47	32.6	22.7	28.5	8.5	CC
0 - 30	177.1	144.4	114.4	1.262	69	25.4	13.47	32.7	22.6	28.6	8.6	CC
0 - 30	167.2	141.9	114.4	1.240	200	25.4	13.47	25.3	17.8	22.1	6.6	CC
0 - 30	157.5	144	114.4	1.259	1100	25.4	13.47	13.5	9.4*	11.8	3.5	PMP

\* Valor obtenido a partir de la lámina de agua determinada mediante la ecuación  $Y = 16.30 - 1.83 \cdot \ln X$

PSH = Peso del suelo húmedo (g); PSS = Peso del suelo seco (g); VB = Volumen del bote o cilindro (cm<sup>3</sup>); Dap = Densidad aparente del suelo (g/cm<sup>3</sup>); CC = Capacidad de campo (% en base a masa); PMP = Punto de marchites permanente (% en base a masa); Pa = Peso del agua (g); Hg = Humedad gravimétrica (% en base a masa); Hv = Humedad volumétrica (%); La = Lámina de agua (cm); HS = Humedad de suelo; SS = Suelo saturado.

**Ecuaciones de cálculo:**

VB	= $\pi/4 \cdot d^2 \cdot h$	(volumen del cilindro)
Dap	= $PSS/Vt$	(densidad aparente)
Pa	= $PHM-PSS$	(Peso del agua)
Hg	= $Pa/PSS \cdot 100$	(Humedad gravimétrica)
Hv	= $Va/VS \cdot 100$	(Humedad volumétrica)
La	= $Hv \cdot prof$	(Lámina de agua)
P	= $(1-Dap/Dr) \cdot 100$	(Porosidad del suelo)
Dr	= $MSS/VT = 2.62$	(Densidad real)

**Cuadro A.19. Relación de la lámina de agua y la tensión de humedad en el suelo**

Los datos de la tensión de humedad fueron tomados durante la toma de muestras de suelo a una profundidad de 22 cm del suelo.

Tensión (cb)	Humedad del suelo	
	Lámina media de agua (cm)	Nº de pruebas
9	12.27	4
36	9.80	3
42	9.40	1
69	8.55	2
200	6.60	1
500	4.92	-
1100	3.50	-

La función matemática obtenida fue la siguiente relación logarítmica:  
 $Y = 16.30 - 1.83 \cdot \ln X$ ;  $r = 0.9997$ ;  $r^2 = 0.9996$

**Cuadro A.20. Características de los aspersores RAIN BIRD 30H de la lámina A3**

Modelo 30H (SBN-3)  
 Rain bird  
 Boquilla secundaria de corto alcance  
 Aspersor de alta presión  
 Ángulo de trayectoria 27°  
 Presión de operación 1.7-5.5 (bar)  
 Caudal de variación 0.66-2.98 (m<sup>3</sup>/h)  
 Radio de mojado 10 – 17.23 (m)

Presión en boquilla (Bar)	Diámetro de boquilla (mm) (4,6 x 2,38)		
	Radio (m)	Caudal (l/s)	Caudal (m <sup>3</sup> /h)
1.7	13.0	0.40	1.45
2.0	13.7	0.43	1.56
2.5	14.4	0.48	1.74
3.0	14.8	0.53	1.90
3.5	15.3	0.57	2.06
4.0	15.5	0.61	2.20
4.5	15.7	0.64	2.32
5.0	15.9	0.68	2.46
5.5	16.2	0.73	2.61

Prueba de caudal de los aspersores de la lámina A3  
 Altura de trayectoria 2.1 m

Presión de salida (Bar)	Diámetro de boquilla (mm) (4,6 x 2,38)		
	Radio (m)	Caudal (l/s)	Caudal (m <sup>3</sup> /h)
1.8	12	0.37	1.31
1.8	12	0.38	1.37
2	12	0.389	1.40

Características de los aspersores de la lámina A2  
 Modelo DAN 4455  
 Fabricación Israelí

Presión de salida (Bar)	Diámetro de boquilla (mm) (2.8 x 2.76)		
	Radio (m)	Caudal (l/s)	Caudal (m <sup>3</sup> /h)
1.8	11.0	0.216	0.78
1.85	11.8	0.222	0.80
2.0	12.4	0.23	0.82

