

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO – PUNO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**



# **TITULO**

**“DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LAS NECESIDADES  
HÍDRICAS DEL BOFEDAL EN PUNA SECA Y HÚMEDA EN EL  
DEPARTAMENTO DE PUNO”**

# **TESIS**

**PRESENTADO POR:**

**BACH. RICAR ZEA MAMANI**

**PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO AGRÍCOLA**

**XII PROMOCIÓN**

**PUNO - PERÚ**

**2015**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO – PUNO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**

**“DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LAS NECESIDADES  
HÍDRICAS DEL BOFEDAL EN PUNA SECA Y HÚMEDA EN EL  
DEPARTAMENTO DE PUNO”**

**TESIS**

PRESENTADO A LA DIRECCIÓN DE INVESTIGACIÓN DE LA FACULTAD DE  
INGENIERÍA AGRÍCOLA, COMO REQUISITO PARA OPTAR EL TITULO DE:

**INGENIERO AGRÍCOLA**

**APROBADO POR:**

PRESIDENTE

:   
Dr. José Justiniano VERA SANTAMARÍA

PRIMER MIEMBRO

:   
Ing. M.Sc. Oscar Raúl Mamani Luque

SEGUNDO MIEMBRO

:   
Ing. Edgardo Sebastián GUERRA BUENO

DIRECTOR DE TESIS

:   
Ing. M.Sc. Audberto MILLONES CHAFLOQUE

ASESOR DE TESIS

:  
Dr. Ramón Aristides SERRUTO COLQUE

ÁREA : Ingeniería y Tecnología  
TEMA: Gestión de sistema de riego  
LÍNEA: Recursos Hídricos

**DEDICATORIA**

*A nuestro Padre Celestial y señor Jesucristo por ser mi guía y protector.*

*A mis queridos padres Rosendo y Luiza con eterna gratitud por su apoyo incondicional y con abnegación para lograr mis metas.*

*A mí amada esposa Adolfa por ser parte de mi vida y un motivo más de superación.*

*A mis queridos hermanos Emiliana, Henry, Julia, Dany y Roxana por su apoyo incondicional, respaldo y aliento durante mis estudios universitarios.*

*A mis amigos Julio César, Lucio, René y a todos Los que fueron mis compañeros en la universidad, por compartir conmigo su amistad y todo lo que implica ello.*

## AGRADECIMIENTO

A Dios, dueño y creador del mundo por la oportunidad que nos brinda de vivir y compartir nuestra alegría con los demás y poder expresar nuestro agradecimiento, a cada una de aquellas personas que hicieron posible la culminación de esta tesis.

A la Universidad Nacional del Altiplano en especial a la Facultad de Ingeniería Agrícola, y a todos los señores docentes y administrativos de la Escuela Profesional de Ingeniería Agrícola, por sus sabias enseñanzas impartidas durante mi formación profesional. Gracias por compartir sus experiencias profesionales y orientaciones para mi superación personal.

Al Ing. M. Sc. AUDBERTO MILLONES CHAFLOQUE y al Dr. RAMÓN ARÍSTIDES SERRUTO COLQUE que como director y asesor de mi trabajo de investigación me han brindado su apoyo incondicional, colaborando en el proceso de investigación con su orientación ofreciéndome su confianza, amistad y apoyo en todo momento; muchas gracias por su comprensión, orientación y ser parte de mi formación profesional.

Al Dr. JUSTINIANO VERA SANTA MARÍA, Ing. M. Sc. OSCAR MAMANI LUQUE y al Ing. EDGARDO GUERRA BUENO, jurados del presente trabajo. Por sus acertadas sugerencias y recomendaciones.

Al subproyecto “**Recuperación y Conservación de los Ecosistemas con Bofedales para fines de Aprovechamiento en la Producción de Camélidos Andinos en la Cuenca Hidrográfica del Titicaca – Puno**”, financiado por INCAGRO en convenio con el INIA-Puno, por darme la oportunidad de ser parte del equipo investigador y poder realizar la presente tesis.

Al Ing. José Pitágoras Quispe Aragón, Ing. José Luis Cahuana Jorge, Ing. Marcial Halanoca y el Ing. Elwis Choquehuanca Hanco, por su apoyo, orientación y amistad que me brindan en todo momento.

## ÍNDICE

	Pág.
RELACIÓN DE CUADROS .....	VIII
RELACIÓN DE FIGURAS .....	X
RELACIÓN DE FOTOGRAFÍAS .....	XII
ARELACION DE ANEXOS .....	XIII
RESUMEN .....	XIV
ABSTRACT .....	XV
I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1    PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
1.2    JUSTIFICACIÓN .....	2
1.3    ANTECEDENTES .....	5
1.4    OBJETIVOS .....	6
1.4.1. Objetivo general .....	6
1.4.2. Objetivos específicos.....	6
1.5    HIPÓTESIS .....	6
1.5.1. Hipótesis general.....	6
1.5.2. Hipótesis específicos .....	6
II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	7
2.1.    ZONA AGROECOLÓGICA DE PUNA .....	7
2.1.1    Puna húmeda .....	7
2.1.2    Puna seca .....	8
2.2.    BOFEDAL.....	8
1.2.1    Definición de bofedales .....	8
1.2.2    Tipos de bofedal.....	11
2.3.    NECESIDADES DE AGUA EN CULTIVOS.....	12
2.3.1    Evaporación .....	12
2.3.2    Transpiración.....	14
2.3.3    Evapotranspiración.....	17
2.3.4    Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET <sub>o</sub> ).....	25
2.3.5    Métodos para estimar la evapotranspiración de referencia (ET <sub>o</sub> ) .....	26
2.3.6    Evapotranspiración real del cultivo (ET <sub>r</sub> ) .....	34
2.4.    COEFICIENTE DE CULTIVO .....	35
2.4.1    Coeficiente del cultivo (K <sub>c</sub> ) .....	35

2.4.1	Factores que determinan el coeficiente del cultivo (Kc) .....	37
2.5.	RELACIÓN SUELO AGUA PLANTA .....	39
2.6.	NECESIDADES DE AGUA DEL CULTIVO .....	44
2.7.	BALANCE HÍDRICO .....	45
III.	MATERIALES Y MÉTODOS .....	46
3.1	MEDIO EXPERIMENTAL.....	46
3.1.1	Ubicación de la zona de estudio .....	46
3.1.2	Caracterización ecológica y climática de los bofedales.....	46
3.2	MATERIAL EXPERIMENTAL .....	48
3.2.1	Bofedales elegidos .....	48
3.2.2	Materiales y equipos de campo .....	48
3.2.3	Materiales y equipos de laboratorio .....	49
3.2.4	Información meteorológica .....	49
3.3	METODOLOGÍA.....	50
3.3.1	Variables de respuesta .....	50
3.3.2	Construcción e instalación de lisímetros .....	50
3.4	METODOLOGÍA DE MEDICIÓN DE VARIABLES .....	55
3.4.1	Determinación de factores climático (hidrología y meteorología).....	55
3.4.2	Determinación de la temperatura y contenido de humedad del suelo.....	56
3.4.3	Composición florística y determinación de producción de biomasa en los bofedales. .....	57
3.4.4	Análisis físico y químico del agua y suelo .....	61
3.4.5	Determinación de evapotranspiración de referencia (ET <sub>o</sub> ) por métodos indirectos ... .....	64
3.4.6	Calculo de ET <sub>c</sub> bajo condiciones de estrés hídrico .....	69
3.4.7	Determinación de necesidades hídricas (ET <sub>b</sub> ) del bofedal por método directo de lisímetros.....	70
3.4.8	Determinación del coeficiente del cultivo (Kc) del bofedal.....	72
3.5	ANÁLISIS ESTADÍSTICO .....	73
3.5.1	Diseño experimental.....	73
3.5.2	Regresión y correlación múltiple .....	74
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	75
4.1	HIDROLOGÍA Y METEOROLOGÍA EN LOS BOFEDALES.....	75
4.1.1	Información meteorológica e hidrológica histórica.....	75
4.1.2	Información meteorológica e hidrológica del año en estudio .....	76

4.2	TEMPERATURA Y CONTENIDO DE HUMEDAD DEL SUELO .....	78
4.2.1	Temperatura del suelo.....	78
4.2.2	Contenido de humedad del suelo .....	79
4.3	COMPOSICIÓN FLORÍSTICA Y PRODUCCIÓN DE FORRAJE EN EL BOFEDAL..	81
4.3.1	Composición florística de los bofedales .....	81
4.3.2	Producción de forraje en bofedales .....	84
4.4	CALIDAD DE AGUA Y SUELO .....	90
4.4.1	Calidad de agua en los bofedales.....	90
4.4.2	Características físicas y químicas del suelo.....	91
4.5	EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO REFERENCIA (ET <sub>o</sub> ) .....	95
4.5.1	Método del tanque evaporímetro Clase A.....	95
4.5.2	Método Hargreaves Modificado .....	96
4.5.3	Método de Serruto.....	97
4.5.4	Método de Penman Monteith (FAO - 56) .....	98
4.5.5	Método de Penman Monteith (FAO - 56) en función a la temperatura.....	99
4.5.6	Método de Penman Monteith (FAO - 56) en función a la temperatura y humedad relativa .....	100
4.5.7	Método de Penman Monteith (FAO - 56) en función a la temperatura y horas de sol .....	101
4.5.8	Método de Blaney – Criddle.....	102
4.5.9	Método de Jensen – Haise .....	103
4.5.10	Análisis estadístico de evapotranspiración de referencia ETo de los métodos indirectos.....	108
4.6	NECESIDADES HÍDRICAS DEL BOFEDAL .....	111
4.6.1	Evapotranspiración del bofedal por el método del lisímetro .....	111
4.6.2	Evapotranspiración del bofedal bajo condiciones de estrés hídrico.....	112
4.6.3	Análisis estadístico de la evapotranspiración del bofedal (ET <sub>b</sub> ).....	113
4.7	COEFICIENTE DEL CULTIVO (K <sub>c</sub> ) DEL BOFEDAL.....	115
4.8	MODELO PARA ESTIMAR LAS NECESIDADES DE AGUA EN BOFEDALES. ....	120
V.	CONCLUSIONES.....	121
VI.	RECOMENDACIONES .....	123
VII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	124
VIII.	ANEXOS.....	127

## RELACIÓN DE CUADROS

	Pág.
Cuadro 01. Factores que inciden en la evaporación y transpiración.....	20
Cuadro 02. Parámetros meteorológicos y atmosféricos que determinan la evapotranspiración de cultivo de referencia.....	25
Cuadro 03. Métodos para estimar la evapotranspiración de referencia.....	27
Cuadro 04. Variables climáticas requeridas para el cálculo de la ETo.....	34
Cuadro 05. Ubicación política y geográfica de los bofedales en estudio.....	46
Cuadro 06. Caracterización ecológica y climática de las unidades experimentales....	46
Cuadro 07. Técnicas utilizadas en la determinación de calidad de agua para riego...	62
Cuadro 08. Métodos utilizados en la determinación de calidad del suelo.....	64
Cuadro 09. Información hidrometeorológica histórica de las estaciones.....	75
Cuadro 10. Información hidrometeorológica (2008) de las unidades experimentales...	76
Cuadro 11. Temperatura del suelo en los Bofedales de puna seca y húmeda.....	78
Cuadro 12. Contenido de humedad del suelo en los bofedales de puna seca y húmeda.....	79
Cuadro 13. Composición florística en bofedales de puna seca y puna húmeda.....	81
Cuadro 14. Descripción de las principales especies en bofedales.....	82
Cuadro 15. Producción mensual de materia seca (kg/ha) en los cuatro bofedales.....	84
Cuadro 16. Análisis de varianza para la producción de materia seca en los bofedales	85
Cuadro 17. Prueba de Duncan para la producción de materia seca (MS), según tipo de bofedales (de enero a diciembre).....	86
Cuadro 18. Prueba de Duncan para la producción mensual de materia seca (MS) en todos los bofedales según meses de cosecha.....	88
Cuadro 19. Análisis físico y químico del agua.....	90
Cuadro 20. Resultados de análisis físico del suelo de los bofedales.....	91
Cuadro 21. Resultados de análisis químico del suelo de los bofedales.....	92
Cuadro 22. Resultados de nutrientes del suelo en los bofedales.....	93
Cuadro 23. Resultados de cationes cambiabiles del suelo en los bofedales.....	94
Cuadro 24. Evapotranspiración de referencia (ETo) por método del Tanque A en bofedales de puna seca y húmeda.....	95
Cuadro 25. Evapotranspiración de referencia (ETo) por método de Hargreaves.....	96
Cuadro 26. Evapotranspiración de referencia (ETo) por método de Serruto.....	97
Cuadro 27. Evapotranspiración de referencia (ETo) por método de Penman Monteith	98
Cuadro 28. Evapotranspiración de referencia (ETo) por método de Penman Monteith en función a la temperatura.....	99

Cuadro 29.	Evapotranspiración de referencia (ET <sub>o</sub> ) por método de Penman Monteith en función a la temperatura y humedad relativa.....	100
Cuadro 30.	Evapotranspiración de referencia (ET <sub>o</sub> ) por método de Penman Monteith en función a la temperatura y horas de sol.....	101
Cuadro 31.	Evapotranspiración de referencia (ET <sub>o</sub> ) por método de Blaney-Criddle....	102
Cuadro 32.	Evapotranspiración de referencia (ET <sub>o</sub> ) por método de Jensen – Haise....	103
Cuadro 33.	Resumen de evapotranspiración de referencia (ET <sub>o</sub> ) por métodos climáticos (promedios mensuales) en Capaso.....	104
Cuadro 34.	Resumen de evapotranspiración de referencia (ET <sub>o</sub> ) por métodos climáticos (promedios mensuales) en Mazocruz.....	105
Cuadro 35.	Resumen de evapotranspiración de referencia (ET <sub>o</sub> ) por métodos climáticos (promedios mensuales) en Santa Rosa.....	106
Cuadro 36.	Resumen de evapotranspiración de referencia (ET <sub>o</sub> ) por métodos climáticos (promedios mensuales) en Macusani.....	107
Cuadro 37.	Análisis de varianza de evapotranspiración de referencia por meses en los bofedales.....	108
Cuadro 38.	Prueba de significancia de Duncan (p:0.05) para la evapotranspiración de referencia entre diferentes métodos para los bofedales de puna seca y húmeda.....	109
Cuadro 39.	Prueba de significancia de Duncan (p 0.05) para la evapotranspiración de referencia entre bofedales para diferentes métodos directos.....	110
Cuadro 40.	Prueba de significancia de Duncan (p:0.05) para la ET <sub>o</sub> entre meses para diferentes métodos.....	110
Cuadro 41.	Evapotranspiración del bofedal (ET <sub>b</sub> ) por método de lisímetros (promedios mensuales).....	111
Cuadro 42.	Evapotranspiración del bofedal bajo condiciones de estrés hídrico y determinación de coeficiente de cultivo ajustado (K <sub>c</sub> –aj).....	112
Cuadro 43.	Análisis de varianza para la evapotranspiración en Bofedales (mm/día)...	113
Cuadro 44.	Prueba de significancia Duncan (p:0.05) para la evapotranspiración del bofedal (ET <sub>b</sub> ) según ubicación del bofedal de enero diciembre.....	114
Cuadro 45.	Prueba de significancia Duncan (p:0.05) para la evapotranspiración del bofedal (ET <sub>b</sub> ) según meses en todos los bofedales.....	115
Cuadro 46.	Coeficiente de cultivo (K <sub>c</sub> ) en bofedales de puna seca y húmeda calculado por métodos climáticos.....	116
Cuadro 47.	Coeficiente de cultivo (K <sub>c</sub> ) en bofedales de puna seca y húmeda calculado por Penman Monteith y K <sub>c</sub> -aj determinado bajo condiciones de estrés hídrico.....	117

## RELACIÓN DE FIGURAS

	Pág.
Figura 01. Movimiento del agua desde el suelo, las hojas y la transpiración.....	15
Figura 02. Repartición de la evapotranspiración en evaporación y transpiración durante el periodo de crecimiento de un cultivo anual.....	17
Figura 03. Factores que afectan la evapotranspiración con referencia a conceptos relacionados de ET.....	20
Figura 04. Factores meteorológicos que determinan la evapotranspiración.....	23
Figura 05. Lisímetro de drenaje para determinar la evapotranspiración.....	30
Figura 06. Tanque Clase A (Manual Riego y Drenaje 56 FAO).....	32
Figura 07. Relación agua – suelo -planta.....	39
Figura 08. Ubicación de los bofedales para la investigación en el departamento de Puno.....	47
Figura 09. Detalle del lisímetro tipo drenaje con nivel freático constante.....	51
Figura 10. Perfil del Lisímetro tipo drenaje con nivel freático constante.....	51
Figura 11. Ubicación de puntos de muestreo del forraje verde dentro del bofedal..	59
Figura 12. Dos casos de localización del tanque de evaporación y sus alrededores.....	65
Figura 13. Balance de agua en la zona radicular del bofedal (FAO, 2006).....	72
Figura 14. Comportamiento de Precipitación Pluvial y Temperatura Media anual Histórica en las estaciones de SENAMHI.....	75
Figura 15. Comportamiento de Precipitación Pluvial y Temperatura Máxima, Mínima y Media Anual en las estaciones de SENAMHI.....	77
Figura 16. Temperatura del suelo en bofedales de puna seca y húmeda.....	79
Figura 17. Contenido de humedad del suelo en bofedales de puna seca y húmeda.....	80
Figura 18. Variación de la producción de materia seca en bofedales de puna seca y húmeda.....	85
Figura 19. Rango de variación de la producción de materia seca anual entre bofedales (kg/ha).....	87
Figura 20. Rango de variación de la producción de materia seca (kg/ha) entre meses de cosecha.....	88
Figura 21. Relación entre pH y Conductividad Eléctrica (CE) del agua en bofedales.....	90
Figura 22. Evapotranspiración de referencia (ET <sub>o</sub> ) por método de Tanque A en Bofedales de puna seca y húmeda.....	95
Figura 23. Evapotranspiración de referencia (ET <sub>o</sub> ) por método de Hargreaves modificado en bofedales de puna seca y húmeda.....	96
Figura 24. Evapotranspiración de referencia (ET <sub>o</sub> ) por método de Serruto en	97

	bofedales de puna seca y húmeda.....	
Figura 25.	Evapotranspiración de referencia (ET <sub>o</sub> ) por método de Penman Monteith en base a todos los datos climáticos en bofedales de puna seca y húmeda.....	98
Figura 26.	Evapotranspiración de referencia (ET <sub>o</sub> ) por método de Penman Monteith en función de temperatura en bofedales de puna seca y húmeda.....	99
Figura 27.	Evapotranspiración de referencia (ET <sub>o</sub> ) por método de Penman Monteith en función de temperatura y humedad relativa en bofedales de puna seca y húmeda.....	100
Figura 28.	Evapotranspiración de referencia (ET <sub>o</sub> ) por método de Penman Monteith en función de temperatura y horas de sol en bofedales de puna seca y húmeda.....	101
Figura 29.	Evapotranspiración de referencia (ET <sub>o</sub> ) por método de Blaney Criddle en bofedales de puna seca y húmeda.....	102
Figura 30.	Evapotranspiración de referencia (ET <sub>o</sub> ) por método de Jensen - Haise en bofedales de puna seca y húmeda.....	103
Figura 31.	Comparación de ET <sub>o</sub> (mm/día) de promedios mensuales por métodos climáticos en Capaso.....	104
Figura 32.	Comparación de ET <sub>o</sub> (mm/día) de promedios mensuales por métodos climáticos en Mazocruz.....	105
Figura 33.	Comparación de ET <sub>o</sub> (mm/día) de promedios mensuales por métodos climáticos en Santa Rosa.....	106
Figura 34.	Comparación de ET <sub>o</sub> (mm/día) de promedios mensuales por métodos climáticos en Macusani.....	107
Figura 35.	Comparación de ET del bofedal (mm/día) de promedios mensuales por método de lisímetros en puna seca y húmeda.....	111
Figura 36.	Comparación de evapotranspiración del bofedal (ET <sub>b</sub> ) y evapotranspiración del bofedal ajustados (E <sub>tb-aj</sub> ) en puna seca y húmeda.....	113
Figura 37.	Comparación de K <sub>c</sub> del bofedal calculado por diferentes métodos climático en el bofedal de Capaso.....	117
Figura 38.	Comparación de K <sub>c</sub> del bofedal calculado por diferentes métodos climático en el bofedal de Mazocruz.....	117
Figura 39.	Comparación de K <sub>c</sub> del bofedal calculado por diferentes métodos climático en el bofedal de Santa Rosa.....	118
Figura 40.	Comparación de K <sub>c</sub> del bofedal calculado por diferentes métodos climático en el bofedal de Macusani.....	118
Figura 41.	Comparación de K <sub>c</sub> del bofedal y K <sub>c-aj</sub> bajo condiciones de estrés hídrico en puna seca y húmeda.....	119
Figura 42.	Análisis de correlación en la evapotranspiración del bofedal y variables meteorológicas.....	120

## RELACIÓN DE FOTOGRAFÍAS

	Pág.
Foto 01.	Excavación para la instalación de lisímetros.....53
Foto 02.	Conexión de tubería de los lisímetros al tanque de lectura.....53
Foto 03.	Registro del volumen de agua drenada de los Lisímetros del bofedal.....55
Foto 04.	Estación hidrológica meteorológica de Macusani.....56
Foto 05:	Uso del geotermómetro digital para registrar la temperatura del suelo.....57
Foto 06.	Distribución de la transecta lineal para el censo de la composición vegetal del bofedal.....57
Foto 07.	Evaluación de la composición florística método de trasección lineal.....58
Foto 08.	Cosecha de la muestra de forraje de la parcela experimental.....59
Foto 09.	Cuadrante de muestreo del bofedal protegida con jaulas.....60
Foto 10.	Secado de muestras en estufa para determinar la materia seca (MS).....60
Foto 11.	Toma de muestras de suelo para análisis de propiedades físicas.....63
Foto 12.	Lisímetros instalados en los bofedales de puna seca y húmeda.....71

## RELACIÓN DE ANEXOS

Anexo 01: Registro de datos diarios de temperatura máxima, mínima y media; precipitación pluvial, humedad relativa, evaporación, velocidad del viento y horas de sol obtenida de estaciones de SENAMHI Puno.....	128
Anexo 02: Cálculo de radiación extraterrestre diaria ( $R_o$ ) expresada en equivalente de evaporación en mm/día y Duración media del día (N) para diferentes latitudes del hemisferio sur. ....	129
Anexo 03: Parámetros atmosféricos: Presión atmosférica (P), Calor Latente de Vaporización $\lambda$ y Constante Psicométrica $\gamma$ para diferentes altitudes (Z) .....	131
Anexo 04: Porcentaje medio diario (p) de horas diurnas anuales a diferentes latitudes... ..	131
Anexo 05: Constantes de a y b para estimar la evapotranspiración de referencia en función de HR (%) y Viento (m/s). ....	133
Anexo 06: Coeficiente de tanque de cultivo ( $K_p$ ) para el tanque clase A para diversas localizaciones de los tanques y varios valores de velocidad media de viento y de humedad relativa. ....	133
Anexo 07: Características típicas de la humedad del suelo para diferentes tipos de suelo.....	134
Anexo 08: Certificado de análisis físico y químico de agua en los bofedales de puna seca y húmeda.....	135
Anexo 09: Certificado de análisis físico y químico del suelo en los bofedales de puna seca y húmeda.....	136
Anexo 10: Calculo de evapotranspiración referencia $E_{To}$ método de Tanque de Tipo A. ....	137
Anexo 11: Calculo de evapotranspiración referencia $E_{To}$ método de Hargreaves Modificado. ....	138
Anexo 12: Calculo de evapotranspiración referencia $E_{To}$ método de Serruto.....	139
Anexo 13: Calculo de Evapotranspiración de referencia $E_{To}$ método de Penman Monteith con todos los datos. ....	140
Anexo 14: Calculo de evapotranspiración referencia $E_{To}$ método de Penman Monteith con temperatura. ....	142
Anexo 15: Calculo de evapotranspiración referencia $E_{To}$ método de Penman Monteith con temperatura y humedad relativa.....	143
Anexo 16: Calculo de evapotranspiración referencia $E_{To}$ método de Penman Monteith con temperatura y horas de sol reales.....	144
Anexo 17: Calculo de evapotranspiración referencia $E_{To}$ método de Blaney Criddle. ....	145
Anexo 18: Calculo de evapotranspiración referencia $E_{To}$ método de Jensen Haise.....	146
Anexo 19: Determinación de necesidades hídricas por el método directo del Lisímetros. ....	148
Anexo 20: Cálculo de $E_{Tb}$ , $K_c$ , $E_{Tc-ajus}$ , $K_c-ajus$ en bofedales de puna seca y húmeda.....	152
Anexo 21: Relación de fotos .....	154

## RESUMEN

El presente trabajo de investigación, se ejecutó en cuatro bofedales ubicados en puna seca y húmeda del departamento de Puno con el objetivo de determinar experimentalmente las necesidades hídricas del bofedal en puna seca y puna húmeda del departamento de Puno y aplicar los resultados en la programación del riego en bofedales y estudios hidrológicos.