**Cuadro A.21. Significancia estadística del análisis de varianza de la materia seca de la alfalfa por cortes**

Fuentes De Variación	F Tabl	1er Corte		2do Corte		3er Corte	
		F Calc	Sinif	F calc	Sinif	F calc	Sinif
Bloque	6.94	1.33	ns	5.05	ns	3.58	ns
Riego	6.94	2168.59	*	5449.95	*	949.11	*
Profundidad	3.88	34.32	*	166.90	*	56.20	*
Riego x Profundidad	3.26	8.71	*	36.01	*	27.49	*
Fósforo	3.26	3.17	ns	0.84	ns	15.62	*
Riego x Fósforo	2.63	4.10	ns	5.21	*	11.66	*
Profundidad x Fósforo	2.63	0.48	ns	0.40	ns	2.09	ns
Riego x Prof. x Fósforo	2.21	0.47	ns	1.12	ns	1.56	ns
Coefficiente de variación		6.41		5.18		11.54	

\* = Significativo; ns = No significativo

**Cuadro A.22. Significancia estadística del análisis de varianza de la altura de planta por cortes**

Fuentes De Variación	F Tabl	1er Corte		2do Corte		3er Corte	
		F Calc	Sinif	F calc	Sinif	F calc	Sinif
Bloque	6.94	6.03	ns	1.49	ns	1.97	ns
Riego	6.94	1846.22	*	1700.94	*	2601.35	*
Profundidad	3.88	41.89	*	47.93	*	51.22	*
Riego x Profundidad	3.26	12.99	*	11.04	*	8.59	*
Fósforo	3.26	2.60	ns	1.79	ns	3.11	ns
Riego x Fósforo	2.63	1.42	ns	2.46	ns	6.37	*
Profundidad x Fósforo	2.63	1.53	ns	1.25	ns	2.44	ns
Riego x Prof. x Fósforo	2.21	1.85	ns	1.16	ns	1.12	ns
Coefficiente de variación		3.91		4.58		3.48	

\* = Significativo; ns = No significativo

**Cuadro A.23. Significancia estadística del análisis de varianza de la relación hoja/tallo por cortes**

Fuentes De Variación	F Tabl	1er Corte		2do Corte		3er Corte	
		F Calc	Sinif	F calc	Sinif	F calc	Sinif
Bloque	6.94	0.46	ns	2.23	ns	3.22	ns
Riego	6.94	60.58	*	67.50	*	273.45	*
Profundidad	3.88	9.54	*	7.02	*	22.44	*
Riego x Profundidad	3.26	1.03	ns	1.26	ns	1.19	ns
Fósforo	3.26	2.10	ns	1.01	ns	4.00	*
Riego x Fósforo	2.63	0.74	ns	1.61	ns	1.07	ns
Profundidad x Fósforo	2.63	2.37	ns	1.85	ns	2.27	ns
Riego x Prof. x Fósforo	2.21	0.46	ns	2.90	*	1.44	ns
Coefficiente de variación		4.65		4.89		2.53	

\* = Significativo; ns = No significativo

**Cuadro A.24. Descripción de costos de los componentes del sistema de riego**

Descripción Y Características	Unidad	Cantidad	Precio Unitario (\$Bs)	Precio Total (\$Bs)	Precio Total (\$Us)
<b>Conjunto de la motobomba</b>					
Motor 6,5 HP 3", (con accesorios)	Conjunto	1	1940,00	1940,0	241,0
<b>Línea principal</b>					
Politubo 2"	m	200	9,00	1800,0	223,6
Collarín 2" a 1 ½ "	pieza	5	44,00	220,0	27,3
Llave de paso 1 ½ "	pieza	10	36,00	360,0	44,7
Unión universal 2"	pieza	4	25,00	100,0	12,4
Unión universal 1 ½ "	pieza	10	14,50	145,0	18,0
Distribuidor "T"	pieza	5	15,00	75,0	9,3
Acople 2"	pieza	1	10,00	10,0	1,2
Tapones PVC 2"	pieza	1	6,00	6,0	0,7
<b>Línea Lateral</b>					
Politubo 1 ½ "	m	400	3,50	1400,00	173,9
Collarín 1 ½ " a ¾ "	pieza	40	26,50	1060,00	131,7
Tapones ¾ "	pieza	32	2,50	80,00	9,9
Codos 1 ½ "	pieza	10	8,50	85,00	10,6
Reductores 1 ½ " a ¾ "	pieza	32	4,20	134,40	16,7
Collarín 1 ½ " a ½ "	pieza	10	21,00	210,00	26,1
Tapones de 1/2"	pieza	10	1,50	15,00	1,9
Tapones de 3/4"	pieza	32	2,50	80,00	9,9
Manómetro	pieza	4	25,00	100,00	12,4
<b>Conjunto de aspersión</b>					
Asta PVC ¾ "	pieza	8	7,00	56,00	7,0
Tutores FG	pieza	8	3,50	28,00	3,5
Aspersores RB 30H	pieza	8	115,00	920,00	114,3
Asesoramiento técnico				400,00	49,7
Excavación e instalación	jornal	12	30,00	360,00	44,7
Imprevistos				200,00	24,8
Costo total de la red de conducción y distribución				7844,40	974,5
Vida útil red de distribución (10 años); Vida útil de motobomba (6 años)					
Tasa de cambio (t/c) \$Bs				8,05	

**Cuadro A.25. Descripción de los costos fijos de establecimiento de la pradera asociada**

Descripción y Características	Unidad	Cantidad	Costo Unitario (\$Bs)	Costo Total (\$Bs)	Costo Total (\$US)
Preparación de suelo					
Roturado	h, tractor	4	70,00	280,00	34,78
Rastreado	h, tractor	3	70,00	210,00	26,09
Remoción y rastreado	h, tractor	6	70,00	420,00	52,17
Nivelado	h, tractor	2	70,00	140,00	17,39
Surcado lineal superficial	h, tractor	3	70,00	210,00	26,09
Siembra					
Semilla Alfalfa	kg	15	36,00	540,00	67,08
Semilla Festuca alta	kg	6	33,00	198,00	24,60
Semilla avena (tutor)	kg	25	1,40	35,00	4,35
Inoculante	kg	0,5	80,00	40,00	4,97
Fertilizante (FDA)*	kg	100	3,20	320,00	39,75
Siembra al boleo (ayudante)	jornal	4	30,00	120,00	14,91
Gastos de transporte (insumos)	viaje	4	20,00	80,00	9,94
Asesoramiento técnico				400,00	49,69
Imprevistos				200,00	24,84
Costo Total				3193,00	396,65
Costo fijo anual (10 años de producción)					

Descripción Y Características De Los Costos Fijos Totales	Total \$US	Anual \$US	Total (\$Bs)	Anual (\$Bs)
Costos fijos de la red de conducción	974,46	97,45	7844,40	784,44
Costos fijos de la motobomba	240,99	40,17	1940,00	323,33
Costos fijos del establecimiento	396,65	39,66	3193,00	319,30
Costos Fijos Totales (CFT)	1612,10	177,28	12977,40	1427,07

**Cuadro A.26. Costos variables de operación del sistema de riego y el manejo de la pradera asociada**

Descripción y características	Unidad	Cantidad	Costo Unitario (\$Bs)	Costo total (\$Bs)	Costo Total (\$Us)
Operación del sistema de riego Lámina A3 RAIN BIRD-30H					
Combustible (media, 22 riegos)	l	310	3,76	1165,60	144,80
Aceite	l	2	14,00	28,00	3,48
Operador	jornal	40	30,00	1200,00	149,07
Mantenimiento				200,00	24,84
Total				2593,60	322,19
Operación del sistema Lámina A2 DAN-4455					
Combustible (media, 22 riegos)	l	280	3,76	1052,80	130,78
Aceite	l	2	14,00	28,00	3,48
Operador	jornal	40	30,00	1200,00	149,07
Mantenimiento				200,00	24,84
Total				2480,80	308,17
Fertilización					
Fertilizante (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) 17 ppm FMA	k	129	17,00	2193,00	272,42
Fertilización	Jornal	2	30,00	60,00	7,45
Total				2253,00	279,88
Fertilizante (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) 25 ppm FMA	kg	241	17,00	4097,00	508,94
Fertilización	Jornal	2	30,00	60,00	7,45
Total				4157,00	516,40
Prof. de roturado parcial espaciado					
Roturado parcial y espaciado 7,5 cm	h, tractor	5	80,00	400,00	49,69
Total				400,00	49,69
Roturado parcial espaciado 15 cm		6	80,00	480,00	59,63
Total				480,00	59,63