Para la determinación de necesidades hídricas se realizó por el método del Lisímetro de drenaje con nivel freático constante (LDNFC). Para lo cual se instalaron tres Lisímetros en cada bofedal, teniendo en cuenta los horizontes del suelo, conservando su textura y densidad, especies del bofedal y pendiente del suelo. Las lecturas de riego y drenaje en cada Lisímetro se realizaron con intervalos de riego cada siete días durante 12 meses del año. La evapotranspiración del bofedal (ETb) se determinó mediante el balance hídrico y el coeficiente de cultivo Kc se calculó con ETo estimado por el método de Penman Monteith recomendado por la FAO. Se realizó el ajuste a la ETb y al Kc, obteniendo la ETc-aj y el Kc-aj. Para el cálculo de ETo se utilizaron 9 métodos indirectos a base de datos climáticos; los datos hidrometeorológicos diarios y mensuales se recopilaron de la estaciones meteorológicas de SENAMHI – PUNO.

La necesidad hídrica del bofedal tiene un promedio mensual de 5.54 mm/día en diciembre, 5.14 mm/día en enero, 4.87 mm/día en noviembre, 4.75 mm/día en febrero, 4.65 mm/día en octubre, 3.95 mm/día en marzo, 3.67 mm/día en setiembre, 3.22 mm/día en abril, 2.96 mm/día en agosto, 2.70 mm/día en mayo, 2.55 mm/día en junio y 2.47 mm/día en julio. El coeficiente de cultivo para el bofedal obtenido en la investigación fue de un máximo de 1.57 en enero, con un mínimo de 0.89 en julio y agosto respectivamente; presentando un promedio anual de Kc = 1.16.

El método de Penman Monteith en base a todos los datos presenta mayor confiabilidad utilizando la prueba de significancia a la probabilidad de 0.05 de Duncan por usar todas las variables climáticas, con una media estimada de 3.29 mm/mes; además es recomendado por la FAO el uso de este método para el cálculo de la ETo.

Se ha determinado el modelo para estimar las necesidades de agua en bofedales es:

$$ETb = 0.0851Tm^{0.1109} * Ra^{0.13592} \text{ con } R=0.6855.$$

Palabra clave: Bofedal, Lisímetros, necesidades hídricas, evapotranspiración, balance hídrico, riego, agua.

### ABSTRACT

This research work was executed in four bofedales located in dry and wet puna department of Puno, in order to experimentally determine the water needs of wetland in dry and wet puna department of Puno and apply the results in programming irrigation bofedales and hydrological studies.

For determination of water requirements was performed by the method of lysimeter drainage constant water table (LDNFC). For which three Lysimeters were installed in each bofedal, considering soil horizons, retaining its texture and density, species bofedal and slope of the land. Readings irrigation and drainage were performed in each lysimeter irrigation intervals every seven days for 12 months. Wetland evapotranspiration (ET<sub>b</sub>) was determined by the water balance and crop coefficient K<sub>c</sub> was calculated with estimated by the Penman Monteith E<sub>T0</sub> recommended by the FAO. The setting is performed to ET<sub>b</sub> and K<sub>c</sub>, obtaining ET<sub>c</sub> and K<sub>c</sub> -aj -aj. To calculate E<sub>T0</sub> 9 indirect methods based on climate data were used; daily and monthly hydrometeorological data were collected from meteorological stations SENAMHI - Puno.

The water needs of the bofedales has a monthly average of 5.54 mm / day in December, 5.14 mm / day in January, 4.87 mm / day in November, 4.75 mm / day in February, 4.65 mm / day in October, 3.95 mm / day March, 3.67 mm / day in September, 3.22 mm / day in April, 2.96 mm / day in August, 2.70 mm / day in May, 2.55 mm / day in June and 2.47 mm / day in July. The crop coefficient for bofedal research was obtained from a high of 1.57 in January, with a minimum of 0.89 in July and August respectively; submit an annual average K<sub>c</sub> = 1.16.

Penman Monteith method based on all data has greater significance reliability using the 0.05 probability using Duncan test all weather variables, with an estimated population of 3.29 mm / month average; also is advisable to use this method to calculate E<sub>T0</sub> and FAO -56 recommended .

It has been determined the model to estimate water needs in bofedaes is:

$$ET_b = 0.0851T_m^{0.1109} * Ra^{0.13592} \text{ con } R=0.6855.$$

Key Words: Bofedal, Lysimeters, water requirements, simulation models, evapotranspiration, irrigation, water.

## I. INTRODUCCIÓN

### 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En las zonas altas del departamento de Puno se encuentran los ecosistemas de bofedales que son las únicas reservas de alimentación para la producción de camélidos; subsistencia y hábitat de las diferentes especies de flora y fauna; regula el caudal de los ríos; gracias a estos ecosistemas se hace posible la presencia de la vida humana en estas altitudes siendo la única actividad socioeconómica de los pobladores altoandinos siendo imposible el desarrollo de otras actividades por que el régimen de las lluvias son esporádicas y con temperaturas por debajo de cero grados centígrados.

En la actualidad existe reducción de las superficies del bofedal por desecamiento e inadecuada programación del riego y distribución del agua por ***“Desconocimiento de las necesidades hídricas del bofedal en puna seca y puna húmeda del departamento de Puno”***. Ocasionando inadecuado manejo del agua, pérdida de agua por escorrentía superficial y subsuperficial; provocando vulnerabilidad, degradación y deterioro de estos ecosistemas; como es la disminución de la cobertura vegetal, disminución de la producción y poca disponibilidad de forraje, desaparición de especies deseables e invasión de especies poco deseables, pérdida de la capacidad productiva del suelo (erosión, lavado de nutrientes, salinización y anegamiento) y finalmente incremento de la tasa de mortalidad ganadera por escasez de pastos, afectando directamente el bienestar económico del productor.

Por estas consideraciones se plantean las siguientes interrogantes a las que se pretende dar respuesta con el presente trabajo:

#### **Pregunta central:**

¿Cuáles son las necesidades de agua en bofedales de puna seca y húmeda del departamento de Puno para aplicar en la programación del riego y conservación de los bofedales?

**Preguntas específicas:**

1. ¿Cuál es la cantidad de agua que requieren los bofedales de puna seca y puna húmeda para el desarrollo óptimo y la variación mensual del coeficiente del cultivo ( $K_c$ ) del bofedal?
2. ¿Qué elementos meteorológicos influyen en la evapotranspiración de los bofedales en puna seca y húmeda; y cuál de los métodos indirectos se ajusta para la determinación de la evapotranspiración de referencia en puna seca y húmeda del departamento de Puno?

**1.2 JUSTIFICACIÓN**

Los bofedales son praderas muy especiales que se forman en las quebradas y alimentados por las Lluvias, ríos y principalmente por las aguas subterráneas (manantiales) que se mantienen su vegetación durante todo el año así en las épocas críticas como el estiaje y sequías que se presentan constantemente y que estas praderas sirven de refugio, hábitat y nichos para las numerosas especies de flora y fauna nativa, además los bofedales se convierten en únicas reservas de alimentación muy apropiadas para la producción de Camélidos Andinos especialmente la Alpaca que hoy es declarado como "Producto Bandera". Para muchas especies de aves, los bofedales son hábitats utilizados como lugares de protección, alimentación y nidificación.

Los bofedales son formaciones vegetales que se establecen en un ambiente edáfico, principalmente orgánico, caracterizado por una condición hídrica de saturación permanente, presentando una gran diversidad biológica respecto del entorno. Están asociados a cursos de agua corriente permanente, con mayor concentración de oxígeno y baja salinidad. No obstante, es posible encontrar bofedales en laderas de montañas o conos volcánicos, donde existen vertientes o nacen ríos superficiales o subsuperficiales.

El bofedal crece y se desarrolla aumentando la producción de biomasa en relación directa al volumen de agua que lo riega, cualquier variación en la disponibilidad del agua o mal manejo de esta resulta en una disminución del área productiva. Por lo tanto, es importante maximizar el uso del agua para los bofedales y cuantificar la productividad por metro cúbico de agua empleada.

La importancia de los bofedales es porque cumple la función ecológica, económica, hidrológica y social, que en los últimos años se observa un desequilibrio ambiental y que estos ecosistemas tienen la función de mantener el equilibrio y además es el termo regulador del clima, de la hidrológica de los ríos cumpliendo en los lugares en donde se encuentran los bofedales.

En la actualidad se observa la degradación y disminución de superficies con Bofedales, por lo que es necesario realizar la evaluación para proponer el uso y manejo adecuado, sustentable y eficiente de estos ecosistemas ubicados en las partes altas de las cuencas y a demás crear una conciencia a los productores alpaqueros para la conservación de este valioso recurso que aún se tiene, gracias a estas ecosistemas se hace posible la presencia de la vida humana en estas altitudes.

**IMPORTANCIA HIDROLÓGICA.** Los bofedales recargan a los acuíferos en la época de lluvias y estas alimentan las fuentes de agua y regula los caudales de los ríos y manantiales en los periodos secos, mantener el abastecimiento de agua, la reducción de la erosión, mantenimiento y mejoran la calidad del agua, la mitigación de los efectos de las crecidas y proteger a las poblaciones humanas contra las inundaciones (amortiguación de las inundaciones), así como el inextricable vínculo que existe entre los recursos hídricos y los bofedales; que implica la integración de la gestión del agua y la conservación de los bofedales en la planificación a nivel de cuencas de captación o hídricas.

**VALOR ECOLÓGICO.** Los bofedales, son sitios con severas limitaciones climáticas que constituyen hábitat y nichos para numerosas especies de fauna y flora nativa con valor ecológico; por otro lado, tienen influencia en el microclima del altiplano principalmente durante la época seca. Los bofedales son fuente de agua y alimento, así muchas especies de aves utilizan como microhábitat y/o lugares de protección y alimentación. Sin embargo, son ecosistemas frágiles que dependen de las condiciones hídricas del suelo.

**VALOR SOCIOECONÓMICO.** Los bofedales, producen buena cantidad de forraje, que permite la crianza de alpacas; siendo la única actividad económica posible a más de 4000 msnm, que permite generar los ingresos económicos por la venta de reproductores, carne, fibra y pieles.

La precipitación en el altiplano divide notoriamente la producción de biomasa en dos periodos; uno con suficiente disponibilidad de agua durante la época de lluvias y el otro con un severo déficit en la época seca.

En este contexto, los bofedales y los ecosistemas similares juegan un rol muy importante al ser los únicos ecosistemas que producen forraje en la época seca, sin estos recursos clave no sería posible la actividad ganadera tal como se la conoce actualmente. Entre estas actividades la crianza de alpacas, tan importante para miles de familias, que depende de existencia de áreas con bofedales.

Los bofedales cumplen también otras funciones socioeconómicas importantes, ya que, por ejemplo, constituyen el hábitat de peces y de recursos forestales, y revisten una importancia crítica para conservar la diversidad biológica.

Los bofedales ocupan pequeñas superficies frente a la gran extensión de vegetación xerofítica en el medio altiplánico y alto andino. Sin embargo, pese a existir estudios superficiales y genéricas sobre algunas características y su clasificación, actualmente no se tiene un estudio adecuado que determine la demanda hídrica en bofedales o cuanto de agua se requiere para la producción de biomasa en el bofedal, por lo tanto es sumamente importante determinar el requerimiento de agua en bofedales a través mediante la instalación de lisímetros en cada unidad experimental; con la información generada se podrá realizar una mejor planificación de sistemas de riego y estudios hidrológicos adecuados en las cuencas ubicados en el altiplano peruano.

En la actualidad existe la necesidad de optimizar el manejo del recurso hídrico en los bofedales, mediante riego en las zonas alto andinas para cubrir las necesidades de agua para el desarrollo de las especies que se encuentran en el bofedal a fin de garantizar la alimentación para la producción ganadera (alpacas).

Se justifica la realización del presente trabajo de investigación, porque contribuirá con una metodología para determinar el Coeficiente de Cultivo del bofedal, bajo las condiciones ambientales del altiplano.

### 1.3 ANTECEDENTES

En la 8va. Reunión de la Conferencia de las Partes de la Convención Ramsar, celebrada en Valencia, España, en noviembre del 2002, se adoptó la Resolución VIII.39 sobre los humedales altoandinos como ecosistemas estratégicos, debido a que regulan y son fuentes de agua para diversas actividades humanas, son ecosistemas de alta biodiversidad y hábitat de especies de flora y fauna amenazadas, son centros de endemismo, son espacios para actividades turísticas y son espacios de vida para diferentes comunidades locales e indígenas. De acuerdo a la Convención Ramsar, existe vulnerabilidad y fragilidad de los humedales altoandinos frente al cambio climático y a la presión generada por actividades tales como la agricultura y sobrepastoreo intensivos, la minería, la extracción excesiva de agua de cuencas endorreicas, introducción de especies exóticas e invasoras y turismo no regulado.

Actualmente los bofedales carecen de estudios científicos, pese a existir algunas investigaciones superficiales tales como las características y distribuciones de los bofedales en el ámbito boliviano del sistema T.D.P.S. (Titicaca, Desaguadero, Poopo y Salar de Coipasa), estudio de capacidad de carga en bofedales para la crianza de alpacas en el sistema T.D.P.S., evaluación de las características y distribución de los bofedales en el ámbito Peruano del sistema T.D.P.S.

Ante esta situación de uso inadecuado de la distribución hídrica y/o mal uso de agua en los bofedales; en época de estiaje y frecuentes sequías. Bajo estas condiciones la existencia del hombre en estas zonas gélidas y a veces desérticas se encuentran sujetas a condiciones de atraso y falta de oportunidades; factores que conllevan a la inestabilidad socioeconómica, viéndose obligados a emigrar a Tacna, Moquegua y otros departamentos del Perú.

La Estación Experimental Illpa Puno del INIA ejecuto el proyecto “Recuperación y Conservación de los Ecosistemas con bofedales con fines de aprovechamiento en la Producción de Camélidos Andinos en la Cuenca Hidrográfica del Titicaca Puno”, con el financiamiento del Proyecto INCAGRO, con el objetivo de generar conocimientos técnicos sobre las necesidades hídricas, producción primaria, valor nutritivo, propagación y la caracterización de especies de mayor valor forrajero del bofedal.

## 1.4 OBJETIVOS

### 1.4.1. Objetivo general

- Determinar experimentalmente las necesidades hídricas del bofedal en puna seca y puna húmeda del departamento de Puno y aplicar los resultados en la programación del riego para el aprovechamiento óptimo del agua en la conservación y mejoramiento del bofedal.

### 1.4.2. Objetivos específicos

- Cuantificar las necesidades hídricas del bofedal en las zonas agroecológicas de puna seca y puna húmeda y determinar el coeficiente de cultivo  $K_c$  del bofedal.
- Comparar y precisar los métodos indirectos apropiados en las zonas agroecológicas de puna seca y puna húmeda con la determinar los principales elementos meteorológicos que influyen en la evapotranspiración del bofedal de puna seca y puna húmeda.

## 1.5 HIPÓTESIS

### 1.5.1. Hipótesis general

- Al determinar las necesidades de hídricas del bofedal, permite realizar la adecuada programación y distribución de agua en los bofedales para lograr la conservación y mejoramiento del bofedal y elevar con ello el nivel de vida de la población.

### 1.5.2. Hipótesis específicos

- La evapotranspiración real y el coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) del bofedal en condiciones de campo, son diferentes en las zonas agroecológicas de puna seca y puna húmeda; y estas a su vez son distintas a la evapotranspiración de pastos cultivados establecidos por la FAO.
- Los métodos indirectos calculados en cada zona agroecológica son confiables para calcular en otros lugares del departamento y los elementos meteorológicos identificados en las zonas agroecológicas de puna seca y puna húmeda son similares.

## II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. ZONA AGROECOLÓGICA DE PUNA

*El MINAG (2007)*, afirma que esta región varía desde los 3,900 hasta los 4,800 msnm, descendiendo por la ladera Oeste de la cordillera occidental pasando alturas cordilleranas superiores a 5,000 msnm hasta los 3,900 msnm del lado Este de la cordillera oriental. Se caracteriza por presentar relieve fisiográfico y una topografía muy accidentada y heterogénea, colinas, quebradas pronunciadas y picos elevados. El clima reinante es frío y seco, con temperaturas que oscilan de  $-6^{\circ}\text{C}$  a  $14^{\circ}\text{C}$  y una precipitación pluvial total promedio anual oscilante entre 500 a 1,000 mm. En las zonas homogéneas de producción de pastizales en ladera de puna húmeda, bofedales, tolares y pastizales de puna seca; por ocurrir en periodo libre de heladas de 30 a 110 días se pueden cultivar con ciertas limitaciones: papa dulce, papa amarga, quinua, cañihua, gramíneas forrajeras y pastos cultivados. De igual forma las cranzas que se explotan son principalmente: llamas y alpacas, vacunos, ovinos y equinos (caballos y mulas). Las localidades representativas de esta zona agroecológica son: Santa Rosa de Ayaviri, Nuñoa, La Raya (puna húmeda) y Santa Rosa de Juli, Paratía, Palca y Santa Lucía (puna seca).

*Pulgar (1976)*, menciona que la región Puna significa sueño, soroche o mal de altura, y esta región está comprendida entre los 4,100 a 4,800 metros de altitud. Su relieve es mayormente de mesetas andina, en cuya amplitud se localizan lagos y lagunas. Su clima es frío con precipitaciones en forma de nevada y granizo. El aire es casi seco. Su vegetación típica son los pastos naturales y su desarrollo ganadero es predominante, pero de naturaleza extensiva. En los andes del norte esta región recibe el nombre de Jalca.

#### 2.1.1 Puna húmeda

Según *Tapia y Flores (1984)*, está es la llamada faja de puna normal, con un mayor uso ganadero y que varía desde los pastizales de planicie con variables grados de humedad y las reguladoras de las laderas, con suelos menos profundos, hasta la vegetación de las altas montañas (verdadera puna) y en donde se pueden desarrollar, desde la vegetación más escasa de suelos pobres hasta la de manchones de "oqhonaes" y ahijaderos en donde la turba enriquece los suelos y permite una

vegetación densa de especies suculentas como la “kunkuna” (*Distichia muscoides*) que es el principal fuente de alimento para las alpacas.

*Flores y Malpartida (1987)*, afirman que la puna húmeda en el sur del Perú está comprendida entre las regiones de Apurímac, Cusco y parte de Puno, es decir en la cordillera oriental de los andes, con niveles de precipitación pluvial que superan los 700 mm anuales. Adicionalmente encontramos mayor cantidad de redes orográficas, corrientes de agua proveniente de los deshielos, acuíferos subterráneos permanentes o manantiales que propician la existencia de bofedales en mayor extensión y número.

### 2.1.2 Puna seca

*Troll (1968)*, considera que la faja de puna seca se extiende longitudinalmente, desde los 15° latitud Sur al norte de la ciudad de Arequipa y corre por el flanco occidental de los Andes hasta Tucumán en la Argentina a 30° latitud Sur.

*Flores y Malpartida (1987)*, afirman que se llama así a la región ubicada mayormente en la cordillera sur occidental del Perú, entre las regiones de Arequipa, Ayacucho, Moquegua, Tacna y parte de Puno, en los que se pueden apreciar principalmente una conformación topográfica accidentada, de relieves pedregosos y arenosos, suelos frágiles con características productivas limitadas, condiciones severas en cuanto a heladas, tanto en su intensidad como en frecuencia, crítico en cuanto al régimen de lluvias de 100 mm y 350 mm, excepcionalmente supera los 400 mm; que se concentran en los meses de verano, una de las características notorias es la presencia de intensos vientos casi permanente; la temperatura en ningún mes alcanza medias mayores a 10 °C, dominando el frío sobre la sequedad.

## 2.2. BOFEDAL

### 1.2.1 Definición de bofedales

*Alberto, H. (2002)*. Un bofedal es un humedal de altura, y se considera una pradera nativa poco extensa con humedad permanente. Estos vegetales o plantas que habitan en el bofedal reciben el nombre de “Vegetales Hidrofíticos”.

*Argote y Zea (2011)*. Los bofedales son ecosistemas que ofrecen y almacenan agua, permitiendo el desarrollo de una diversidad de especies vegetales en ambientes donde las condiciones climáticas no son favorables; es hábitat y fuente alimenticia de diferentes especies animales.

Los bofedales se forman en la naturaleza en zonas geoecológicas tales como las del macizo andino, ubicadas sobre los 3800 m.s.n.m., en donde, en las planicies presentes se almacena agua proveniente de las precipitaciones pluviales, deshielo de glaciares y principalmente afloramientos superficiales de aguas subterráneas. Esto indica que se trata de un sistema frágil y que por lo tanto puede ser fácilmente alterado si no es usado de manera sostenible.