**Cuadro A.27. Determinación del precio de campo de la alfalfa**

Descripción y características	Unidad	Cantidad	Costo Unitario (\$Bs)	Costo total (\$Bs)	Costo Total (\$Us)
Corte	h	4	75,00	300,00	37,27
Recojo transporte y comercialización	Jornal	3	135,00	405,00	50,31
Total por corte/ha				705,00	87,58
Total anual/ha	Corte	3	705,00	2115,00	262,73

**Cuadro A.28. Costos fijos anuales de las láminas A3 y A2**

Costo fijo anual del sistema de riego (6 años de vida útil MB)	7844,40	\$Bs
Costo fijo anual del establecimiento de alfalfa (10 años de producción)	3193,00	\$Bs
Costos fijos totales	11037,40	\$Bs
	1366,01	\$us

**Cuadro A.29. Determinación del precio comercialización de la alfalfa**

Rendimiento Bruto	10380,00	kg MS
Rendimiento ajustado	9861,00	kg MS
Costos unitarios de cosecha y comercialización	0,20	\$Bs/kg MS
Precio de mercado alfalfa	1,75	\$Bs/kg MS
Precio de Campo de la alfalfa	1,54	\$Bs/kg MS

**Cuadro A.30. Rendimiento ajustado de la alfalfa y la festuca alta**

Láminas de riego	Alfalfa (kg/ha)	Festuca (kg/ha)	Total Rdto. MS (kg/ha)
Lámina A3 (32 mm/semana)	9861,00	1159,00	11020,00
Lámina A2 (21 mm/semana)	5112,90	959,50	6072,40
Lámina A1(sin riego)	2669,50	845,50	3515,00

**Cuadro A.31. Ingresos Brutos (IB)**

Especie Láminas	Rendimiento MS (kg/ha)	Rndto Ajustado 10% pérdida	Precio mercado (\$Bs)	Ingresos Brutos (\$Bs)
Alfalfa Lámina A3	10380,00	9861,00	1,54	15230,26
Alfalfa lámina A2	5382,00	5112,90	1,54	7896,85
Alfalfa Lámina A1	2810,00	2669,50	1,54	4123,03
Festuca Lámina A3	1220,00	1159,00	0,8	927,90
Festuca Lámina A2	1010,00	959,50	0,8	768,18
Festuca Lámina A1	890,00	845,50	0,8	676,91

**Cuadro A.32. Ingresos Brutos de la producción de la pradera asociada**

Láminas de riego (mm/semana)	IB (alfalfa) (\$Bs)	IB ( festuca) (\$Bs)	Ingreso bruto total (IBT)	
			(\$Bs)	(\$us)
Lámina A3(32)	15230,26	927,90	16158,16	1999,77
Lámina A2(21)	7896,85	768,18	8665,02	1072,40
Lámina A1 (sin riego)	4123,03	676,91	4799,94	594,05

Rendimiento total ajustado			
Láminas de riego (mm/semana)	Alfalfa (kg/ha)	Festuca (kg/ha)	Rendimiento Total MS (kg/ha)
Lam A3 (32)	9861,00	1159,00	11020,00
Lam A2 (21)	5112,90	959,50	6072,40
Lam A1 (sin riego)	2669,50	845,50	3515,00

**Cuadro A.33. Flujo de caja que determina el VAN, TIR y el B/C (Yupanqui, 2006)**

Periodo	Flujo de Ingresos	Flujo de Egresos	Utilidad Neta
(años)	(\$Bs)	(\$Bs)	(\$Bs)
0	0,0	12977,40	-12977,4
1	16158,16	6450,67	9707,5
2	16158,159	6450,67	9707,5
3	16158,159	6450,67	9707,5
4	16158,159	6450,67	9707,5
5	16158,159	6450,67	9707,5
6	16158,159	6450,67	9707,5
7	16158,159	7450,67	8707,5
8	16158,159	6450,67	9707,5
9	16158,159	6450,67	9707,5
10	21383,496	6450,67	14932,8
Val act.12 %	109.137,8	49.877,5	43.102,1

VAN: 59.260,29; B/C: 2,2; TIR: 75%

**Cuadro A.34. Tabla de porcentaje de materia seca para la relación hoja/tallo proveniente de la ecuación  $y = 55.116 x^{-1.073}$  (Establecido para determinar el contenido de proteína en las diferentes fases de desarrollo de la alfalfa)**

Nº de muestras	Hoja (g)	Tallo (g)	Mat. Seca (g)	H/T (g/g)	HOJA (%)	TALLO (%)
10	10.0	20.0	30.0	0.500	33.33	66.67
10	10.0	19.5	29.5	0.513	33.90	66.10
10	10.0	19.0	29.0	0.526	34.48	65.52
10	10.0	18.5	28.5	0.541	35.09	64.91
10	10.0	18.0	28.0	0.556	35.71	64.29
10	10.0	17.5	27.5	0.571	36.36	63.64
10	10.0	17.0	27.0	0.588	37.04	62.96
10	10.0	16.5	26.5	0.606	37.74	62.26
10	10.0	16.0	26.0	0.625	38.46	61.54
10	10.0	15.5	25.5	0.645	39.22	60.78
10	10.0	15.0	25.0	0.667	40.00	60.00
10	10.0	14.5	24.5	0.690	40.82	59.18
10	10.0	14.0	24.0	0.714	41.67	58.33
10	10.0	13.5	23.5	0.741	42.55	57.45
10	10.0	13.0	23.0	0.769	43.48	56.52
10	10.0	12.5	22.5	0.800	44.44	55.56
10	10.0	12.0	22.0	0.833	45.45	54.55
10	10.0	11.5	21.5	0.870	46.51	53.49
10	10.0	11.0	21.0	0.909	47.62	52.38
10	10.0	10.5	20.5	0.952	48.78	51.22
10	10.0	10.0	20.0	1.000	50.00	50.00
10	10.0	9.5	19.5	1.053	51.28	48.72
10	10.0	9.0	19.0	1.111	52.63	47.37
10	10.0	8.5	18.5	1.176	54.05	45.95
10	10.0	8.0	18.0	1.250	55.56	44.44
10	10.0	7.5	17.5	1.333	57.14	42.86
10	10.0	7.0	17.0	1.429	58.82	41.18
10	10.0	6.5	16.5	1.538	60.61	39.39
10	10.0	6.0	16.0	1.667	62.50	37.50
10	10.0	5.5	15.5	1.818	64.52	35.48
10	10.0	5.0	15.0	2.000	66.67	33.33
10	10.0	4.5	14.5	2.222	68.97	31.03
10	10.0	4.0	14.0	2.500	71.43	28.57
10	10.0	3.5	13.5	2.857	74.07	25.93
10	10.0	3.0	13.0	3.333	76.92	23.08
10	10.0	2.5	12.5	4.000	80.00	20.00
10	10.0	2.0	12.0	5.000	83.33	16.67
10	10.0	1.5	11.5	6.667	86.96	13.04
10	10.0	1.0	11.0	10.000	90.91	9.09
10	10.0	0.5	10.5	20.000	95.24	4.76
10	10.0	0.1	10.1	100.000	99.99	0.01