*Alzérreca, (2001)*. Define que los bofedales llamados también “turberas”, “vegas andinas”, “oconales”, “cenegales”, “humedales” y otros, son un tipo de pradera nativa poco extensa con humedad permanente, vegetación siempre verde y de elevado potencial productivo. Se caracterizan por localizarse en suelos hidromorfos húmedos o empapados donde se maximiza la utilización del agua, la producción forrajera es continua, mantienen una carga animal apreciable, principalmente alpacas y otros herbívoros en pastoreo mixto y generalmente continuo. Que son alimentados por escurrimientos de aguas de las partes altas o nevados.

*Lara, et al, (1996)*. también hacen referencia a los bofedales como “vegas andinas” e indican que “constituyen comunidades vegetales hidromórficas de estrato bajo, compactas achatadas o abombadas siempre verdes dominadas por caméfitos pulvinados desarrollados sobre suelos orgánicos hidromórficos, cryofibrils, con niveles altos de agua subterránea y escurrimiento superficial permanente, presentan un perfil constituido por una masa compacta y fibrosa de plantas herbáceas vivas y en varios estados de descomposición asociada al material mineral del suelo generalmente de origen volcánico, presenta cierta estratificación aluvio coluvial y está permanentemente saturado, alimentado por aguas que aportan sales solubles, en algunos casos no obstante que el agua está cerca de las superficie todo el año, estos no presentan horizontes gleyzados. Esto sugiere que es debido al movimiento del agua en el suelo y por lo tanto allí no es reductor el ambiente. Además, los suelos presentan un

incremento de la acidez en profundidad. En otros casos la reacción es moderadamente alcalina y presenta horizontes gleyzados, la napa freática no es variable como el caso anterior, en la composición botánica interviene *Distichia muscoides* o *Plantago tubulosa* que ocupan considerables extensiones en los bordes de charcos, lagunas, arroyos y depresiones con suelos encharcados prácticamente todo el año. Bajo estas condiciones se dan dos tipos de asociaciones:

- a) *Plantago tubulosa*-*Gentiana postrata*, sobre suelos hidromórficos sin sumersión y nivel freático superficial.
- b) *Distichia muscoides*-*Oxychloe andina*, en suelos hidromórficos saturados y nivel freático con escurrimiento superficial. En invierno estos suelos se mantienen congelados”.

*Seibert, (1993)*. Además define que los bofedales son llamados cenagales, tienen agua permanentemente y están ubicados en fondos de valles influenciados por los deshielos glaciares. Por su parte, Flores (1984) señala que el bofedal es un pantano artificial con un nivel constante de agua que facilita el desarrollo de plantas propias de ambientes húmedos.

“Los Bofedales son áreas que presentan humedad constante. Se desarrollan en zonas relativamente planas o en los alrededores de pequeñas lagunas. La humedad constante genera una flora específica de color verde, de alta digestibilidad y alto contenido proteico, que contrastan con los pastos de secano que los rodean. Son locales privilegiados de alimentación especialmente para alpacas, y son únicas fuentes para los animales en la estación seca”.

*Troncoso, (1982)*. Dice que La génesis de los bofedales viene dado por la interacción de la condición ambiental (climática y geomorfológica) con el hombre. Los bofedales se ubican en los fondos de valle abiertos o en las depresiones de laderas por donde escurren las aguas de vertientes originadas por el derretimiento de las capas de nieve o por el escurrimiento de las aguas subterráneas ubicadas en la parte alta de la serranía.

### 1.2.2 Tipos de bofedal

*Hurtado A.*, Se clasifican en diferentes variedades los cuales pueden ser permanentes, temporales, naturales y artificiales de acuerdo a:

**a. Origen.**

Naturales: Son aquellos creados por la humedad de deshielos, manantiales naturales de aguas sub superficiales o aguas subterráneas y precipitaciones pluviales.

Artificiales o Antrópicos: Creados por el hombre, de acuerdo a su conveniencia de necesidad.

**b. Altitud.**

Altiplánicos: Están ubicados por debajo de los 4.100 m.s.n.m.

Altoandinos: Están ubicados por encima de los 4.100 m.s.n.m.

**c. Régimen Hídrico.**

Hidromórficos o údicos: Tienen presencia de agua permanente.

Mesicos o ústicos: Tienen presencia de agua temporal.

**d. pH de los Suelos.**

Ácidos: pH menor a 6.4.

Neutros: pH de 6.4 a 7.4.

Básicos: pH mayor a 7.4.

**e. Tamaño.**

Pequeños: Uso familiar.

Grandes: Uso comunal.

**f. Fisiografía.**

De Cordillera o altura.

De Llanura, pampa y aluviales.

## 2.3. NECESIDADES DE AGUA EN CULTIVOS

### 2.3.1 Evaporación

*Sánchez, F, (2005)*. Lo define como fenómeno físico en el que el agua pasa de líquido a vapor. Se produce evaporación desde:

- a) La superficie del suelo y la vegetación inmediatamente después de la precipitación.
- b) Desde las superficies de agua (ríos, lagos, embalses).
- c) Desde el suelo, agua infiltrada que se evapora desde la parte más superficial del suelo. Puede tratarse de agua recién infiltrada o, en áreas de descarga, de agua que se acerca de nuevo a la superficie después de un largo recorrido en el subsuelo.

*Mejía, A. (2001)*. Define a la evaporación como proceso por el cual se transfiere agua del suelo y de las masas líquidas para la atmósfera. Esa transferencia natural se interpreta fácilmente por la teoría cinética de la materia. En los sólidos y líquidos predominan las fuerzas de atracción entre las moléculas del cuerpo; en los sólidos, cada partícula tiene oscilaciones en torno a una posición media casi permanente; en los líquidos, la energía cinética media de las partículas es mayor que en los sólidos, sin haber escape de ellas para fuera de ellas. En los gases, con el aumento de energía cinética, las partículas se liberan y fluyen libremente.

El cambio de estado sólido o líquido para el gaseoso requiere, por lo tanto, un consumo de energía llamada calor de vaporización; en el fenómeno inverso, ocurre liberación de energía.

*Monsalve, G. (1995)*. Manifiesta que la evaporación como un proceso por la cual el agua líquida pasa al estado de vapor en condiciones naturales. Que simultáneamente con el escape de partículas de agua hacia la atmósfera se dé en fenómeno inverso partículas de agua en la fase gaseosa que existen en la atmósfera chocan con la superficie de separación entre estado líquido y gaseoso y son capturados por el cuerpo de agua evaporante.

La evaporación se mantiene hasta alcanzar un estado de equilibrio que corresponde a la saturación del aire en vapor de agua; el número de partículas que escapan del cuerpo evaporante es igual al número de partículas de agua en la fase gaseosa que son capturados por el cuerpo en el mismo intervalo de tiempo.

*Serruto, R. (1987).* Afirma que la evaporación es un fenómeno físico, mediante el cual, el agua pasa a la atmósfera en estado de vapor. Además la evaporación de una superficie húmeda utiliza la energía proporcionada por la radiación solar que llega a la superficie exterior de la atmósfera terrestre a razón de  $2\text{cal./cm}^2/\text{min}$ . Medido perpendicularmente a la luz.

### **Factores que afectan la evaporación.**

Como la evaporación es un intercambio de agua entre dos cuerpos, una fuente (superficie evaporante) y un receptor (atmósfera), la tasa de evaporación, esto es, la rapidez con que el fenómeno se procesa, depende de las características de esos medios. Entre los factores relativos a la atmósfera pueden ser mencionados la humedad del aire, la temperatura, el viento, y entre los relativos a la superficie evaporante, el tipo de suelo y la radiación solar, esta última haciendo sentir su efecto a través del calentamiento de la superficie.

**a) Temperatura y humedad del aire.-** La temperatura y la humedad del aire acondicionan la presión de vapor del mismo, actuando como factores ligados a la gradiente de vapor entre la superficie y el aire vecino.

La elevación de la temperatura aumenta el valor de la presión de saturación del vapor de agua, permitiendo que mayores cantidades de vapor de agua puedan estar presentes en el mismo volumen de aire, para el estado de saturación.

**b) Viento.-** El viento actúa mecánicamente en el fenómeno, renovando el aire en contacto con las masas de agua o con la vegetación, alejando del lugar las masas de aire que ya tienen un grado de humedad elevado. En la capa en contacto con la superficie el movimiento del vapor es por difusión molecular mientras que por encima de esa capa límite superficial, el responsable es el movimiento turbulento del aire (difusión turbulenta).

- c) **Tipo de suelo.-** En suelos arenosos saturados, la evaporación puede ser igual a la evaporación de superficies libres de agua; en suelos arcillosos puede reducirse al 75% de ese valor. La capacidad del suelo para transferir agua de la napa freática hasta la superficie, vía capilaridad controlará la tasa real de evaporación. La existencia de vegetación en la superficie reduce la evaporación, pero en compensación introduce la transpiración.
- d) **Radiación solar.-** Este factor es el único responsable de la evaporación bajo todas sus formas. Su estudio es muy reciente y desafortunado las formulas que la hacen invertir son de aplicación muy limitada por falta de datos de radiación.
- e) **Presión atmosférica.-** Su influencia es muy discutida pero se conviene que es muy débil.
- f) **Salinidad de agua.-** La presencia de las sales en el agua hace disminuir la evaporación en cierta medida. Se admite que un aumento del 1% en la concentración de sal en el agua hace disminuir su evaporación, en el 1%. Por ejemplo, el monto de evaporación del agua de mar es de 2-3% menor que el agua dulce.

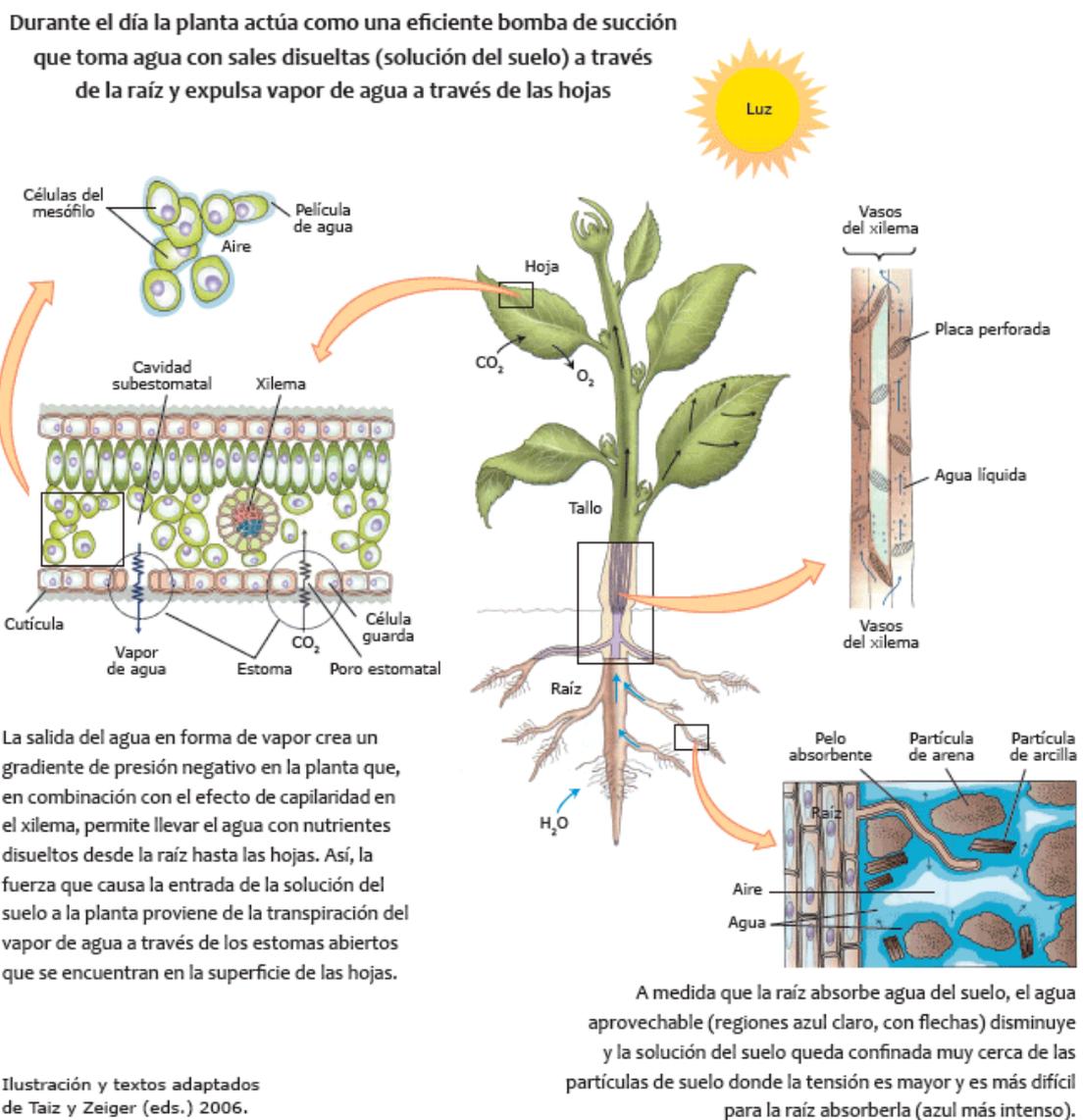
### 2.3.2 Transpiración

*Allen et al, (2006)*, La transpiración es la vaporización del agua líquida contenida en los tejidos de la planta y su posterior remoción hacia la atmósfera. Los cultivos pierden agua predominantemente a través de las estomas. (Figura 1). El agua, junto con algunos nutrientes, es absorbida por las raíces y transportada a través de la planta. La vaporización ocurre dentro de la hoja, en los espacios intercelulares, y el intercambio del vapor con la atmósfera es controlado por la abertura estomática. Casi toda el agua absorbida del suelo se pierde por transpiración y solamente una pequeña fracción se convierte en parte de los tejidos vegetales. Este proceso constituye una fase importante del ciclo hidrológico debido a que es el mecanismo principal por medio del cual el agua precipitada sobre la superficie de la tierra regresa a la atmósfera.

La transpiración, igual que la evaporación directa, depende del aporte de energía, del gradiente de presión del vapor y de la velocidad del viento. Por lo tanto, la radiación, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y el viento también deben ser considerados en su determinación. El contenido de agua del suelo y la capacidad del

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

Figura 01. Movimiento del agua desde el suelo, las hojas y la transpiración.



*Sánchez, F. (2005)*. Define como un fenómeno biológico por el que las plantas pierden agua a la atmósfera en forma de vapor. Toman agua del suelo a través de sus raíces, toman una pequeña parte para su crecimiento y el resto lo transpiran como resultado de las acciones físicas y fisiológicas de las plantas a través de los estomas (*Monsalve, G. (1995)*).

*Castellvi, F. (1996)*. Menciona que está relacionado con la cantidad de materia seca la cantidad de agua consumida siendo la relación entre la biomasa y agua transpirada aproximadamente tipo lineal dependiendo de la especie y del déficit de presión de vapor de esta manera se estima la cantidad de biomasa producida.

La resistencia estomática tiene diferentes mecanismos de regulación de la pérdida de agua entre el agua del suelo, el agua en el interior de la planta y el agua en forma de vapor presente en la atmósfera.

La resistencia aerodinámica depende de variables meteorológicas como la velocidad de viento y las características de la superficie evaporada (la tasa de pérdida de agua desde un cultivo no puede ser superior a la tasa de absorción de agua desde el suelo) por alargamiento de las células.

*Fuentes, J. (1998)*. Menciona que las plantas por la raíz toma la sustancias orgánicas elaborada y transformándose en savia elaborada, el agua sobrante de la savia bruta sale al exterior en forma de vapor de agua, este proceso climatológico de agua sobrante en forma de vapor recibe el nombre de transpiración y se produce a través de unos orificios, llamados estomas situados en las hojas.

### **Factores que influyen en la transpiración**

- La intensidad de luz.- el proceso de la fotosíntesis con la energía solar mayor luz mayor fotosíntesis.
- El calor y el viento.- favorecen a la evaporación la salida de agua de las plantas en forma de vapor.
- El grado de humedad del aire.- con atmósfera aumenta la transpiración por que se favorece la evaporación de agua.

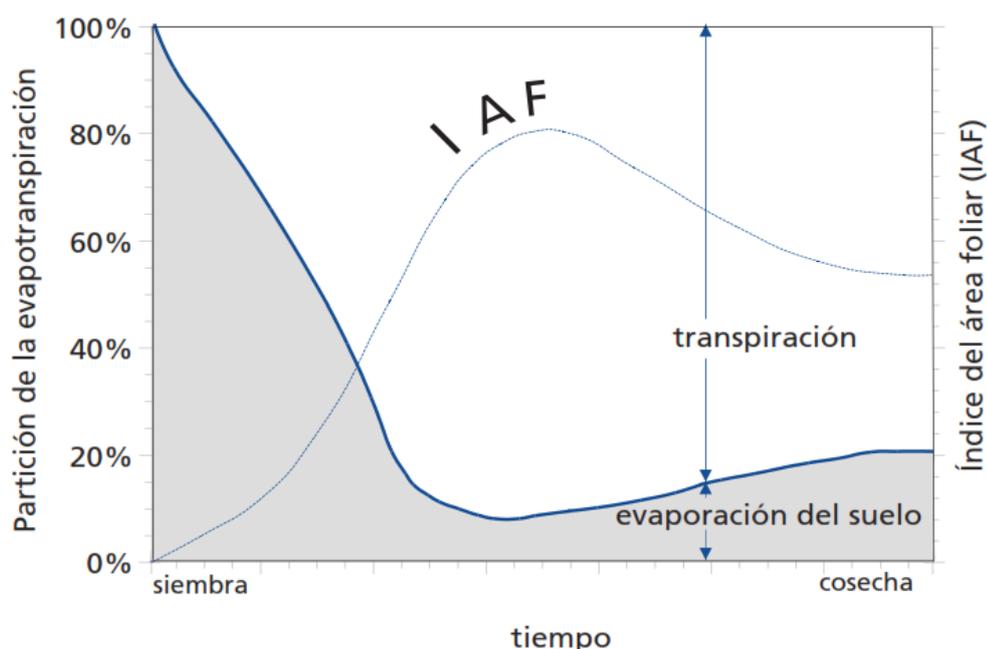
- La cantidad de agua contenida en la planta.- esto se presenta cuando la planta sufre escasez de agua.

### 2.3.3 Evapotranspiración

*Allen et al, (2006)*. Define a la evapotranspiración (ET) como la pérdida de agua que ocurre en una superficie como consecuencia de la combinación de los procesos de evaporación de una superficie evaporante (lagos, ríos, mares, suelo y vegetación mojada) y la transpiración de la planta. La ET es un componente del balance de agua, (*Droogers, 2000*) y un parámetro importante en la definición de las necesidades hídricas de los cultivos y por consiguiente en la programación de riego de los cultivos.

*Cadena, (2012)* y *Allen et al, (2006)*. Es un proceso de producción, las pérdidas de agua por evaporación del suelo son mayores al momento del establecimiento del cultivo (siembra), conforme el cultivo va desarrollando estas pérdidas va decreciendo y la transpiración de las plantas va aumentando. Estos dos procesos sumados se denominan “evapotranspiración”.

Figura 02. Repartición de la evapotranspiración en evaporación y transpiración durante el periodo de crecimiento de un cultivo anual.



En la Figura 02 se presenta la evapotranspiración dividida en sus dos componentes (evaporación y transpiración) en relación con el área foliar por unidad de superficie de suelo debajo de él. En el momento de la siembra, casi el 100% de la ET ocurre en forma de evaporación, mientras que cuando la cobertura vegetal es completa, más del 90% de la ET ocurre como transpiración.

*Fuentes, J. (1998).* Define que es la cantidad de agua que necesita la planta, el consumo de agua por evaporación y por transpiración se puede considerar como el consumo total; agua incorporada a la planta (agua de constitución).

*Benites, C. (1999).* Define como todo cambio de fase líquida a vapor desde la superficie de un suelo en un campo de cultivo, se realiza a través de la superficie libre del suelo (evaporación) y de las hojas de las plantas (transpiración). El concepto de evapotranspiración es usado para englobar ambos términos. El agua depositada por el rocío, la lluvia o lluvia artificial y que se evapora sin ser utilizada por la planta, forma parte del agua evapotranspirada.

*Sánchez, C. (2005).* Menciona que como un fenómeno físico en el que el agua pasa de líquido a vapor (habría que añadir la sublimación – sólida a vapor – desde la nieve o hielo) que se produce la evaporación desde:

- a) la superficie del suelo y la vegetación inmediatamente después de la precipitación.
- b) desde la superficie de agua (ríos lagos embalses).
- c) Desde el suelo, agua infiltrada que se evapora desde la parte más superficial del suelo.

*Blair, E. (1965).* Manifiesta que la evapotranspiración involucra los fenómenos de evaporación y transpiración de manera conjunta, ha sido introducido a la dificultad que existe para separar con precisión los dos valores y por la conveniencia de usar este concepto que represente el consumo de agua en una plantación dada.

*Castellvi, F. (1996).* Define como la vaporización de un líquido en la superficie que la separa de la fase gaseosa, con la cual está en contacto. La transpiración es un proceso que consiste en la eliminación por evaporación de una parte del agua

absorbida por las plantas (ET) que combina los dos procesos discretos y que se refiere a la pérdida de agua desde una superficie con cubierta vegetal, ya que en la realidad es un proceso de cambio de fase de agua, la evaporación es predominante en la cavidad sub estomática. Mientras que la transpiración indica un flujo de vapor desde el inferior de la cavidad al exterior.

$$ET = E_s + T \dots\dots\dots 1$$

Donde:

ET : Evapotranspiración.

$E_s$  : Evaporación de agua absorbida por las plantas.

T : Evaporación de agua absorbida por las plantas, las unidades se expresan en mm ó  $m^3/ha$ , (1mm equivalente a  $10m^3/ha$ ).