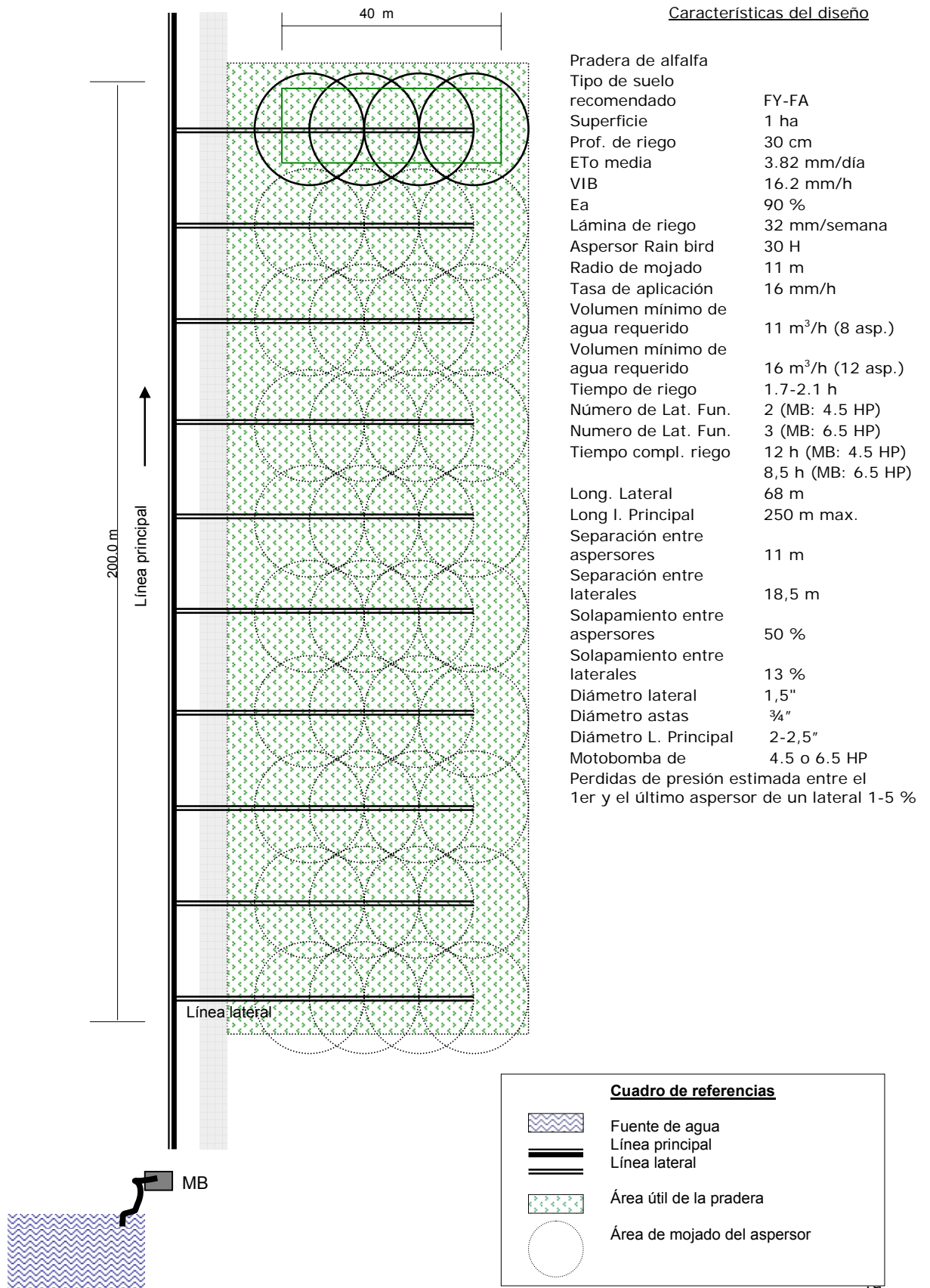


**Cuadro A.35. Concentración de Calcio ( $\text{Ca}^{+2}$ ) en el agua del suelo, contenida en el suelo cerca de la superficie, que resultaría de regar con agua de una determinada C.E. y un determinado de valor  $\text{HCO}_3^-/\text{Ca}^{2+}$  (FAO)**

$\frac{\text{HCO}_3^-}{\text{Ca}^{2+}}$	C.E. del agua aplicada (dS/m)												
	0,1	0,2	0,3	0,5	0,7	1	1,5	2	3	3,29	4	6	8
0,50	13,2	13,61	13,9	14,4	14,79	15,26	15,91	16,43	17,28	17,76	17,97	19,07	19,94
0,10	8,31	8,57	8,77	9,07	9,31	9,62	10,02	10,35	10,89	11,19	11,32	12,01	12,56
0,15	6,34	6,54	6,69	6,92	7,11	7,34	7,65	7,9	8,31	8,54	8,64	9,17	9,53
0,20	5,24	5,4	5,52	5,71	5,87	6,06	6,31	6,52	6,86	7,05	7,13	7,57	7,91
0,25	4,51	4,65	4,76	4,92	5,06	5,22	5,44	5,62	5,91	6,08	6,15	6,52	6,82
0,30	4	4,12	4,21	4,36	4,48	4,62	4,82	4,98	5,24	5,38	5,44	5,77	6,04
0,35	3,61	3,72	3,8	3,94	4,04	4,17	3,45	4,49	4,72	4,85	4,91	5,21	5,45
0,40	3,3	3,4	3,48	3,6	3,7	3,82	3,98	4,11	4,32	4,44	4,49	4,77	4,98
0,45	3,05	3,14	3,22	3,33	3,42	3,53	3,68	3,8	4	4,10	4,15	4,41	4,61
0,50	2,84	2,93	3	3,1	3,19	3,29	3,43	3,54	3,72	3,82	3,87	4,11	4,3
0,75	2,17	2,24	2,29	2,37	2,43	2,51	2,62	2,7	2,84	2,91	2,95	3,14	3,28
1,00	1,79	1,85	1,89	1,96	2,01	2,09	2,16	2,23	2,35	2,41	2,44	2,59	2,71
1,25	1,54	1,59	1,63	1,68	1,73	1,78	1,86	1,92	2,02	2,07	2,1	2,23	2,33
1,50	1,37	1,41	1,44	1,49	1,53	1,58	1,65	1,7	1,79	1,83	1,86	1,97	2,07
1,54	1,33	1,29	1,32	1,37	1,4	1,45	1,51	1,56	1,64	1,68	1,7	1,81	1,89
1,75	1,23	1,27	1,3	1,35	1,38	1,43	1,49	1,54	1,62	1,66	1,68	1,78	1,86
2,00	1,13	1,16	1,19	1,23	1,26	1,31	1,36	1,4	1,48	1,52	1,54	1,63	1,7
2,25	1,04	1,08	1,1	1,14	1,17	1,21	1,26	1,3	1,37	1,40	1,42	1,51	1,58
2,50	0,97	1	1,02	1,06	1,09	1,12	1,17	1,21	1,27	1,30	1,32	1,4	1,47
3,00	0,85	0,89	0,91	0,94	0,96	1	1,04	1,07	1,13	1,15	1,17	1,24	1,3
3,50	0,78	0,8	0,82	0,85	0,87	0,9	0,94	0,97	1,02	1,04	1,06	1,12	1,17
4,00	0,71	0,73	0,75	0,78	0,8	0,82	0,86	0,88	0,93	0,94	0,97	1,03	1,07
4,08	0,70	0,72	0,74	0,77	0,79	0,81	0,85	0,87	0,91	0,92	0,96	1,01	1,05
4,50	0,66	0,68	0,69	0,72	0,74	0,76	0,79	0,82	0,86	0,87	0,9	0,95	0,99
5,00	0,61	0,63	0,65	0,67	0,69	0,71	0,74	0,76	0,8	0,82	0,83	0,88	0,93
7,00	0,49	0,5	0,52	0,53	0,55	0,57	0,59	0,61	0,64	0,66	0,67	0,71	0,74
10,00	0,39	0,4	0,41	0,42	0,73	0,45	0,47	0,48	0,51	0,52	0,53	0,56	0,58
20,00	0,24	0,25	0,26	0,26	0,27	0,28	0,29	0,3	0,32	0,327	0,33	0,35	0,37
30,00	0,18	0,19	0,2	0,2	0,21	0,21	0,22	0,23	0,24	0,247	0,25	0,27	0,28

La fila y a columna sombreada, fueron determinados por interpolación

Cuadro A.36. Croquis del diseño del sistema de microriego por aspersion utilizado en la investigación



**Fotografías**

A.37. Riego en la franja de evaluación de la lámina A3 (32 mm/semana) después del corte



A.38. Proceso de riego de la lámina A3 (32mm/semana) después del corte



A.39. Medición de la humedad del suelo mediante tensiómetros y el sensor de humedad de la estación meteorológica Vantage PRO-2



A.40. Pruebas del pH del suelo mediante el Water PROF HI 8857



A.41. Pruebas del Caudal del aspersor RAIN BIRD 30 H, de la lámina A3 durante el inicio de la investigación



A.42. Producción de las praderas de alfalfa en condiciones de secano en el inicio del verano (2005)



A.43. Producción de la alfalfa en la lámina A3 (32 mm/semana)



A.44. Estación meteorológica Vantage PRO-2