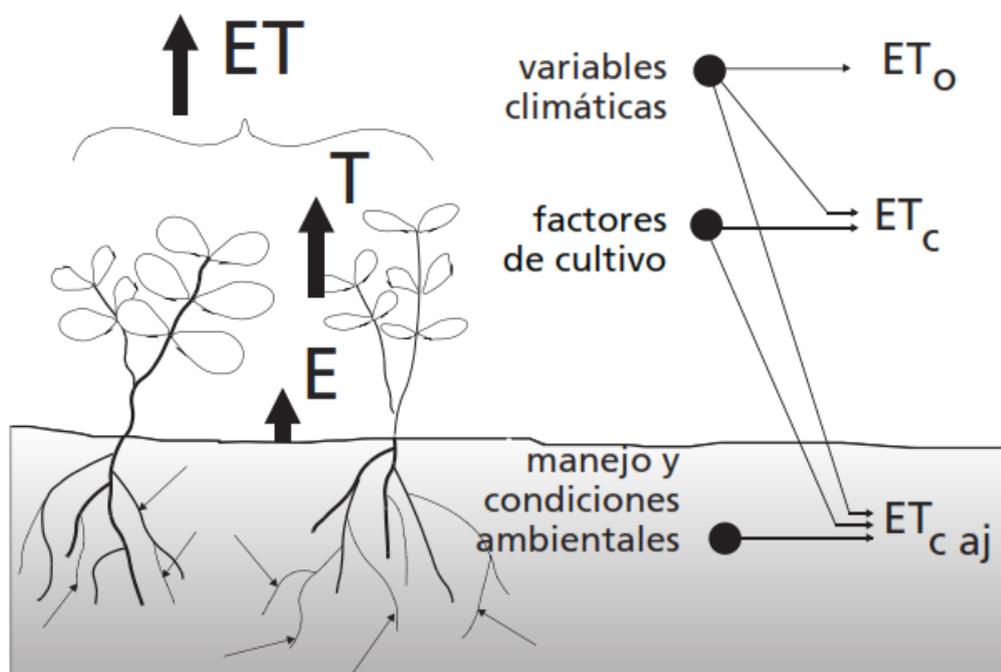
#### **Unidades de medida de evapotranspiración:**

*Allen et al, (2006)*. La evapotranspiración se expresa normalmente en milímetros (mm) por unidad de tiempo. Esta unidad expresa la cantidad de agua perdida de una superficie cultivada en unidades de altura de agua. La unidad de tiempo puede ser una hora, día, 10 días, mes o incluso un completo período de cultivo o un año.

#### **Factores que afectan a la evapotranspiración**

*Allen et al, (2006)*. El clima, las características del cultivo, el manejo y el medio de desarrollo son factores que afectan a la evaporación y la transpiración. La evaporación depende del poder evaporante de la atmósfera. Los conceptos relacionados a la ET y presentados en la Figura 3 se describen en la sección sobre conceptos de evapotranspiración.

Figura 03. Factores que afectan la evapotranspiración con referencia a conceptos relacionados de ET.



Cuadro 01. Factores que inciden en la evaporación y transpiración.

Parámetros que inciden en la evaporación y transpiración	Evaporación dependen desde		Transpiración dependen
	la lámina de agua libre	el suelo desnudo	
Poder evaporante de la atmósfera.	X	X	X
Salinidad del agua (inversamente).	X		
Temperatura del agua.	X		
Tipo de suelo (textura, estructura).		X	
Grado de humedad del suelo.		X	X
Tipo de planta.			X
Variaciones estacionales: cultivo, desarrollo de las plantas, zonas de bosque de hoja caduca, caída de la hoja paraliza la transpiración.			X
Variaciones interanuales: En áreas de bosque la ET aumenta con el desarrollo de los árboles.			X

### a) Variables climáticas

Los principales parámetros climáticos que afectan la evapotranspiración son la radiación, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y la velocidad del viento. Se han desarrollado varios procedimientos para determinar la evaporación a partir de estos parámetros. La fuerza evaporativa de la atmósfera puede ser expresada por la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET<sub>o</sub>). La evapotranspiración del cultivo de referencia (ET<sub>o</sub>) representa la pérdida de agua de una superficie cultivada estándar.

*Sánchez, (2005).* Los principales parámetros climáticos que afectan la evapotranspiración son:

- Radiación solar.
- Temperatura del aire (en relación estrecha con la anterior, pero más sencilla de medir).
- Humedad atmosférica. Menos humedad => más evaporación.
- Presión atmosférica (y la altitud en relación con ella): A menor presión (y/o mayor altitud) => mas evaporación.
- Velocidad del viento. mas viento => más evaporación.

Se han desarrollado varios procedimientos para determinar la evaporación a partir de estos parámetros. La fuerza evaporativa de la atmósfera puede ser expresada por la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET<sub>o</sub>). La evapotranspiración del cultivo de referencia (ET<sub>o</sub>) representa la pérdida de agua de una superficie cultivada estándar.

### b) Factores de cultivo

El tipo de cultivo, la variedad y la etapa de desarrollo deben ser considerados cuando se evalúa la evapotranspiración de cultivos que se desarrollan en áreas grandes y bien manejadas. Las diferencias en resistencia a la transpiración, la altura del cultivo, la rugosidad del cultivo, el reflejo, la cobertura del suelo y las características radiculares del cultivo dan lugar a diferentes niveles de ET en diversos tipos de cultivos aunque se encuentren bajo condiciones ambientales idénticas. La evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET<sub>c</sub>) se refiere a la demanda evaporativa de la atmósfera sobre cultivos que crecen en áreas grandes bajo condiciones óptimas de agua en el

suelo, con características adecuadas tanto de manejo como ambientales, y que alcanzan la producción potencial bajo las condiciones climáticas dadas.

### c) Manejo y condiciones ambientales

Los factores tales como salinidad o baja fertilidad del suelo, uso limitado de fertilizantes, presencia de horizontes duros o impenetrables en el suelo, ausencia de control de enfermedades y de parásitos y el mal manejo del suelo pueden limitar el desarrollo del cultivo y reducir la evapotranspiración. Otros factores que se deben considerar al evaluar la ET son la cubierta del suelo, la densidad del cultivo y el contenido de agua del suelo. El efecto del contenido en agua en el suelo sobre la ET está determinado primeramente por la magnitud del déficit hídrico y por el tipo de suelo. Por otra parte, demasiada agua en el suelo dará lugar a la saturación de este lo cual puede dañar el sistema radicular de la planta y reducir su capacidad de extraer agua del suelo por la inhibición de la respiración.

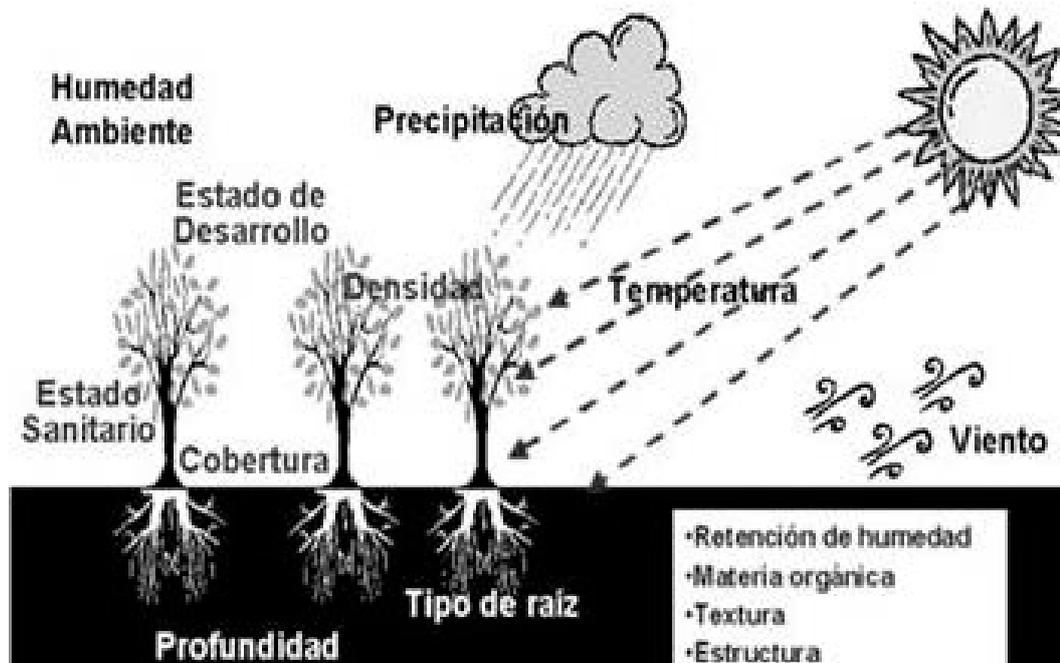
### Factores meteorológicos que determinan la evapotranspiración

*Doorembos, J. y W.O. Pruitt (1976)*. Los factores meteorológicos que determinan la evapotranspiración son los componentes del tiempo que proporcionan energía para la vaporización y extraen vapor de agua de una superficie evaporante. Los principales parámetros meteorológicos que inciden en la modificación del poder evaporante de la atmósfera y se deben considerar se presentan a continuación.

a) **Radiación solar.** El proceso de la evapotranspiración está determinado por la cantidad de energía disponible para evaporar el agua. La radiación solar es la más importante fuente de energía en el planeta y puede cambiar grandes cantidades de agua líquida en vapor de agua. La cantidad potencial de radiación que puede llegar a una superficie evaporante viene determinada por su localización y época del año. Debido a las diferencias en la posición del planeta y a su movimiento alrededor del sol, esta cantidad potencial de radiación es diferente para cada latitud y para las diversas estaciones del año. La radiación solar real que alcanza la superficie evaporante depende de la turbidez de la atmósfera y de la presencia de nubes que reflejan y absorben cantidades importantes de radiación. Cuando se determina el

efecto de la radiación solar en la evapotranspiración, se debe también considerar que no toda la energía disponible se utiliza para evaporar el agua. Parte de la energía solar se utiliza también para calentar la atmósfera y el suelo.

Figura 04. Factores meteorológicos que determinan la evapotranspiración.



- b) **Temperatura del aire.** La radiación solar absorbida por la atmósfera y el calor emitido por la tierra elevan la temperatura del aire. El calor sensible del aire circundante transfiere energía al cultivo y entonces ejerce un cierto control en la tasa de evapotranspiración. En un día soleado y cálido, la pérdida de agua por evapotranspiración será mayor que en un día nublado y fresco. La temperatura está ligada a otros factores meteorológicos de la evaporación como la insolación o la sequedad del aire, se concibe que ciertos autores hayan logrado poner en evidencia una relación bastante definida entre la temperatura media y las evaporaciones correspondientes. La presión de saturación crece con la temperatura. La tasa de evaporación es pues, para un mismo déficit de saturación una función creciente de la temperatura de la superficie evaporante.
- c) **Humedad del aire.** Mientras que el aporte de energía del sol y del aire circundante es la fuerza impulsora principal para la evaporación del agua, la

diferencia entre la presión de vapor de agua en la superficie evapotranspirante y el aire circundante es el factor determinante para la remoción de vapor. Áreas bien regadas en regiones áridas secas y calientes, consumen grandes cantidades de agua debido a la gran disponibilidad de energía y al poder de extracción de vapor de la atmósfera. En cambio en regiones húmedas tropicales, a pesar de que el ingreso de energía es elevado, la alta humedad del aire reducirá la demanda de evapotranspiración. En este último caso, como el aire está ya cerca de saturación, puede absorber menos agua adicional y por lo tanto la tasa de evapotranspiración es más baja que en regiones áridas.

- d) Velocidad del viento.** El viento asegura el reemplazo del aire, más o menos saturado, al contacto con la superficie evaporante por nuevas capas que tienen una temperatura y una humedad generalmente más bajas. Favorece pues la evaporación, tanto más cuanto que su velocidad y su turbulencia son grandes; sin embargo, si estos parámetros alcanzan un valor límite por encima del cual el vapor de agua es dispersado a medida que se forma, todo crecimiento de dichos parámetros mas allá de ese límite no tendrá efecto. Numerosas fórmulas de ETo hacen intervenir la velocidad del viento en un término correctivo a menudo importante; es necesario anotar que esta velocidad varía con la altura por encima del suelo. Ante la imposibilidad de medir esta velocidad en la superficie de contacto misma se eligen alturas representativas que varían entre 0.50 y 10 m.
- e) Humedad del suelo.** Influye directamente en la velocidad de la transpiración. Esta puede ser limitada por la lentitud del movimiento del agua, en particular en un suelo poco húmedo; por otra parte, si la tasa de humedad del suelo desciende por debajo de cierto valor llamado “coeficiente” de marchite, las raíces no son ya capaces de extraer el agua subsistente todavía en el terreno y la transpiración cesa, la planta se marchita y muere.

Cuadro 02. Parámetros meteorológicos y atmosféricos que determinan la evapotranspiración del cultivo de referencia.

Parámetros meteorológicos	Radiación solar	Radiación extraterrestre Radiación solar o de onda corta Radiación neta de onda larga Radiación neta Flujo del calor del suelo
	Temperatura del aire	Temperatura máxima Temperatura mínima
	Humedad del aire	Presión de vapor Temperatura de punto de rocío Humedad relativa
	Velocidad del viento	
Parámetros atmosféricos	Presión atmosférica	
	Calor latente de vaporización	
	Constante psicométrica	

Fuente: Evapotranspiración del cultivo, manual riego y drenaje 56 – FAO.

### 2.3.4 Evapotranspiración del cultivo de referencia (ETo)

Allen et al, (2006). La tasa de evapotranspiración de una superficie de referencia, que ocurre sin restricciones de agua, se conoce como evapotranspiración del cultivo de referencia. Estos datos son necesarios con antelación al planeamiento de proyectos o para programar calendarios de riego.

Los expertos de la FAO, para el cálculo de los requerimientos de agua de los cultivos presentó la siguiente definición para la superficie de referencia: “Un cultivo hipotético de referencia con una altura asumida de 0.12 m, una resistencia superficial fija de 70m/s y un albedo de 0.23”.

La superficie de referencia se asemeja a una superficie extensa de pasto verde de altura uniforme, creciendo activamente, sombreando totalmente la tierra y con un adecuado aporte de agua.

*Fuentes, J. (1998).* Define a la evapotranspiración de referencia que es la cantidad de agua consumida, durante un determinado periodo de tiempo, en un suelo cubierto de una vegetación homogénea, densa en plena actividad vegetativa y con un buen suministro de agua de precipitaciones o por la aplicación de riego.

*Benites, C. (1999).* Es transmisión de agua a la atmósfera (que se toma como referencia), producida cuando el suelo está cubierto con un cultivo que abarque totalmente el área, con agua disponible en condiciones óptimas, bajo condiciones meteorológicas existentes. Generalmente se toma una pradera no alta (pasto) como cultivo estándar.

*Mejía, A. (2001).* Define como la pérdida del agua por evapotranspiración en un terreno extenso con vegetación verde, baja, en pleno desarrollo, cubriendo totalmente el suelo, de altura uniforme y sin sufrir deficiencia de humedad, (humedad del suelo cercano a la capacidad de campo).

*Monsalve, G. (1995).* Menciona como la pérdida de agua observada en una superficie líquida o sólida saturada, por evaporación y por transpiración de las plantas, que ocurriría en el caso que hubiera un adecuado abastecimiento de humedad de agua al suelo en todo momento. En donde la tasa de evaporación se mide por unidad de área.

### 2.3.5 Métodos para estimar la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>)

De acuerdo a Villaman et al. (2001) y Chávarri, (2005), son varios los métodos para estimar la ET<sub>o</sub>, por lo cual se han clasificado en:

- **Directos:** Proporcionan información del total de agua requerida por los cultivos, utilizando para ello instrumentos para su determinación y sirven para ajustar los parámetros de los métodos empíricos. Entre éstos pueden señalarse: el método gravimétrico, lisimétrico y evapotranspirómetro de Thornthwaite.
- **Indirectos:** Proporcionan una estimación del requerimiento de agua, a través de todo el ciclo vegetativo mediante la utilización de fórmulas empíricas; las cuales se han clasificado en climatológicos y micrometeorológicos.

*Benites, (1999)*. Los intentos de medida de la evapotranspiración de referencia han desarrollado diferentes metodologías, algunas de ellas han tratado de evaluar los flujos controlables y deducir los de difícil determinación, y otros han utilizado elementos meteorológicos medidos para encontrar una correlación con la evaporación o evapotranspiración. Es por ello que se puede agrupar los métodos en directos, basados en criterios de balance de agua, y en indirectos, como los que tienen en cuenta el balance de energía o utilizan la información proporcionada por estaciones meteorológicas.

Cuadro 03. Métodos para estimar la evapotranspiración de referencia.

Métodos directos	Método indirecto
- Método de lisímetro.	- Método de Penman – Monteith.
- Método gravimétrico.	- Método de Blaney y Criddle.
- Medida del tanque de evaporación.	- Método de Hargreaves, Serruto.
	- Método de Blaney Criddle y otros.

#### a. Métodos directos:

##### a.1. Lisímetros.

*Santa Olalla, Juan (1993)*. Mencionan que el término “Lisímetro” tiene sus raíces etimológicas de dos vocablos griegos: “lysis” y “metron” que significan respectivamente disolver y medir. También indica que por la versatilidad de los Lisímetros, no existe una definición que tenga validez universal y abarque todas las formas posibles de su utilización.

Los evapotranspirómetros son aquellos recipientes de suelo y vegetación por medio de las cuales el agua perdida en el sistema se mide mediante un simple balance de entradas y salidas o por diferencia de peso.

*Luque, J. (1981)*. Señala que los Lisímetros consisten esencialmente en unos tanques calibrados algunos de gran capacidad, dentro de las cuales se introduce la muestra de suelo, sobre la cual se desarrolla la cubierta vegetal tipo, como ya se considero, son instrumentos propios de las estaciones y centros de investigación y experimentación

hídrica, edafológica y agrícola. El objetivo de estos aparatos es efectuar el balance de “entradas y salidas de humedad” para luego determinar la fracción correspondiente a la evapotranspiración.

En el caso de incorporación de agua al sistema mediante el ascenso capilar por aporte de tipo freático, existen aparatos como el “evapotranspirómetro” de Thornthwaite que trabaja a nivel constante con un manto freático artificial situado generalmente a 0,50m. De la superficie del suelo provisto de una red de tubos. Resulta muy importante tener en cuenta, para que los datos logrados se aproximen a situaciones reales.

*Castellvi, F. (1996).* Menciona que para medir la evapotranspiración real con precisión, se utiliza los Lisímetros que son bloques de suelo aislado donde se controla su nivel de humedad, que se ha utilizado como método de referencia a la hora de calibrar de agua que se aplica por riego.

*García, V. (1992).* Manifiesta que son dispositivos formados por un tanque con área de 4,00m<sup>2</sup> pudiendo de ser hasta 10m<sup>2</sup>, su profundidad depende del cultivo, mas lo ideal es de 1.20m. Sobre todo para los cultivos anuales; Al llenarse el recipiente se inicia con una capa de cascajo, arena fina, luego es colocada al suelo obedeciendo las capas del perfil del mismo, en el tanque así constituido nos permite conocer la evapotranspiración real, la cual en el caso que no exista restricción de humedad constituye la evapotranspiración máxima (ETmax).

*Kijne, J. (1972).* Menciona que el uso efectivo de Lisímetros se limita a situaciones en que la comunidad vegetal en estudio puede simularse dentro del Lisímetro, sin que exista por ejemplo, cualquier restricción del desarrollo radicular de la planta solamente se obtiene una medida fiable de los componentes del balance de agua si el perfil del potencial de agua en el Lisímetro es el mismo que en la parcela circundante.

*Fuentes, J. (1998).* Menciona que son unos recipientes de gran tamaño llenos de tierra en donde se siembra las plantas objeto de estudio y se cultiva de la forma más precisa posible o como se efectúa el cultivo en el campo que se colocan a la intemperie en la que pueda recogerse el agua que escurra. Periódicamente se pesan los Lisímetros; lo

que permite conocer el agua perdida por evapotranspiración durante el periodo que se considera.

*Pacheco, J. y Alonso, N. (1995).* Indica que los tanques o Lisímetros son equipos que se usan para la determinación de la evaporación de un suelo desnudo o la evapotranspiración de un determinado cultivo, que este diseño de impermeabilidad se debe colocar los horizontes de suelo en la misma disposición natural del suelo, esto permite un adecuado crecimiento radicular con previa, estos se clasifican en:

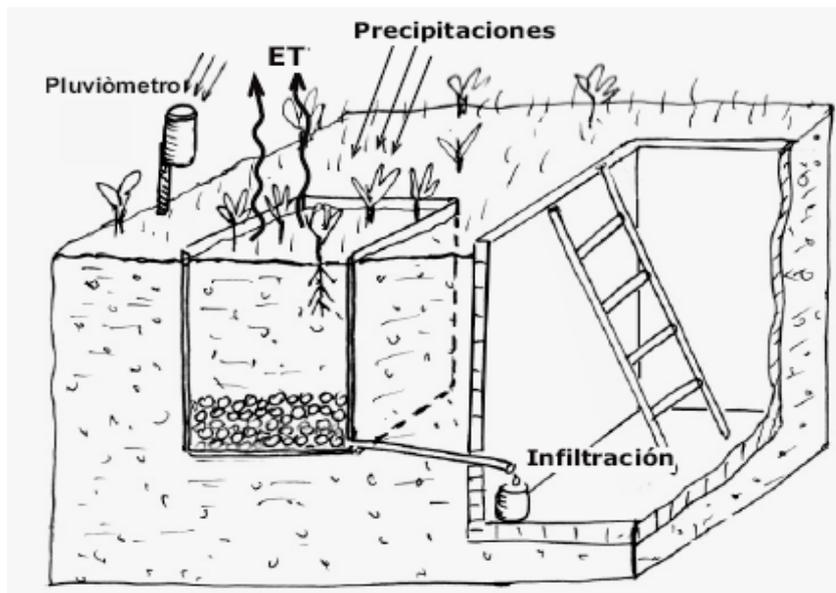
- a) Lisímetros de drenaje.- en ellos se miden diariamente el agua agregada y la drenada y por diferencia, la evapotranspiración.
- b) Lisímetros de pesada.- diariamente se pesa el conjunto de suelos, plantas y agua junto con el tanque, y por diferencia de pesada con el día anterior.
- c) Lisímetros de compensación.- automáticamente por un sistema de vasos comunicantes se compensa el agua que gasta en el tanque, manteniéndose constante una lamina de agua que a determinada profundidad, según el suelo y cultivo abastece por capilaridad a las plantas

*Villapando, F. (1993).* Define el Lisímetro como un volumen de suelo con o sin vegetación encerrado en un recipiente adecuado y bajo las mismas condiciones de la parcela donde se ubica y que permite la determinación de uno de los componentes del balance hídrico de un cultivo cuando los otros términos son conocidos

*Benites, C. (1999).* Se basa en el balance de agua para la determinación de la evapotranspiración. Si el cultivo evaluado es un pasto corto con agua en el suelo a capacidad de campo, lo que se determina es la evapotranspiración de referencia; si es otro cultivo a condiciones de riego normales determina la evapotranspiración real.

*Stanley, B. (1983).* Método directo de evaluación del uso de agua por un cultivo consiste en aislar una porción del cultivo de su medio ambiente y medir la entrada y salida de agua en esa muestra.

Figura 05. Lisímetro de drenaje para determinar la evapotranspiración (Stanley, 1983).



Los lisímetros son los dispositivos que se utilizan para contener los cultivos y se construyen en tres formas:

- El Lisímetro no pesador; en el que, suponiendo que la capacidad de almacenamiento de la humedad del suelo permanezca constante, el uso de agua por el cultivo es la diferencia entre el agua aplicada y la de drenaje.
- El Lisímetro "pesador"; en el que el uso del agua por el cultivo se determina por la pérdida de peso entre las aplicaciones de agua.
- El Lisímetro de tabla freática; donde se mide el uso de agua por el cultivo a partir de la cantidad de agua que se requiere para mantener la tabla freática a una profundidad constante, bajo la superficie del suelo.

Para obtener resultados precisos en Lisimetría, las plantas que crecen en el recipiente deben ser idénticas en todos los aspectos al cultivo que se estudia y, además, deben someterse a las mismas condiciones fisiológicas.

Las condiciones de humedad del suelo para la muestra y el cultivo principal deben de ser similares y, por ende, las cantidades y los momentos de aplicación del agua deben de ser los mismos. Otras prácticas de administración que se deben duplicar incluyen momentos similares de siembra, un suministro igual de fertilizantes y la lixiviación de

cualquier acumulación de sales. Observación práctica; es necesario asegurarse de que el agua aplicada al lisímetro se desplaza a través de la tierra y no entre el suelo y las paredes.

## a.2. Método de tanque evaporímetro.

*Allen et al, (2006)*. La tasa evaporativa de los tanques de evaporación llenos de agua puede ser fácilmente obtenida. En ausencia de lluvia, la cantidad de agua evaporada durante un período (mm/día) corresponde a la disminución de la altura de agua en el tanque en ese período. Los tanques proporcionan una medida del efecto integrado de la radiación, viento, temperatura y humedad sobre el proceso evaporativo de una superficie abierta de agua. Aunque el tanque evaporímetro responde de una manera similar a los mismos factores climáticos que afectan la transpiración del cultivo, varios factores producen diferencias significativas en la pérdida de agua de una superficie libre evaporante y de una superficie cultivada. La reflexión de la radiación solar del agua en el tanque puede ser diferente del 23% asumido para el cultivo de referencia.

La evaporación del tanque está relacionada con la evapotranspiración de referencia por un coeficiente empírico derivado del mismo tanque:

$$E_{To} = K_p * E_{pan} \dots \dots \dots 2$$

Donde:

$E_{To}$  : Evapotranspiración de referencia (mm/día).

$K_p$  : Coeficiente empírico del tanque evaporímetro.

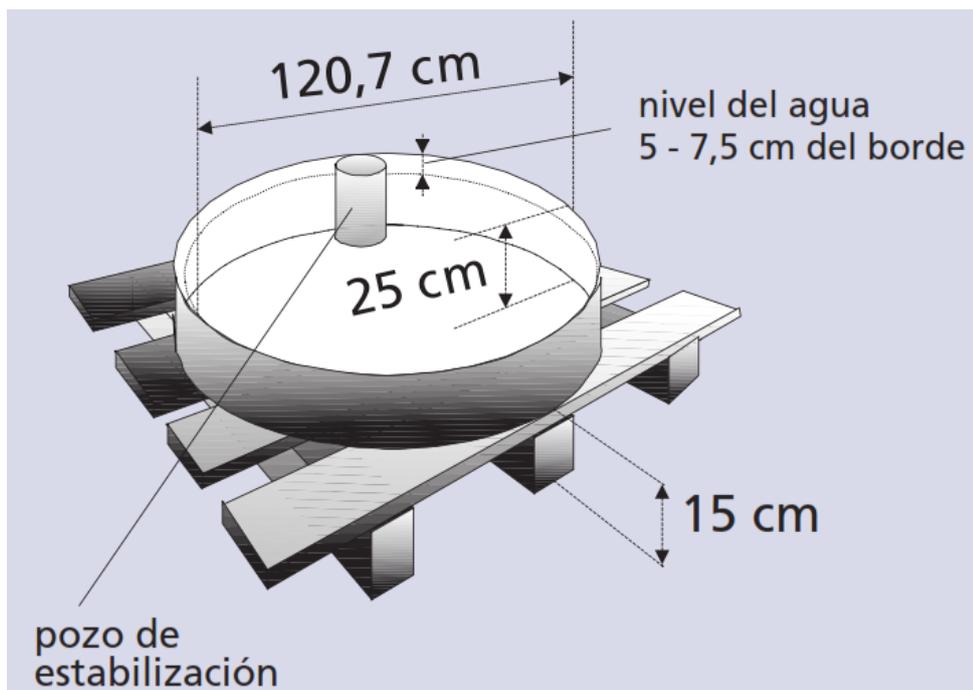
$E_{pan}$  : evaporación del tanque evaporímetro (mm/día).

### Descripción de la características del tanque Clase A

El tanque Clase A es circular, 120,7 cm de diámetro y 25 cm de profundidad. Está construido de hierro galvanizado o de láminas de metal (0,8 mm). El tanque se sitúa sobre una plataforma de madera en forma de reja que se encuentra a 15 cm por encima del nivel del suelo. El tanque debe estar a nivel. Una vez instalado, el tanque se llena con agua hasta 5 cm por debajo del borde y el nivel del agua no debe

disminuir hasta más de 7,5 cm por debajo del borde. El agua debe ser regularmente cambiada, al menos semanalmente, para eliminar la turbidez. Si el tanque es galvanizado, debe ser pintado anualmente con pintura de aluminio. Las mallas sobre los tanques deben evitarse. Los tanques deben ser protegidos con mallas de seguridad para evitar el acceso de los animales.

Figura 06. Tanque Clase A (Manual Riego y Drenaje 56 FAO).



El lugar de instalación debe estar cubierto preferentemente con pasto, en un área de 20 por 20 m, abierto a todos lados para permitir la circulación del aire. Es preferible que la estación se encuentre situada en el centro o dentro de grandes campos cultivados.

Las lecturas del tanque se realizan diariamente temprano en la mañana a la misma hora que se mide la precipitación. Las mediciones se realizan dentro de un área estable situada cerca del borde del tanque. El área estable la produce comúnmente un cilindro de metal de cerca de 10 cm de diámetro y 20 cm de profundidad con una pequeña abertura en la base para permitir el flujo de agua.

*Chávarri, (2005)*. Este método consiste en encontrar una relación entre la tasa de evapotranspiración producida en un Lisímetro y la tasa de evaporación producida en un tanque de evaporación clase A, en base a la cual se determina un coeficiente empírico con el que se puede efectuar luego las lecturas de evaporación y obtener indirectamente la evapotranspiración de referencia para condiciones ambientales específicas.

El tanque de evaporación clase A permite estimar los efectos integrados del clima (radiación, temperatura, viento y humedad relativa), en función de la evaporación registrada de una superficie de agua libre de dimensiones estándar.

Existe una metodología propuesta por FAO para determinar la evapotranspiración de referencia a partir de registros de evaporación de tanque clase A.

## **b. Métodos indirectos.**

### **b.1. Formulas para determinar la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>).**

*Goyal, (2006)*. Hay diferentes métodos para estimar o medir la evapotranspiración de referencia E<sub>to</sub>. La precisión y confiabilidad varía de unos a otros, muchos solo proveen una aproximación. Cada técnica se ha desarrollado con los datos de clima disponibles para estimar la ET<sub>o</sub>.

Las medidas directas son muy costosas y mayormente se usan para calibrar los métodos que utilizan los datos climatológicos. Las técnicas más frecuentes usadas son: Método hidrológico o de balance de agua, métodos climatológicos y métodos micrometeorológicos.

Muchas de las investigaciones han dado lugar a modificaciones de las ecuaciones ya establecidas. Así encontramos modificaciones en las fórmulas de Blaney-Criddle, Hargreaves, Bandeja de evaporación, etc. Allen [1] trabajo en la evaluación de 13 variaciones de la ecuación de Penman, encontrando como más precisa la fórmula de Penman-Monteith. Actualmente se recomiendan las ecuaciones modificadas por la FAO y el SCS como las más confiables.

Todas las investigaciones coinciden al señalar las ecuaciones de Penman, Bandeja de Evaporación Clase A, Blaney-Criddle y Hargreaves-Samani, como las fórmulas más confiables. En éstas, con una calibración local, se logra bastante precisión.

Cada investigador tiene su fórmula preferida que le ha dado buenos resultados. Así Hargreaves y Samani presentan su fórmula como el método más simple y práctico y llegan a decir que “no existe evidencia de que haya otro método superior”. *Allen y Pruitt* presentan el método de Blaney-Criddle modificado por la FAO como uno en que los cálculos son relativamente fáciles y dicen que obtienen excelentes estimados de la ETo cuando está bien calibrada localmente.

Cada investigador tiene un orden de preferencia que puede ser semejante o diferente a otro, pero todas las fórmulas, dependiendo del lugar en que se evalúen puede resultar en el primer o último lugar.

Cuadro 04. Variables climáticas requeridas para el cálculo de la ETo

Métodos Indirectos	Temperatura del aire (T)	Radiación Solar (Ro)	Número máximo teórico de horas sol (N)	Humedad Relativa (HR)	Velocidad del viento (VV)	Número de horas de sol (n)	Altitud (Z)
Hargreaves	X	x					
Serruto	X	X					
P Monteith	x	x	x	x	x	x	x
P Monteith (T)	x	x	x		x	x	x
P Monteith (T y HR)	x	x	x	x	x	x	x
P Monteith (T y n)	x					x	
Blaney Criddle	x			x			x
Jensen-Haise	x	x	x			x	x

### 2.3.6 Evapotranspiración real del cultivo (ETr)

*Benites, C. (1999)*. Llamada también uso consuntivo, está referida a la cantidad de vapor transferida a la atmósfera, que depende no solo de las condiciones meteorológicas existentes, sino del ciclo vegetativo del cultivo (capacidad para extraer

humedad) y de las disponibilidades de agua reales por efecto de la periodicidad con que se aplica el agua. En otras palabras el consumo en condiciones reales de explotación.

*Monsalve, G. (1995).* Define como la pérdida de agua observada en una superficie líquida o sólida saturada, en las condiciones reinantes atmosféricas y de humedad del suelo, por fenómenos de evaporación y de transpiración de las plantas.

*Gurovich, L. A. (2001).* Menciona que corresponde a una condición edafo-climática específico que permite estimar la evapotranspiración efectiva o real de los cultivos, para ello, es necesario estimar el valor de Kc. o coeficiente de evapotranspiración del cultivo que en esencia corresponde el índice efectivo del área foliar.

*Vásquez, A. (1992).* Es la tasa de evaporación y transpiración de un cultivo exento de enfermedades, que crece en un campo extenso (1 o más hectáreas) en condiciones óptimas de suelo, fertilidad y suministro de agua.

La evapotranspiración real es llamada también como uso consuntivo, su cálculo se efectúa mediante la siguiente relación:

$$ETr = ETo * Kc \dots\dots\dots 3$$

Donde:

ETr : Evapotranspiración del cultivo (mm).

Kc : Coeficiente que tiene en cuenta el efecto de la relación agua-suelo-planta.

ETo : Evapotranspiración de referencia (mm).

## 2.4. COEFICIENTE DE CULTIVO

### 2.4.1 Coeficiente del cultivo (Kc)

Es un coeficiente que tiene en cuenta las características del cultivo y los efectos promedios de la evaporación en el suelo (*Allen et al, 2006*) y se describe las

variaciones de la cantidad de agua que las plantas extraen del suelo a medida que se van desarrollando, desde la siembra hasta la recolección.

*Doorembos y Pruitt (1976) y Gurovich, L. A. (2001)*. Lo definen el coeficiente del cultivo como la relación entre la evapotranspiración de un cultivo específico y la evapotranspiración del cultivo de referencia de un periodo de crecimiento de una etapa "fenológica, cuando dicho cultivo crece y se desarrolla en extensos campos bajo condiciones óptimas.

*Calvache, 2012*. El coeficiente de cultivo es el elemento básico, ya que describe las variaciones de la cantidad de agua que las plantas extraen del suelo a medida que se va desarrollando, desde la siembra hasta su cosecha. Los cultivos se desarrollan no de una manera regular si no una manera dinámica y acorde a las características de su entorno. El  $K_c$  presenta valores pequeños al inicio del desarrollo del cultivo y aumenta a medida que se incrementa la cobertura del suelo. El valor máximo alcanza durante la floración, se mantiene durante la fase media y finalmente decrece durante la maduración.

*Benites, C. (1999)*. Lo define como un factor que indica el grado de desarrollo de un cultivo y está desarrollado con la cobertura del suelo del mismo, que es la que va a influenciar la evapotranspiración.

Los valores de  $K_c$  están relacionados con los diferentes estados de desarrollo del cultivo que van desde la siembra hasta la cosecha. La duración de las etapas dependerá fundamentalmente de la variedad y las condiciones en que se desarrolla el cultivo, especialmente el tipo de clima y riego.

*Castañón, G. (2000)*. La determinación del coeficiente de cultivo, que se puede efectuar experimentalmente, no es fácil, pues depende de numerosos factores característicos del cultivo (época de siembra, desarrollo, etc.) así como de la cantidad de agua en el suelo.

*Serruto, C. R. (1978)*. Define el coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) como el valor que inicialmente tomo en cuenta el efecto de la relación agua-suelo-planta para determinar

condiciones de suelo y el agua se asume valores igual a la unidad, quedando por lo tanto solamente en función al cultivo, es decir en función de sus características anatómicas, morfológicas y fisiológicas, expresando como la capacidad que tiene un cultivo para extraer agua del suelo durante su periodo vegetativo.

#### **2.4.1 Factores que determinan el coeficiente del cultivo (Kc)**

Los factores que afectan los valores de Kc son: las características del cultivo, fecha de siembra, ritmo de desarrollo del cultivo, duración del periodo vegetativo, condiciones climáticas y la frecuencia de lluvia o riego, especialmente durante la primera fase de crecimiento. (Vásquez, A. 1992).

Allen et al, (2006). El coeficiente del cultivo integra los efectos de las características que distinguen a un cultivo típico de campo, el cual posee una apariencia uniforme y cubre completamente la superficie del suelo. En consecuencia, distintos cultivos poseerán distintos valores de coeficiente del cultivo. Por otra parte, las características del cultivo que varían durante el crecimiento del mismo también afectarán al valor del coeficiente Kc. Por último, debido a que la evaporación es un componente de la evapotranspiración del cultivo, los factores que afectan la evaporación en el suelo también afectarán al valor de Kc.

##### **a) Tipo de Cultivo**

Debido a las diferencias en albedo, altura del cultivo, propiedades aerodinámicas, así como características de las estomas y hojas de las plantas, se presentarán diferencias entre la evapotranspiración de un cultivo bien desarrollado y regado y la de referencia.

ET<sub>o</sub>. Los espaciamientos estrechos entre plantas, así como la mayor altura y rugosidad de la superficie de una gran cantidad de cultivos agrícolas, producen como consecuencia que esos cultivos presenten coeficientes Kc mayores a 1,0. En esos casos, el factor Kc es con frecuencia de 5 a 10% mayor que el valor de referencia (donde Kc = 1,0), pudiendo ser hasta 15-20% mayor para el caso de cultivos altos como el maíz, el sorgo o la caña de azúcar. Por otra parte, cultivos como la piña, los cuales pueden cerrar sus estomas durante el día, poseen valores bajos del coeficiente del cultivo. Sin embargo, en la mayoría de las especies, las estomas se abren en

respuesta al aumento de la radiación solar. Además de la respuesta de las estomas a las condiciones ambientales, la posición y número de estomas y la resistencia de la cutícula a la transferencia de vapor de agua determinan la pérdida de agua del cultivo. Las especies que presentan estomas solamente en la parte inferior de la hoja y/o que presentan gran resistencia en las hojas, presentarán valores relativamente menores de  $K_c$ . Este es el caso de los cítricos y los frutales de hojas caducas.

#### **b) Clima**

Los valores de  $K_c$  presentados en el texto son valores medios típicos de  $K_c$  que se pueden esperar bajo condiciones climáticas estándar, las cuales son definidas como aquellas correspondientes a climas sub-húmedos, con una humedad relativa mínima diaria ( $HR_{\min}$ ) 45% y con velocidades del viento bajas a moderadas, con un promedio de 2 m s<sup>-1</sup>. Las variaciones en la velocidad del viento afectan el valor de la resistencia aerodinámica de los cultivos y por lo tanto los valores del coeficiente del cultivo, especialmente en aquellos cultivos que posean una altura significativamente mayor a la del cultivo hipotético del pasto.

#### **c) Evaporación del suelo**

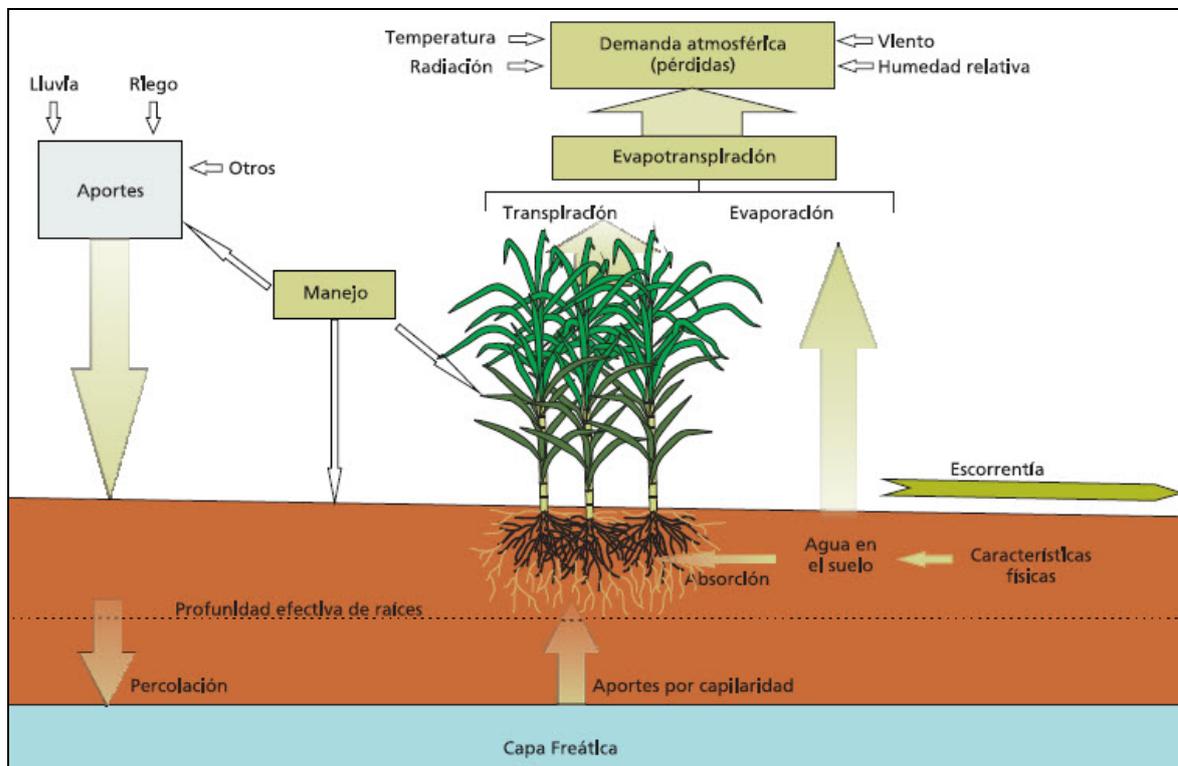
Las diferencias en la evaporación del suelo y la transpiración del cultivo, que existen entre los cultivos de campo y el cultivo de referencia, están incorporados en el coeficiente del cultivo. El valor del coeficiente  $K_c$  para cultivos que cubren completamente el suelo refleja principalmente las diferencias en transpiración, debido a que la evaporación que ocurre en el suelo es relativamente pequeña. Después de un evento de lluvia o riego, el efecto de evaporación es predominante cuando el cultivo es pequeño y sombrea escasamente el suelo. En esas condiciones de poca cobertura, el coeficiente  $K_c$  está determinado principalmente por la frecuencia con la cual se humedece la superficie del suelo. Cuando el suelo se encuentra humedecido la mayoría del tiempo debido al riego o la lluvia, la evaporación en el suelo será significativa y el valor de  $K_c$  puede exceder a la unidad. Por otro lado si la superficie del suelo está seca, la evaporación será restringida, traduciéndose en un valor de  $K_c$  pequeño, pudiendo incluso alcanzar valores tan bajos como 0,1.

## 2.5. RELACIÓN SUELO AGUA PLANTA

El conocimiento de la relación de suelo - agua – planta es esencial para la producción agrícola bajo riego. Aún en áreas de mucha lluvia la escasez de agua puede limitar el desarrollo de las plantas. Esto puede atribuirse a una errática distribución de lluvia, a una alta escorrentía o a una infiltración profunda en suelos con baja capacidad de retención de agua. Por tal razón, la importancia del riego no se limita a regiones áridas y semiáridas.

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

Figura 07. Relación agua – suelo - planta



**Relaciones Agua – Planta:** *Pizarro, (1996)*. Indica que el agua es el principal componente de las plantas, en algunos de cuyos órganos representa más el 90% en peso. Actúa como disolvente y medio de transporte de gases, minerales y otras sustancias esenciales para la vida vegetal y es así mismo un reactivo de procesos fundamentales, como la fotosíntesis. Pero desde el punto de vista de la tecnología de riego lo que interesa es conocer el movimiento del agua en el sistema suelo – planta – atmósfera y sobre todo dos cuestiones prácticas: el momento óptimo de riego y las necesidades hídricas de los cultivos.

*Rojas*. Dada la complejidad del tema y conociendo que esas relaciones ocurren simultáneamente, es muy difícil realizar un análisis que incluya todos los factores. Siguiendo lo tradicional se hará un análisis de las relaciones: agua-suelo, suelo-planta, suelo-atmósfera, agua-planta y planta-atmósfera.

Para iniciar la discusión, se analizará la ecuación básica del balance hídrico en el complejo suelo-cobertura:

$$P = Q + E_t + \Delta \text{alm} \dots \dots \dots 4$$

O su equivalente: *Entradas = Salidas ± Cambios de almacenamiento.*

Donde:

P = Precipitación

Q = Caudal de salida

E<sub>t</sub> = Evapotranspiración

Δ alm.= Cambios de almacenamiento

En la cual las entradas al complejo están representadas por la precipitación, P. Las salidas están integradas por la escorrentía, Q, y la evapotranspiración, E<sub>t</sub>. Los cambios de almacenamiento se representan por Δ alm. Puede notarse que todas las salidas dependen de factores y variables relacionadas con el suelo, la atmósfera y las plantas. La escorrentía depende de factores fisiográficos relacionados con suelos y plantas. La evapotranspiración depende de las plantas, el suelo, el clima y la disponibilidad de agua. Finalmente, la cantidad y cambios de almacenamiento, dependerán de las características de retención de humedad de los suelos.

**Relaciones Suelo – Agua:** Las relaciones más importantes son:

- Capacidad de retención de humedad.
- Infiltración.
- Redistribución.
- Ascenso capilar.
- Conductividad hidráulica.
- Curvas de drenaje de los suelos.

El estudio y análisis de esas relaciones requiere de un conocimiento profundo de Física de Suelos, en especial de los “potenciales de agua en el suelo”.

La retención de humedad se refiere a la capacidad que tienen los suelos de retener humedad. Esta propiedad de los suelos depende de varios factores entre los cuales se destacan: la textura, la densidad aparente, los coloides del suelo y la materia orgánica. Durante periodos relativamente cortos, esa característica es constante, sin embargo, el manejo de los suelos puede cambiarla en sentido positivo o negativo. Por ejemplo, la adición de materia orgánica mejora la retención; por el contrario, la compactación de los suelos la disminuye.

La infiltración se refiere al paso del agua desde la superficie del terreno hacia el perfil del suelo. La tasa de infiltración depende de varios factores fijos tales como:

- Textura del suelo.
- Estratificación del suelo.
- Materia orgánica.
- Cobertura.

Y de factores circunstanciales tales como contenido de humedad del suelo y forma de aplicación del agua. Hay otros factores modificadores como: compactación, salinidad, encostramiento, etc., que limitan la entrada de agua.

La redistribución es el proceso mediante el cual el agua se mueve en el suelo de acuerdo a los “potenciales del agua” del mismo. De esa manera, ésta se mueve desde sitios de mayor contenido de humedad (potencial) hacia otros de menor potencial.

El ascenso capilar es el movimiento del agua desde el nivel freático por efecto de la capilaridad de los suelos. El ascenso capilar depende de la textura y composición de los suelos y de los gradientes de humedad existentes. El ascenso capilar puede alcanzar alturas mayores de un metro.

La conductividad hidráulica puede definirse como la capacidad de transmisión de agua de los suelos, esta puede ser saturada o no saturada. En la práctica sólo se usa la conductividad hidráulica saturada, comúnmente llamada permeabilidad. Esta propiedad de los suelos depende en gran parte de la textura de los suelos.

La curva de drenaje de los suelos indica la forma mediante la cual el suelo pierde agua por efecto de la gravedad.

**Relaciones Suelo – Planta:** La función más conocida del suelo es la de dar soporte o sustentación a la vegetación. El término “sustentación” puede interpretarse como el de dar apoyo a la vegetación o como dar alimento o ambas cosas. En realidad ocurren ambas cosas y de esa manera el suelo proporciona estabilidad a las plantas, le ofrece nutrientes y agua. Por otro lado, el suelo puede contener sales y sustancias tóxicas que perjudican el crecimiento de las plantas y estratos compactados que limitan el desarrollo de los mismos. Como contrapartida, la vegetación mejora los suelos incorporando materia orgánica y dándole protección contra la erosión.

**Relaciones Planta – Atmosfera.** Las relaciones planta - atmósfera pueden ser analizadas considerando que los factores agua y suelo no son limitantes. Entre las relaciones más importantes se encuentran: La evapotranspiración de referencia, el crecimiento potencial, la temperatura y la fotosíntesis.

**Relaciones Agua – Planta.** El agua es el más importante factor de crecimiento de las plantas. Un suelo fértil con buena temperatura, pero seco, no puede producir nada. De la misma manera un suelo con mucho agua no permite un normal desarrollo de las plantas. Para lo cual se tendrá que mencionar los siguientes temas: Agua y crecimiento, déficit de agua, excesos de agua, calidad del agua y evapotranspiración real.

**Agua y crecimiento.** El crecimiento potencial de las plantas sólo puede ocurrir cuando la humedad del suelo sea suficiente. El estudio de la relación agua – crecimiento es de suma importancia en la planificación de la agricultura de secano y en el diseño de riego y drenaje. La respuesta de las plantas al contenido de humedad dependerá de los potenciales de agua del suelo; de esa manera, al mismo contenido de humedad, en un suelo arenoso hay mejores condiciones que en un suelo arcilloso.

**Déficit de Agua.** Lo expuesto en el tema anterior indica que los déficit de agua limitan el crecimiento de las planta y por lo tanto es necesario definirlos para poder planificar el uso de la tierra y para la operación de sistemas de riego. Sin embargo, en la práctica, las deficiencias de agua no ocurren todo el tiempo y por lo tanto es necesario hacer estimaciones, tomando en consideración el uso de agua por las plantas y el contenido de humedad de los suelos.

**Exceso de agua.** El exceso de agua en el suelo tiene efectos negativos para el crecimiento de los cultivos. Entre los efectos negativos se pueden mencionar:

- Disminución de la aireación del suelo.
- Disminución de la temperatura del suelo.
- Reacciones químicas en el suelo.

De todos ellos la disminución de la aireación del suelo es la más importante. En la práctica es difícil determinar por separado cada uno de los efectos y por tal motivo, el conocimiento actual de la influencia de los excesos de agua sobre el crecimiento de los cultivos se hace de manera global basado en el tiempo de duración de los excesos de agua. Por lo general no se hace distinción entre la inundación y el exceso de humedad.

**Calidad de agua.** La calidad del agua puede ser referida a calidad física y calidad química. La calidad física principal se refiere al contenido de sedimentos y por lo general no afecta a las plantas de forma apreciable. La calidad química afecta a las plantas de dos maneras: por salinidad y por toxicidad.

La salinidad que afecta la disponibilidad de agua. La toxicidad, se refiere a ciertos cationes que afectan directamente a las plantas como el boro o como el aluminio que afecta la disponibilidad de nutrientes

**Evapotranspiración real.** La evapotranspiración real dependerá de la cantidad de agua disponible para las plantas, de esa manera, aun cuando la ETo sea alta, si no hay disponibilidad de agua en el suelo, las plantas sólo tomarán la porción directamente disponible. Algunas plantas son capaces de cerrar las estomas a fin de evitar la evapotranspiración y de esa manera conservar agua. Algunas plantas pueden presentar síntomas de marchitamiento incipiente en horas de alta ETo. La productividad de los cultivos está íntimamente relacionada con la cantidad real de evapotranspiración. En riego, se utiliza el término de eficiencia de uso del agua para determinar la productividad de los cultivos en función del agua evapotranspirada.

## 2.6. NECESIDADES DE AGUA DEL CULTIVO

(Allen et al, 2006). Es la cantidad de agua requerida para compensar la pérdida por evapotranspiración del cultivo. A pesar de que los valores de la evapotranspiración del cultivo y de las necesidades de agua del cultivo son idénticos, sus definiciones conceptuales son diferentes:

Las necesidades de agua del cultivo se refieren a la cantidad de agua que necesita ser proporcionada al cultivo como riego o precipitación, mientras que la evapotranspiración del cultivo se refiere a la cantidad de agua perdida a través de la evapotranspiración.

$$Nr = Na - Pe \dots \dots \dots 5$$

Donde:

Nr : La necesidad de riego (mm)

Na : Necesidad de agua del cultivo (mm)

PE : Precipitación efectiva (mm)

El requerimiento de agua de riego también incluye agua adicional para el lavado de sales, y para compensar la falta de uniformidad en la aplicación de agua.

## 2.7. BALANCE HÍDRICO

El balance hídrico puede entenderse como la evaluación volumétrica de las entradas y salidas de agua a un sistema para conocer su disponibilidad (García 1990). Para establecer un balance hídrico hay que conocer las entradas de agua, que están dadas por la precipitación (P), cuantificada mediante un pluviómetro; el riego (R), medido volumétricamente, y las salidas de agua de un cultivo, que se dan por la evapotranspiración (ETc), que es la pérdida de agua por evaporación desde cualquier superficie evaporante más la transpiración de la vegetación existente, y por el drenaje (D), que es la cantidad de agua que percola a través del suelo por efecto de la gravedad.

También se debe conocer el contenido de agua en la masa de suelo o agua retenida (AR); para ello determinar las curvas de retención de humedad del suelo en los lisímetros y se encontró que entre 10 y 32 centibares este tiene una humedad de 32.6 y 30.6 % con base en volumen. Para controlar la humedad del suelo se utilizaron tensiómetros, colocando dos por lisímetro en cuatro lisímetros (uno por especie), a una profundidad de 15 y 30 cm respectivamente. El riego se hizo cada vez que la lectura de los tensiómetros excedía 32 centibares. Por tanto, los cambios en el contenido de humedad del suelo se aproximaron a cero y no se tomaron en cuenta para el cálculo de la ETc.

La evapotranspiración puede ser representada mediante la siguiente ecuación:

$$ETc = P + R - D \pm AR \dots\dots\dots 6$$

### III. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 MEDIO EXPERIMENTAL

##### 3.1.1 Ubicación de la zona de estudio

El presente trabajo de investigación se condujo en cuatro bofedales, de los cuales dos se encuentran en la zona agroecológica de puna seca y dos bofedales en la zona agroecológica de puna húmeda del departamento de Puno, comprendidos entre 4050 y 4650 m.s.n.m., cuya ubicación política y geográficas se indican en el cuadro 05 y 06.

Cuadro 05. Ubicación política y geográfica de los bofedales en estudio.

UBICACIÓN POLÍTICA			UBICACIÓN GEOGRÁFICA			Zona Agroecológica
Bofedal	Distrito	Provincia	Longitud Oeste	Latitud Sur	Altitud (msnm)	
Capapujo	Capaso	El Collao	69°44'45"	17°10'42"	4350	Puna seca
Apopata	Mazocruz	El Collao	69°48'57"	16°43'56"	4090	Puna seca
Wichicancha	Santa Rosa	Melgar	70°47'41"	14°36'07"	4060	Puna húmeda
Munay Paqocha	Macusani	Carabaya	70°20'46"	14°04'42"	4650	Puna húmeda

Fuente: Informe técnico subproyecto INCAGRO 2009.

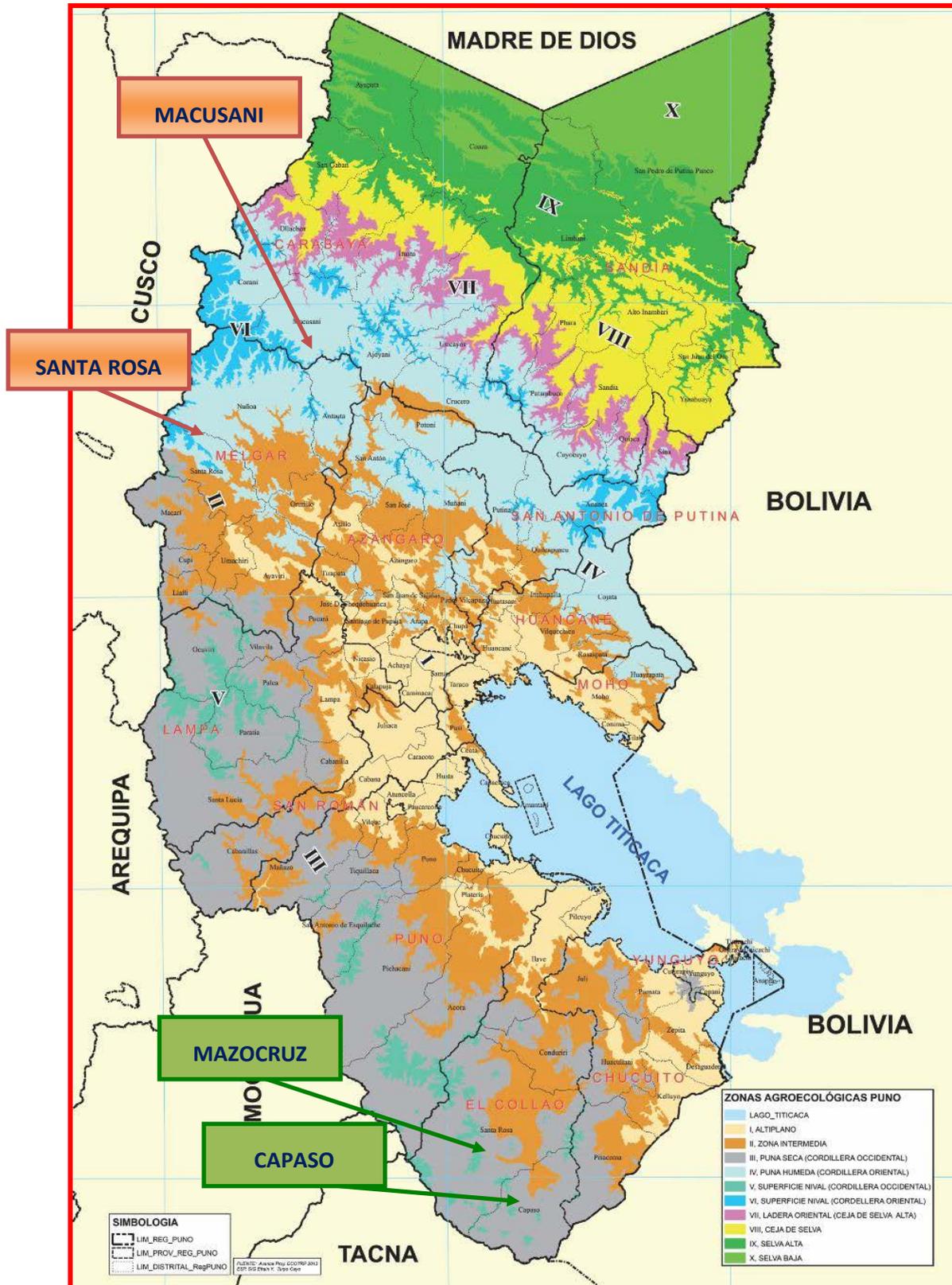
##### 3.1.2 Caracterización ecológica y climática de los bofedales

Cuadro 06. Caracterización ecológica y climática de las unidades experimentales.

DESCRIPCIÓN	UNIDAD EXPERIMENTAL (Bofedales)			
	Capaso	Mazocruz	Santa Rosa	Macusani
Zona Agroecológica	Puna seca	Puna seca	Puna húmeda	Puna húmeda
Zona Ecológica	ph - SaS	bh - MS	ph-SaS	ph-SaS
Zona Climática	C(o,i,p)E'	C(o,i)C'	C(o,i,p)D'	C(o,i,p)E'
Precipitación total anual mm	575.2	519	797.9	806.3
Temperatura Media. °C	3.67	4.87	7.03	5.49
Temperatura Max °C	7.4	7.3	9.3	7.2
Temperatura Min. °C	-0.5	1.7	2.9	2.8

Fuente: Informe técnico subproyecto INCAGRO 2009.

Figura 08. Ubicación de los bofedales para la investigación en el departamento de Puno.



## 3.2 MATERIAL EXPERIMENTAL

### 3.2.1 Bofedales elegidos

Para realizar el presente trabajo de investigación, se inicio con la identificación y selección de dos bofedales de puna seca (Capaso y Mazocruz) y dos bofedales de puna húmeda (Santa Rosa y Macusani) cercanas a la Estación Meteorológica de SENAMHI – Puno. Los bofedales seleccionados fueron clausurados con mallas ganaderas una área de 1.0 hectáreas.

### 3.2.2 Materiales y equipos de campo

Materiales empleados para la construcción de los Lisímetros

- 12 tanques ROTOPLAS de 1 m<sup>3</sup> de capacidad (03 Lisímetros en cada bofedal).
- 04 tanques ROTOPLAS de 0.6 m<sup>3</sup> de capacidad (01 tanque por bofedal).
- 12 tubos de PVC, Ø 1 pulgada C/R.
- 24 uniones simple Ø 1 pulgada.
- 24 uniones universal Ø 1 pulgada C/R.
- 48 empaques - niple Ø 1 pulgada C/R.
- 12 tapones machos Ø 1 pulgada C/R.
- 12 válvulas de compuerta Ø 1 pulgada C/R.
- 12 codos de 90° Ø 1 pulgada C/R.
- 12 TEEs Ø 1 pulgada C/R.

Herramientas utilizadas para la instalación de los Lisímetros

- Pico.
- Pala.
- Tarraja manual de Ø 1 pulgada.
- Corta cierre.
- Llave Steelson
- Cinta métrica de 50 y 5 metros.

Equipos y herramientas utilizados para el seguimiento

- 04 probetas de 1000 mm de capacidad.
- 04 baldes graduados de 12 litros.

- 01 Geo termómetro digital.
- 01 GPS.
- 01 Cámara digital.
- 01 pala recta para extracción de muestras.
- 01 juego de Bisturís.
- Cinta métrica de 50 y 5 metros.

#### Materiales utilizados para el seguimiento

- Bolsas de plástico.
- Etiquetas para la rotulación de muestras.
- Estacas de madera para la ubicación de los cuadrantes.
- Tablero de apuntes.
- Lápiz.
- Hojas de registros.

#### **3.2.3 Materiales y equipos de laboratorio**

- Estufa para determinar materia seca.
- Balanza de precisión.
- Envases de lata para la colocación de muestras de suelo.
- Bolsas de papel N° 2 y 12.
- Etiquetas para la rotulación de muestras.
- Cuaderno de apuntes de laboratorio.
- Lapicero de tinta.
- Lápiz.

#### **3.2.4 Información meteorológica**

Los registros diarios de información meteorológica y hidrológica obtenidos de las estaciones del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología – SENAMHI Puno.

- Temperatura máxima (°C).
- Temperatura mínima (°C).
- Evaporación (mm/día).
- Horas de sol (hr).

- Humedad Relativa (%).
- Precipitación pluvial (mm).
- Velocidad de viento (m/s).

### 3.3 METODOLOGÍA

#### 3.3.1 Variables de respuesta

##### a) Variables dependientes

- Evapotranspiración real del bofedal (mm/día).
- Evapotranspiración de cultivo de referencia (mm/día).
- Coeficiente de cultivo Kc.

##### b) Variables independientes.

- Temperatura máxima y mínima del aire (°C).
- Humedad del suelo (%).
- Radiación solar extraterrestre (mm/día).
- Velocidad de viento (m/s).
- Evaporación (mm/día).
- Precipitación pluvial (mm).
- Temperatura del suelo (°C).

#### 3.3.2 Construcción e instalación de lisímetros

Los Lisímetros son tanques calibrados, dentro de los cuales se introducen el suelo no alterado por estratos, sobre el cual se desarrollan las especies de pastos del bofedal, el objetivo de este instrumento es efectuar un balance de entradas y salidas de agua, para determinar luego la fracción correspondiente a la evapotranspiración.

##### a. Construcción de Lisímetros

En el presente trabajo se utilizó tres Lisímetros de drenaje con nivel freático constante (LDNFC), para el efecto del análisis se consideró L1, L2 y L3. Para la construcción de los Lisímetros se utilizó tanque de PVC de 1.0 m<sup>3</sup> de capacidad; el cual se cortó la parte superior, de tal manera que el tanque es un cubo perfecto de 0.86 m. diámetro y 1.10 m de altura.

Figura 09. Detalle del lisímetro tipo drenaje con nivel freático constante instalados en cada bofedal.

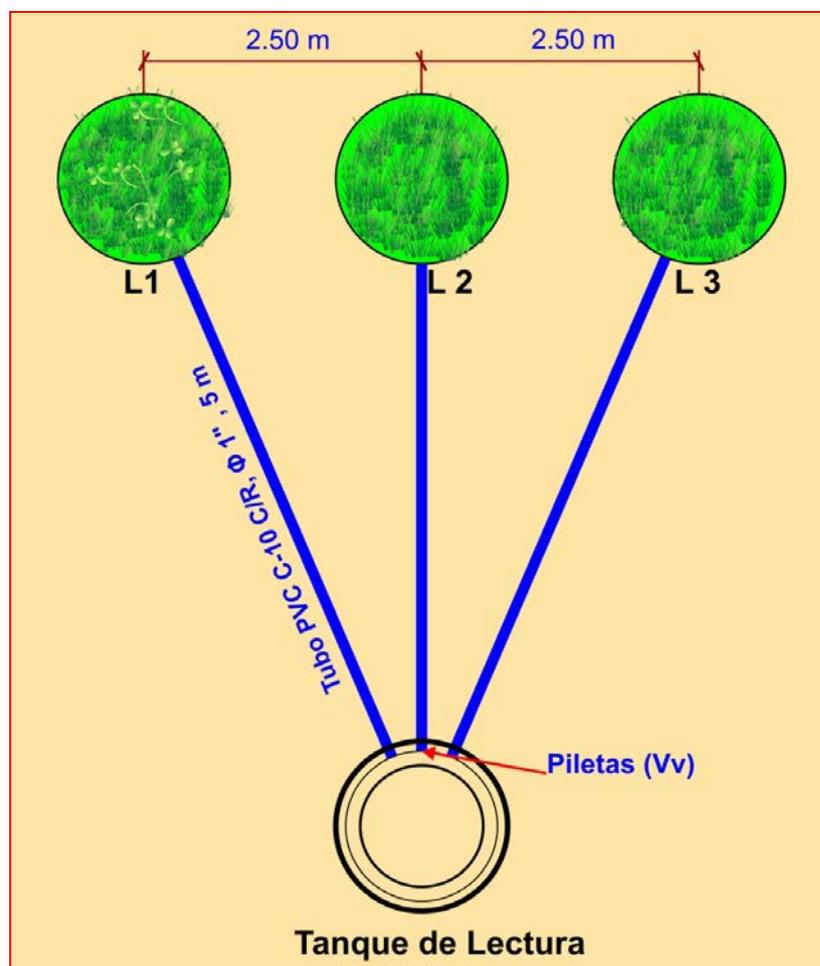
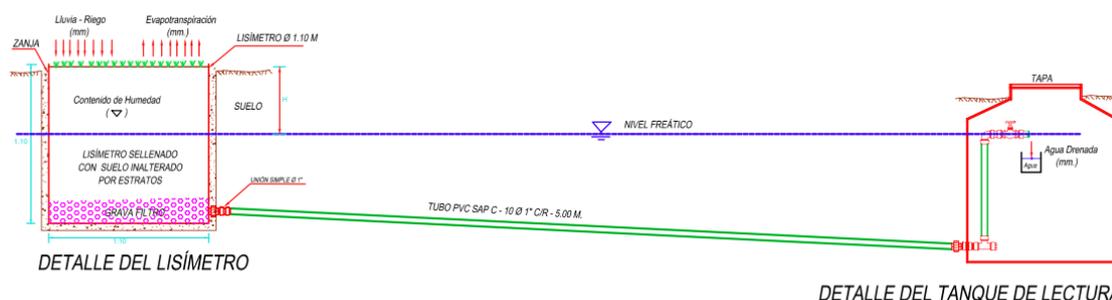


Figura 10. Perfil del Lisímetro tipo drenaje con nivel freático constante.



En cada bofedal (unidad experimental), se han construido 03 Lisímetros, y 01 tanque colector (lectura) en donde se registraron lecturas del volumen de agua drenada;

haciendo un total de 12 Lisímetros de 1.0 m<sup>3</sup> de capacidad y 4 tanques de lectura de 0.6 m<sup>3</sup> de capacidad. Para poder realizar las mediciones de han instalado tubería de 1" de diámetro que conecta de cada Lisímetros independientemente al tanque colector y controlada mediante una llave de paso. (Figura 09)

Para mantener el comportamiento del nivel de agua en los bofedales (nivel freático), se han instalado para cada lisímetro una llave similar a la pileta a 0.60 m. de altura, dentro del tanque de lectura a fin de mantener el nivel de agua en el bofedal entre 25 a 30 cm. por debajo de la superficie del suelo que normalmente se encuentra en los bofedales (Figura 10).

#### **b. Instalación de lisímetros**

Dentro de la Unidad Experimental instalado en el bofedal se ubicó el lugar representativo para la instalación de lisímetros; teniendo en cuenta los horizontes (capas) del perfil del suelo, especies del bofedal y pendiente del suelo, luego se procedió a marcar la ubicación de los lisímetros según las medidas establecidas que se detalla en la figura 09. La excavación de hoyos de 1.10 m de diámetro y 1.30 m de profundidad para la instalación de los Lisímetros; durante la excavación se han considerando dos aspectos muy importantes: la primera capa conformado por la vegetación y su pan de tierra dividir en 4 partes iguales y extraer por separado para volver colocarlos al final del relleno y continuar con la excavación separando el suelo por capas que se definirán por la textura y coloración del suelo (Foto 01).

Igualmente se han excavado zanjas desde cada lisímetro al tanque de lectura de 5.00 m de longitud, 0.40 m de ancho y 1.30 m de profundidad; para instalar las tuberías de 1" de diámetro de cada Lisímetro a los colectores (tanque de lectura) y colocar las llaves en el tanque de lectura (Foto 02).

Colocar y nivelar los lisímetros en los hoyos, en la base de cada Lisímetro se colocó una capa de hormigón y grava redondeada y clasificada de 0.20 m de espesor, con la finalidad de facilitar el drenaje de agua por la tubería hacia el tanque de lectura y luego extraer el agua drenada por las piletas.

Foto 01. Excavación de hoyos e instalación de lisímetros y tanque colector.



Foto 02. Conexión de tubería de los lisímetros al tanque de lectura con sus respectivas llaves de paso.



### c. Relleno del suelo y trasplante del bofedal en los lisímetros

El proceso de llenado de suelo extraído durante la excavación a los Lisímetros es crucial ya que debe cumplirse una doble condición: por una parte, el material de relleno debe asemejarse en lo posible al suelo original, no sólo en su textura si no también en su densidad, que tiene una gran influencia sobre las condiciones

hidrodinámicas básicas; por otra parte se debe procurar el máximo grado posible de homogeneidad en el relleno.

En consecuencia, el proceso de llenado se realizó de manera muy cuidadosa introduciendo suelo por estratos, tratando en lo posible de mantener las propiedades físicas del suelo y grado de compactación del suelo logrando obtener lo más homogéneo posible y a su vez similar a las condiciones naturales y concluido el proceso se procedió con el trasplante del material orgánico con especies del bofedal colocando el mismo material extraído en el momento de excavar de tal manera que la recuperación de las especies del bofedal sea rápida.

El material orgánico trasplantado en los Lisímetros L1, L2 y L3 es el mismo material extraído en la excavación, el trasplante se realizó sin alterar sus características iniciales muy similares al bofedal que rodea a los Lisímetros; las especies predominantes se describen en composición florística.

#### **d. Riego y drenaje de lisímetros.**

La demanda de agua para riego fueron calculados mediante métodos indirectos a base de datos climáticos de cada zona; los riegos se realizaron con un intervalo de riego de 4 a 7 días, el volumen de agua aplicado en cada riego varían entre 12 a 40 litros según los cálculos efectuados y la precipitación pluvial que se presentó dentro del intervalo de riego; el riego se aplicó después de realizar las lecturas del volumen de agua drenado de cada lisímetro con la probeta graduada de 1000 ml de capacidad (Foto 03). El riego se efectuó con un balde graduado con capacidad de 12 litros los cuales nos permitió determinar la evapotranspiración del bofedal (ET<sub>b</sub>) durante 12 meses.

Al principio se observó variaciones en el comportamiento hídrico de los lisímetros, pero al cabo de 5 meses el comportamiento se estabilizó siendo más homogéneos, de manera que la investigación se inició a partir de enero del 2008 con los primeros riegos controlados y los registros del volumen de agua drenado de los lisímetros en forma independiente con el uso de las probetas de 1000 mm de capacidad.

Foto 03. Registro del volumen de agua drenada de los lisímetros del bofedal.



### 3.4 METODOLOGÍA DE MEDICIÓN DE VARIABLES

#### 3.4.1 Determinación de factores climático (hidrología y meteorología)

La información de variables climáticas de cada localidad (Unidades Experimentales), se han obtenido de las planillas de información hidrológica y meteorológica mensual obtenidas de las Estaciones de SENAMHI – Puno (Foto 04). Los instrumentos utilizados para cuantificar las variables climáticas son los siguientes:

- Precipitación pluvial (mm) con el pluviómetro.
- Temperatura máxima y mínima (°C). con el termómetro.
- Evaporación (mm/día) con Tanque tipo A.
- Velocidad de viento (m/s) con el Heliómetro.
- Humedad relativa (%) con termómetro seco y húmedo.

Foto 04. Estación hidrológica y meteorológica de Macusani.



### 3.4.2 Determinación de la temperatura y contenido de humedad del suelo.

#### a. Temperatura del suelo.

Para determinar la temperatura del suelo (a 15 centímetros por debajo de la superficie del suelo) cada mes se han registrado 12 lecturas de temperatura del suelo con el uso del geotermómetro digital (Foto 05).

#### b. Contenido de humedad en el suelo.

Para determinar el contenido de humedad del suelo y ver si está en capacidad de campo, se tomo 12 muestras cada mes (Foto 05). Estas muestras se llevo a la estufa por 24 horas a una temperatura de 105°C. (Foto 10). Para determinar el contenido de humedad existente en el suelo se utilizó la siguiente formula.

$$\% \text{ Humedad} = \frac{P_{sh} - P_{ss}}{P_{ss}} * 100 \dots \dots \dots 7$$

Donde:

Psh : Peso de suelo húmedo (gr).

Pss : Peso de suelo seco (gr).

Foto 05: Uso del geotermómetro digital para registrar la temperatura del suelo y obtención de muestras de suelo para determinar el contenido de humedad.

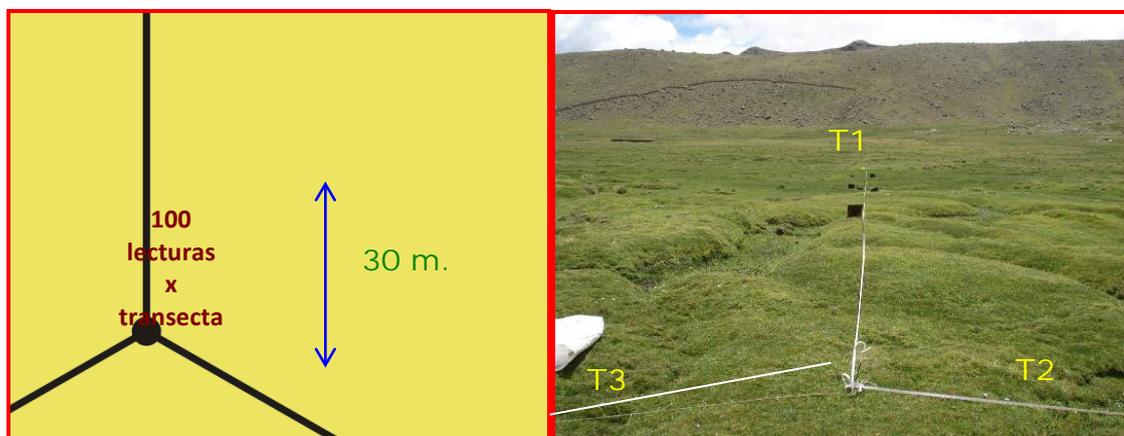


### 3.4.3 Composición florística y determinación de producción de biomasa en los bofedales.

#### a) Evaluación de la composición florística.

En cada bofeal se ha distribuido tres transectas lineales de 30 metros de longitud en cada transecta (T1, T2 y T3), marcando sus puntos extremos con estacas. La disposición y la distribución de las transectas siguieron un orden definido respecto a las orientaciones y los puntos fijos. (Foto 06).

Foto 06. Distribución de la transecta lineal para el censo de la composición vegetal del bofedal.



Para determinar la composición florística de los bofedales en la época de lluvia y seca, se utilizó el método de “puntos en parcela lineal permanente” de Parker (1951) citado por Tapia y Flores (1984). Adaptado a transectos de 30 metros de longitud como puntos de muestreo a intervalos de 30 cm. A lo largo de cada parcela lineal establecida, sobre una cinta métrica extendida se realizaron un total de 100 lecturas con el anillo censador de  $\frac{3}{4}$  pulgadas de diámetro. Cuando más de la mitad del anillo era ocupado por una especie de pasto, se identificó con las dos primeras letras del nombre científico. Ejemplo: *Distichia muscoides* (DIMU), *Muhlenbergia fastigiata* (MUFA), si era mantillo con la letra M, si era suelo desnudo con la letra D, si era roca con la letra R. Se anotaron cada 30 cm a partir del punto cero, cuidando de colocar el anillo siempre en el mismo lado de la cinta todas las veces. Los datos de la composición florística fueron registradas en formularios u hojas de campo y luego el resumen de censo de vegetación.

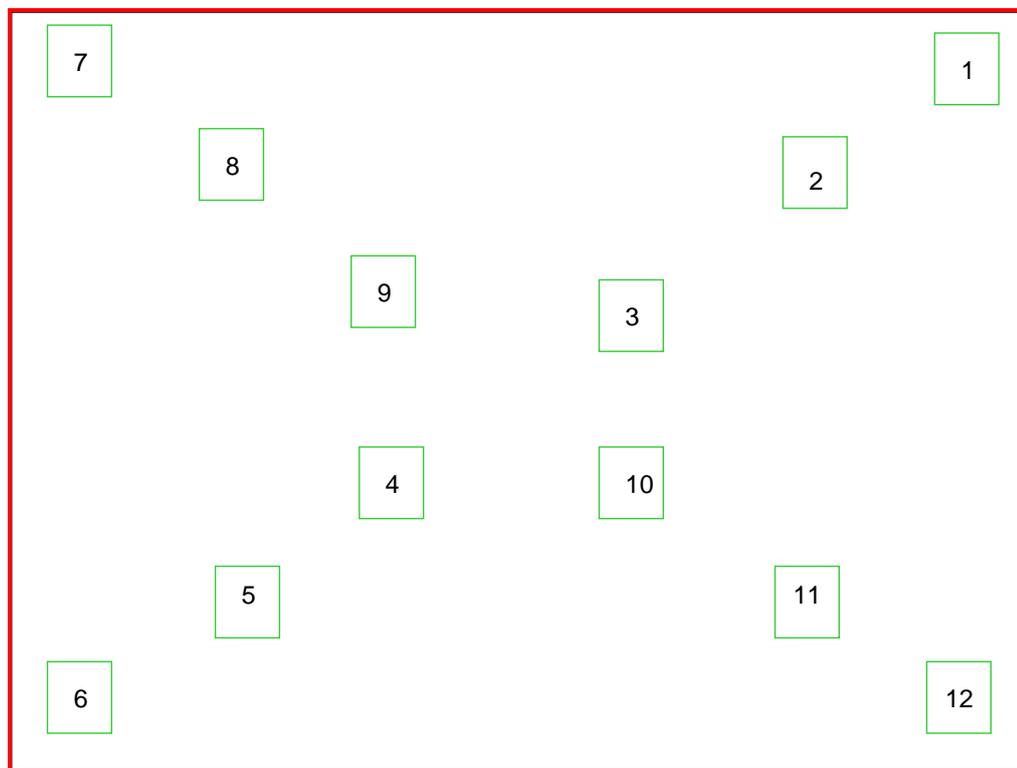
Foto 07. Evaluación de la composición florística método de trasección lineal.



#### **b) Determinación de la producción biomasa en el bofedal**

Para la determinación de la producción de forraje en los bofedales se utilizó el método “cosecha en parcela cuadrada mediante corte”, para lo cual se ubicó y trazó doce parcelas cuadradas distribuidos en forma diagonal, los cuales fueron ubicados al azar, pero siguiendo una misma línea en cada bofedal clausurado (Figura 11), para la toma de muestras de forraje verde.

Figura 11. Ubicación de puntos de muestreo del forraje verde dentro del bofedal.



Para la cosecha de materia verde (MV) mediante corte se ha medido un cuadrante de 0.20x0.20 m de lado ( $0.04 \text{ m}^2$ ) y en cada esquina se colocaron clavos de 4", para realizar el muestreo se colocó liga en los clavos y se realiza el corte de la cubierta vegetal con tijera o cúter, obteniéndose así la materia verde disponible en los bofedales, así se realizó el corte cada 30 días (Foto 08).

Foto 08. Cosecha de la muestra de forraje de la parcela experimental.



Para el pastoreo con alpacas en los bofedales dentro de las unidades experimentales, cada cuadrante de muestreo son protegidas con jaulas metálicas de 0.40 x 0.40 x 0.40 metros de lado protegidas con mallas de alambre, con la finalidad de evitar el consumo y pisoteo de las especies de pastos en los cuadrantes de muestreo por las alpacas durante el pastoreo (Foto 09).

Foto 09. Cuadrante de muestreo del bofedal protegida con jaulas para el pastoreo.



Para calcular la materia seca (MS), las muestras de materia verde (MV) cosechado, debidamente identificado y embolsado se llevó al laboratorio de pastos de la EEA Illpa Puno del INIA, para el secado en una estufa eléctrica a una temperatura de 60 °C durante 48 horas hasta obtener peso constante, esta misma operación se repitió cada 30 días. (Foto 10).

Foto 10. Secado de muestras en estufa, para determinar la materia seca (MS).



### 3.4.4 Análisis físico y químico del agua y suelo

#### a. Análisis de agua

En cada bofedal se han ubicado e identificado las principales fuentes de agua utilizadas para el riego y se han tomado 02 muestras de agua, correspondientes a la época de lluvias y seca. Las fuentes de agua identificadas para la toma de muestras son: Agua de manantial en los bofedales de Capaso, Santa Rosa y Macusani y canales de riego en el bofedal de Mazocruz.

#### **Criterios a tener en cuenta y procedimiento a realizar en la toma de muestras:**

- Recipiente de vidrio y/o plástico con tapas seguras de 1 litro de capacidad; antes de realizar la toma lavar varias veces.
- Tomar muestra representativa.
- Conservación en refrigerador a 4 °C.
- Relativamente reciente (no debe transcurrir más de 24 horas entre la toma y el análisis).

**Registro e identificación.** Registrar toda la información y observaciones de campo o del muestreo. Para prevenir confusiones en la identificación de las muestras, pegar al frasco de la muestra antes o durante el muestreo, papel engomado o etiquetas adhesivas en las que se anote, por lo menos la siguiente información: Ubicación del punto de muestreo, número de muestra, nombre del recolector, tipo y nombre de la fuente, fecha, hora y lugar de recolección, método de muestreo y preservación realizada.

#### **Parámetros y métodos utilizados en el laboratorio para el análisis de agua**

Las muestras fueron analizadas dentro de las 24 horas posteriores a su recolección y la caracterización físico-química se fundamentó en el estudio de los siguientes parámetros:

- CATIONES: calcio (Ca), magnesio (Mg), potasio (K) y sodio (Na).
- ANIONES: cloruros (Cl), sulfatos (SO<sub>4</sub>), carbonatos (CO<sub>3</sub>), bicarbonatos (CO<sub>3</sub> H), y nitratos (NO<sub>3</sub>).
- OTROS PARÁMETROS DE CALIDAD: Temperatura, pH, CE.

Los análisis se han realizado en el laboratorio de agua y suelos de la Estación Experimental Illpa Puno del INIA.

Los métodos analíticos utilizados en los análisis químicos del agua son los reportados por Richards (1954). Las determinaciones y técnicas analíticas utilizadas en el análisis se muestran en el cuadro 07.

Cuadro 07. Técnicas utilizadas en la determinación de calidad de agua para riego.

Parámetros	Método Utilizado
Temperatura °C	Termómetro digital
pH	Potenciómetro calomelano (electrodos de vidrio)
C.E.mmhos/cm 25°C	Conductimetría de tres anillos
Calcio meq/l.	Versenato con Eriocromo Negro. EDTA
Mg meq/l.	Versenato con Eriocromo Negro. EDTA
Na meq/l. y K meq/l.	
Carbonatos: CO <sub>3</sub> meq/l.	Fenoltaleina Titulación con ácido sulfúrico
Bicarbonatos: HCO <sub>3</sub> meq/l.	Anaranjado de metilo
Cloruros: Cl meq/l.	Titulación con nitrato de plata
Sulfatos: SO <sub>4</sub> meq/l.	Cloruro de bario
Nitratos: NO <sub>3</sub> meq/l.	Kjeldahl.

Fuente: Laboratorio de agua y suelo del INIA.

#### b. Análisis de suelo

La recolección de muestras se ha hecho recorriendo el campo sobre un trazo predeterminado en forma de X. Estas fueron mezcladas asegurando la contaminación del material colectado con otras diferentes. Una vez mezcladas se obtuvo la muestra representativa de 0.5 Kg. La profundidad de muestreo ha sido de 0 – 30 cm. Los hoyos fueron tapados luego de tomadas las muestras.

**Registro e identificación.** Registrar toda la información y observaciones de campo o del muestreo. Para prevenir confusiones en la identificación de las muestras, colocar las etiquetas de identificación antes o durante el muestreo, papel engomado o

etiquetas adhesivas en las que se anote, por lo menos la siguiente información: ubicación, número de muestra, nombre del recolector, fecha, hora y lugar de recolección y preservación realizada.

Foto 11. Toma de muestras de suelo para análisis de propiedades físicas del suelo.



### Parámetros y métodos utilizados en el laboratorio para el análisis del suelo

Parámetros a analizar son:

- ANÁLISIS MECÁNICO: Textura, capacidad de campo y punto de marchitez.
- ANÁLISIS QUÍMICO:  $\text{CO}_3\text{Ca}$ , pH, Conductividad Eléctrica (CE), materia orgánica (M.O.), N Total.
- ANÁLISIS DE NUTRIENTES: P (ppm); K (ppm); Mn (ppm); Zn (ppm).
- CATIONES CAMBIABLES: Ca me/100g (Calcio); Mg me/100g. (Magnesio); Na me/100g. (Sodio); K me/100g.(Potasio) y Al me/100g. (aluminio).

Los análisis se han realizado en el laboratorio de agua y suelos de la Estación Experimental Illpa Puno del INIA, de acuerdo con normas internacionales y los métodos utilizados para la determinación de cada parámetro son:



$E_{pan}$  : Evaporación del tanque evaporímetro (mm/día).

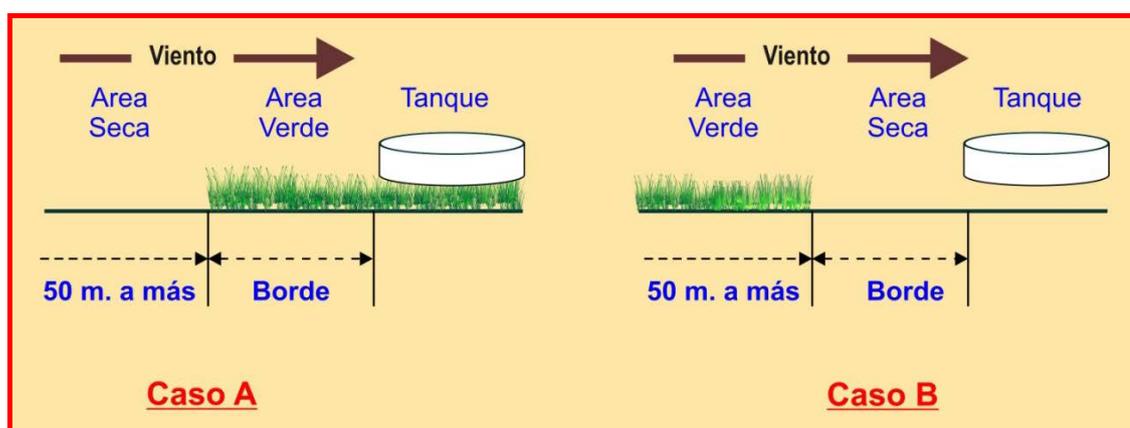
No se requiere corrección para los valores de  $E_{pan}$  en caso de las superficies interiores y exteriores del tanque estén pintados de blanco.

El nivel en el cual se mantiene el agua en el tanque es importante; errores de hasta 15 % pueden resultar cuando el nivel del agua en el tanque evaporímetro Clase A se encuentra 10 centímetros por debajo del estándar aceptado que es de entre 5 y 7,5 centímetros debajo del borde.

### Coeficiente del tanque evaporímetro ( $K_p$ )

Para seleccionar el coeficiente apropiado, se debe considerar la cobertura del suelo donde se ubica el tanque, sus alrededores así como el viento y las condiciones generales de humedad. La localización y el ambiente del tanque evaporímetro también tienen influencia en los resultados. Lo último es particularmente cierto en casos en que el tanque evaporímetro se encuentra situado en suelos bajo barbecho y no en campos cultivados. Bajo esta característica, se consideran dos casos comúnmente: Caso A en que el tanque evaporímetro se localiza en una zona de pasto corto verde y está rodeado por un suelo en barbecho; y Caso B en que el tanque evaporímetro se localiza sobre un suelo en barbecho y está rodeado por un cultivo verde (Figura 12).

Figura 12. Dos casos de localización del tanque de evaporación y sus alrededores.



**b. Método Hargreaves Modificado.** La fórmula de Hargreaves (Hargreaves y Samani, 1985) para evaluar la evapotranspiración de referencia necesita solamente datos de **temperaturas** y de **radiación solar**. La expresión general es la siguiente:

$$ET_o = 0.0023R_o(T + 17.78)(T_{max} - T_{min})^{0.50} \dots\dots\dots 9$$

Donde:

- ET<sub>o</sub> : Evapotranspiración de referencia diaria, (mm/día).
- R<sub>o</sub> : Radiación solar extraterrestre de evaporación (mm/día).
- T : Temperatura media del aire (°C).
- T<sub>max</sub> : Temperatura máxima del aire (°C).
- T<sub>min</sub> : Temperatura mínima del aire (°C).

**c. Método de Serruto.** En 1993 propone el siguiente modelo:

$$ET_o = 0.003(R_o)^{2.5} + (0.16T^{0.88}) \dots\dots\dots 10$$

Donde:

- ET<sub>o</sub> : Evapotranspiración de referencia, (mm/día).
- T : Temperatura media del aire (°C).
- R<sub>o</sub> : Radiación solar extraterrestre de evaporación (mm/día).

**d. Método de Penman Monteith (FAO - 56).**

La ecuación de Penman Moteith (Monteith, 1985) estima por medio de un modelo físico la evapotranspiración de referencia, según Penman Monteith corresponde a un cultivo hipotético que tiene una altura de 12 cm, una resistencia de cubierta de 69 m/s, una resistencia aerodinámica de 208/U<sup>2</sup> s/m, donde U es la velocidad del viento a dos metros de altura; y un albedo de 0.23. La ecuación utiliza datos climáticos de radiación solar, temperatura del aire, humedad y velocidad del viento.

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_{n--} - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \dots\dots\dots 11$$

Donde:

- ET<sub>o</sub> : Evapotranspiración de referencia (mm/día).
- R<sub>n</sub> : Radiación neta en la superficie del cultivo (MJ/m<sup>2</sup> día).
- R<sub>a</sub> : Radiación extraterrestre (mm/día).
- G : Flujo del calor del suelo (MJ /m<sup>2</sup> día).
- T : Temperatura media del aire a 2 m de altura (°C).
- U<sub>2</sub> : Velocidad del viento a 2 m de altura (m/s).
- e<sub>s</sub> : Presión de vapor de saturación (kPa).
- e<sub>a</sub> : Presión real de vapor (kPa).
- e<sub>s</sub> – e<sub>a</sub> : Déficit de presión de vapor (kPa).
- Δ : Pendiente de la curva de presión de vapor (kPa/°C).
- γ : Constante psicométrica (kPa/°C).

Se calculan también cuando falta algún dato.

**e. Método de Blaney – Criddle.**

En 1986. Allen y Pruitt. Desarrollaron el método de Blaney y Cliddle con las modificaciones introducidas por Doorembos y Pruitt, con el fin de adaptarlas a la medida del Lisímetro y a su desviación estándar, teniendo en cuenta para ello la aridez del lugar de ubicación de la estación y su entorno. La expresión se presenta como:

$$ET_o = a + b.f \left[ 1 + \frac{Alt}{10^4} \right] \dots\dots\dots 12$$

$$f = p.(0.457T + 0.13) \dots\dots\dots 13$$

Donde:

- ET<sub>o</sub> : Evapotranspiración de referencia (mm/día).
- f : Factor de uso consuntivo (mm/día).
- Alt : Altura m.s.n.m.
- a,b : Constantes para estimar la evapotranspiración de referencia en función de humedad relativa y viento.

T : Temperatura media del aire (°C).

En relación con los valores de f de Blaney – Criddle determinados de este modo, se indican en el Anexo 17 las relaciones recomendadas para determinar las estimaciones de la ETo.

**f. Método de Jensen – Haise.**

$$ET_o = C_t(T - T_x)R_s \dots\dots\dots 14$$

$$C_t = \frac{1}{38 - \frac{h}{152.5} + \frac{380}{e_2 - e_1}} \dots\dots\dots 15$$

$$T_x = -2.5 - 0.14 * \left( e_2 - e_1 - \frac{h}{550} \right) \dots\dots\dots 16$$

$$e = 6.108 * \exp\left(\frac{17.27T}{T + 237.3}\right) \dots\dots\dots 17$$

Donde:

ET<sub>o</sub> : Evapotranspiración de referencia (mm/día).

R<sub>s</sub> : Radiación solar incidente a nivel del suelo en (mm/día).

T : Temperatura media del aire (T<sub>max</sub>+T<sub>min</sub>)/2 (°C).

C<sub>t</sub> y T<sub>x</sub> : Coeficientes.

h : Altitud m.s.n.m.

e : Presión de vapor a saturación (mbar) correspondiente a la temperatura T (°C).

**Nota:** La formula se aplica dos veces, con la temperatura mínima y máxima, obteniendo respectivamente e1 y e2.

$$R_s = \left(0.18 + 0.55 \frac{n}{N}\right) R_o \dots\dots\dots 18$$

Donde:

R<sub>o</sub> : Radiación extraterrestre expresada en mm/día de evaporación ò Radiación solar si no existiera atmósfera (Anexo 02).

n : Numero de horas de sol reales.

N : Numero máximo teórico de horas de sol (Anexo 02).

**3.4.6 Calculo de ETc bajo condiciones de estrés hídrico**

Las fuerzas que actúan sobre el agua presente en el suelo disminuyen su energía potencial y la hacen menos disponible para su extracción por parte de las raíces de las plantas. Cuando el suelo se encuentra húmedo, el agua presente tiene una energía potencial alta, teniendo libertad de movimiento y pudiendo ser extraída fácilmente por las raíces de las plantas. En suelos secos el agua tiene una energía potencial baja, siendo retenida fuertemente por fuerzas capilares y de adsorción a la matriz del suelo, lo que la hace menos extraíble por el cultivo.

Cuando la energía potencial del agua del suelo cae por debajo de cierto valor umbral, se dice que el cultivo se encuentra estresado. Los efectos del estrés hídrico son incorporados al multiplicar el coeficiente basal del cultivo por el coeficiente de estrés hídrico, Ks:

$$ET_{c-aj} = K_s * K_c * ET_o \dots\dots\dots 21$$

Donde:

Ks : Coeficiente de estrés hídrico en la transpiración del cultivo y no a la evaporación del suelo.

Ks < 1 : Cuando se producen limitaciones debido a la disponibilidad de agua en el suelo.

Ks=1 : Cuando no existan condiciones de estrés por falta de humedad del suelo.

Agua disponible total (ADT):

$$ADT = 1000(\theta_{FC} - \theta_{wp})Z_r \dots\dots\dots 22$$

Agua fácilmente aprovechable (AFA):

$$AFA = p.ADT \dots\dots\dots 23$$

$$p = p + 0.04(5 - ET_c) \quad \dots \dots \dots 24$$

Para  $D_r > AFA$ :

$$K_s = \frac{ADT - D_r}{ADT - AFA} \dots \dots \dots 25$$

Donde:

ADT : Total de agua disponible en la zona radicular del suelo (mm).

$\theta_{FC}$  : Contenido de Humedad a Capacidad de Campo ( $m^3/m^3$ ).

$\theta_{WP}$  : Contenido de Humedad en el punto de marchites permanente ( $m^3/m^3$ ).

$Z_r$  : Profundidad de las raíces (m).

AFA : Agua fácilmente aprovechable (extraíble) de la zona radicular del suelo (mm).

$p$  : Fracción promedio del agua disponible total en el suelo (ADT) que puede ser agotada de la zona radicular antes de presentar estrés hídrico (reducción de la ET) (0-1).

$K_s$  : Es un factor adimensional de reducción de transpiración que dependen de la cantidad de agua disponible en el suelo (0-1).

$D_r$  : Agotamiento de humedad en la zona radicular (mm).

Nota: Cuando el agotamiento en la zona radicular sea menor que AFA,  $K_s = 1$ .

### 3.4.7 Determinación de necesidades hídricas (ETb) del bofedal por método directo de lisímetros

La evapotranspiración real (ETb) del bofedal se determinó mediante el **balance hídrico** de entradas y salidas de agua en cada lisímetro instalado (L1, L2 y L3) en los cuatro bofedales de puna seca y húmeda, en donde se registraron lecturas de volumen de agua de riego y drenaje de cada Lisímetro con intervalos de riego a cada cuatro a siete días durante los 12 meses de estudio para observar la variación durante los meses y entre localidades del bofedal.

Foto 12. Lisímetros instalados en los bofedales de puna seca y húmeda.



El balance hídrico se calculo mediante la ecuación siguiente:

$$E_{tb} = V_r + V_{pp} - V_d \pm \Delta \dots\dots\dots 26$$

Donde:

- $E_{tb}$  : Evapotranspiración del bofedal (lt).
- $V_r$  : Volumen de agua regado (lt).
- $V_{pp}$  : Volumen de precipitación (lt).
- $V_d$  : Volumen de agua drenada (lt).
- $\Delta$  : Contenido de humedad.

**Agotamiento inicial:**

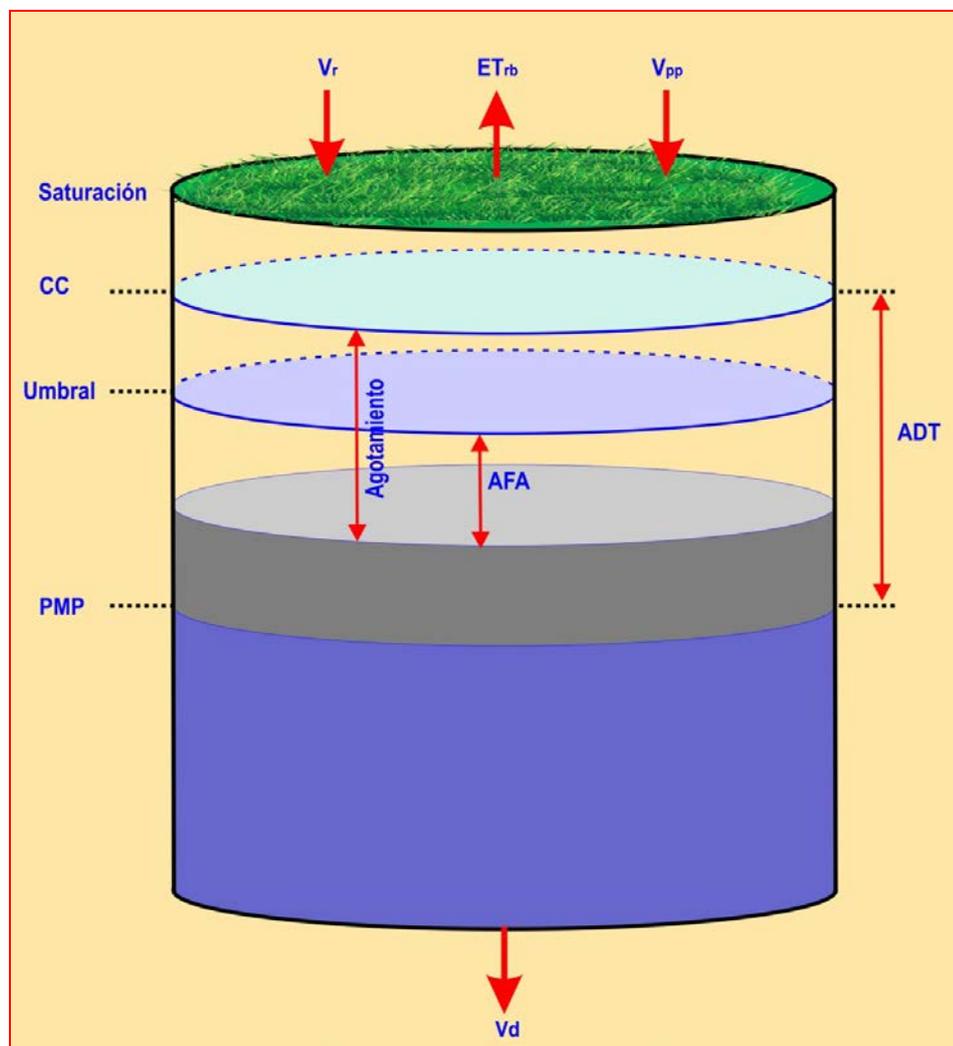
$$D_{r,i} = 1000(q_{FC} - q_{i-1})Z_r \dots\dots\dots 27$$

Donde:

- $D_{r,i}$  : Agotamiento de humedad en la zona radicular (mm).
- $q_{FC}$  : Contenido de humedad a capacidad de campo.
- $q_{i-1}$  : Contenido de humedad promedio en la profundidad efectiva.
- $Z_r$  : Profundidad de las raíces (m).

Cuando el agotamiento en la zona radicular sea menor que AFA,  $K_s = 1$ .

Figura 13. Balance de agua en la zona radicular del bofedal (FAO, 2006).



### 3.4.8 Determinación del coeficiente del cultivo ( $K_c$ ) del bofedal

El coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) se determinó utilizando la fórmula general recomendada por la FAO N° 56, cuya ecuación empírica es:

$$K_c = \frac{ET_r}{ET_o} \dots \dots \dots 28$$

Donde:

$K_c$  : Coeficiente de cultivo en bofedales.

$E_{Tr}$  : Evapotranspiración real del bofedal determinada mediante método directo de lisímetros (mm/día).

$E_{To}$  : Evapotranspiración de referencia calculado por métodos indirectos (mm/día).

### 3.5 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

#### 3.5.1 Diseño experimental

Las variables son: volumen de agua; tipo de vegetación, tipo de suelo y altitud. Para la determinación de las necesidades hídricas de los bofedales se ha utilizado Diseño de Bloques Completamente al Azar con 12 repeticiones que son los meses (bloques) en cada tratamiento y 4 tratamientos que son los bofedales (02 en puna seca y 02 en puna húmeda) que hacen un total de 4 tratamientos, cuyo modelo lineal aditivo es el siguiente:

$$Y_{ij} = u + T_i + B_j + E_{ij} \dots\dots\dots 29$$

Donde:

$Y_{ij}$  : Unidad Experimental (bofedal) que recibe el tratamiento (i) y que está el bloque (j).

$u$  : Verdadero efecto medio o común de toda las observaciones.

$B_j$  : Verdadero efecto del i-ésimo bloque; (12 meses).

$T_i$  : Verdadero efecto del i-ésimo tratamiento;( bofedales).

$E_{ij}$  : Error Experimental (i = 1, 2, 3, .....T; es el numero de tratamientos y j = 1, 2, 3, .....n; es el número de bloques).

Se aplicara análisis de varianza con nivel de significancia de 0.05, con los siguientes grados de libertad G.L.: Tratamientos (t-1), Repeticiones ( r ), Bloque ( r - 1), Error ( r - 1)\*(t - 1), Total (rt - 1).

Y cada una de estas se tiene suma de cuadrados (SC), cuadrados medios (CM) y F calculada (fc) y se calculara F tabular (ft) y su respectiva interpretación estadística.

### 3.5.2 Regresión y correlación múltiple

Para conocer la influencia de la temperatura máxima y mínima del aire (°C), evaporación (mm), radiación solar (mm), humedad relativa (%) y velocidad del viento (m/s) en la evapotranspiración real en los cuatro bofedales (mm), se realizó el análisis de regresión y correlación múltiple, cuyo análisis se realizó con el software InfoStat y R.

Formula de regresión múltiple.

$$\hat{Y}_{ij} = b_0 + b_1 X_{i1} + b_2 X_{i2} + b_3 X_{i3} + b_4 X_{i4} \dots\dots\dots 30$$

Donde

- $X_{i1}$  : Temperatura del aire.
- $X_{i2}$  := Radiación solar extraterrestre.
- $X_{i3}$  : Evaporación.
- $X_{i4}$  : Velocidad del viento.

Formula de correlación múltiple.

$$R = \sqrt{\frac{SC_r}{SC_t}} \dots\dots\dots 31$$

Donde:

- SCr = Suma de cuadrado de la regresión.
- SCt = Suma de cuadrado total.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 HIDROLOGÍA Y METEOROLOGÍA EN LOS BOFEDALES

4.1.1 Información meteorológica e hidrológica histórica

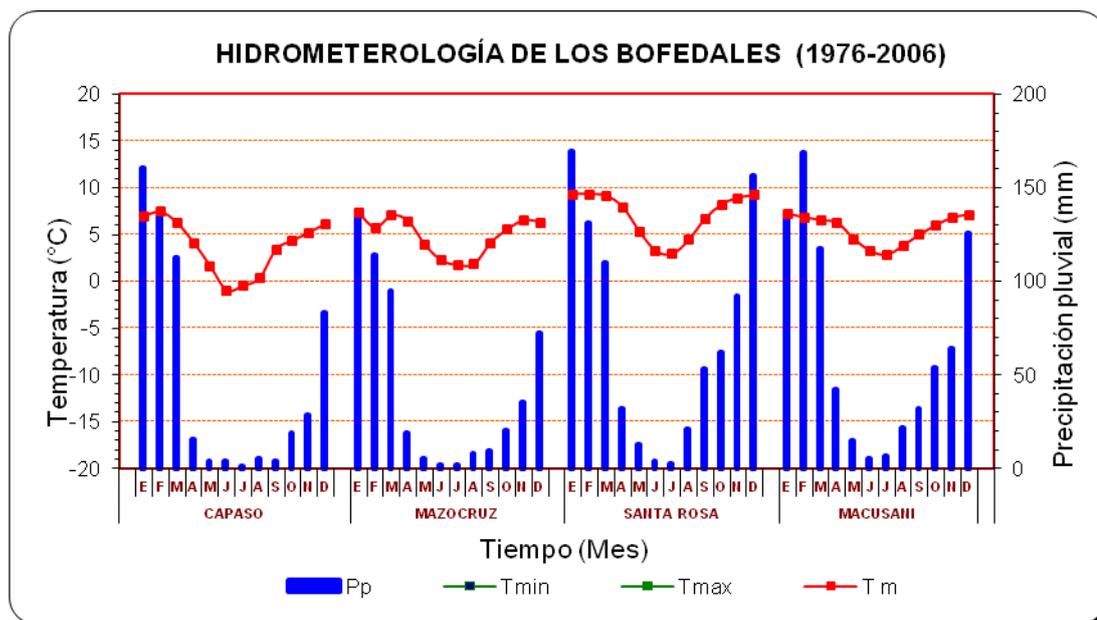
La información hidrológica y meteorología histórica que se presentan a continuación corresponden a la información meteorológica normal (promedio de 30 años) registradas por las Estaciones de SENAMHI Puno (Cuadro 09).

Cuadro 09. Información hidrometeorológica histórica de las estaciones.

Loc	Descripción	MESES												Media/ Total
		E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
Capaso	T m (°C)	6.9	7.4	6.2	4.1	1.6	-1.0	-0.5	0.3	3.4	4.3	5.2	6.1	3.7
	Pp (mm)	160.5	138.1	112.4	15.7	4.1	3.8	1.1	5.2	3.6	19.2	28.5	83.0	575.2
Mazocruz	T m (°C)	7.3	5.7	7.0	6.4	3.9	2.2	1.7	1.8	4.1	5.5	6.5	6.3	4.9
	Pp (mm)	138.0	114.0	95.0	19.0	5.0	2.0	2.0	8.0	9.0	20.0	35.0	72.0	519.0
Sta. Rosa	T m (°C)	9.3	9.3	9.1	7.9	5.3	3.2	2.9	4.4	6.7	8.2	8.9	9.2	7.0
	Pp (mm)	169.4	131.0	109.8	31.9	12.8	3.6	2.3	21.3	53.0	62.0	92.4	156.3	845.8
Macusani	T m (°C)	7.2	6.8	6.5	6.2	4.5	3.2	2.8	3.8	5.0	6.0	6.8	7.1	5.5
	Pp (mm)	134.9	168.7	117.8	42.2	14.6	4.9	6.7	21.5	31.6	53.6	64.4	125.4	786.3

Fuente. SENAMHI Puno

Figura 14. Comportamiento de Precipitación Pluvial y Temperatura Media anual Histórica en las estaciones de SENAMHI.



Del cuadro 09 y figura 14. Se observa que el comportamiento de precipitaciones pluviales acumuladas y temperatura media anual en las estaciones ubicadas en puna seca son menores que a las estaciones que se encuentran en puna húmeda.

La precipitación pluvial acumulada en las estaciones de Santa Rosa y Macusani son de 845.8 mm y 786.3 mm respectivamente mayores que en las estaciones ubicadas en Capaso y Mazocruz que son de 575.2 mm y 519.0 mm de respectivamente.

La temperatura media anual en las estaciones de Santa Rosa y Macusani son de 7.0°C y 5.5°C respectivamente mayores que en las estaciones ubicadas en Capaso y Mazocruz que son de 3.5°C y 4.9°C respectivamente.

#### 4.1.2 Información meteorológica e hidrológica del año en estudio

La información hidrológica y meteorología diaria registrada por las Estaciones Hidrometeorológicas de SENAMHI cercanas a los bofedales identificadas.

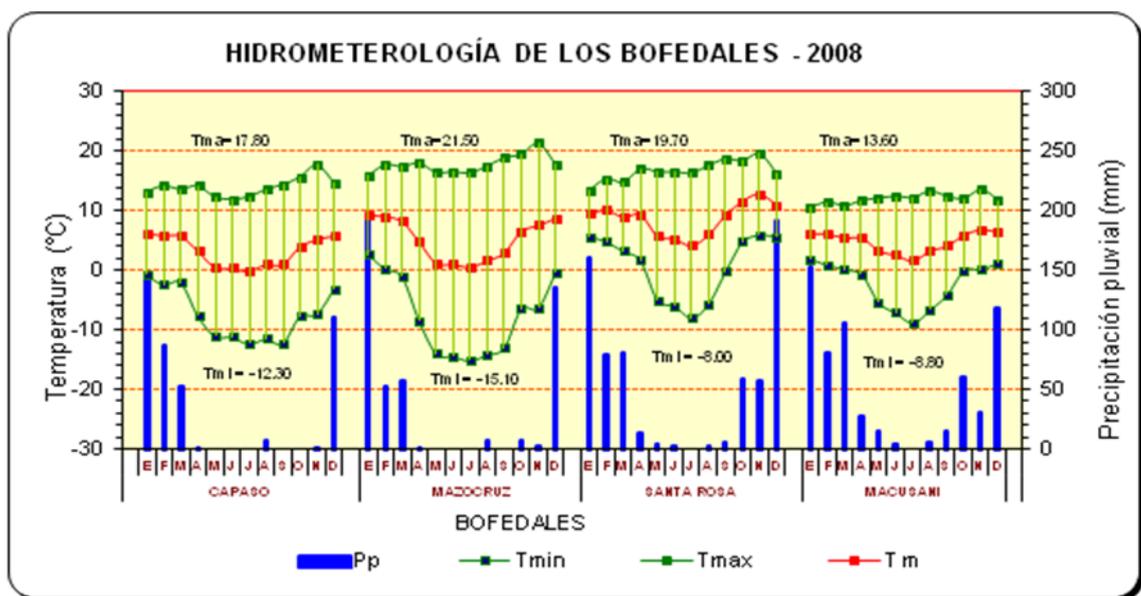
Cuadro 10. Información hidrometeorológica (2008) de las unidades experimentales.

Loc	Descripción	MESES												Media/Total
		E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
Capaso	T mín (°C)	-0.7	-2.4	-2.0	-7.5	-11.0	-11.1	-12.3	-11.5	-12.2	-7.7	-7.3	-3.1	-7.4
	T máx (°C)	13.2	14.2	13.6	14.2	12.3	11.9	12.3	13.6	14.4	15.7	17.8	14.7	14.0
	T m (°C)	6.3	5.9	5.8	3.4	0.7	0.4	0.0	1.1	1.1	4.0	5.3	5.8	3.3
	Pp (mm)	146.0	86.9	53.2	1.5	0.0	0.0	0.0	6.6	0.0	0.0	0.6	110.7	405.5
Mazocruz	T mín (°C)	2.7	0.3	-1.0	-8.4	-13.9	-14.4	-15.1	-14.1	-13.0	-6.4	-6.3	-0.4	-7.5
	T máx (°C)	15.9	17.8	17.5	18.1	16.5	16.6	16.4	17.6	19.0	19.6	21.5	17.9	17.9
	T m (°C)	9.3	9.1	8.3	4.9	1.3	1.1	0.6	1.8	3.0	6.6	7.6	8.8	5.2
	Pp (mm)	194.4	52.7	57.9	1.4	0.0	0.0	0.0	6.4	0.0	6.3	3.0	135.2	457.3
Sta. Rosa	T mín (°C)	5.7	4.8	3.2	1.7	-5.0	-5.9	-8.0	-5.6	-0.2	4.8	5.9	5.7	0.6
	T máx (°C)	13.5	15.4	14.8	17.1	16.6	16.6	16.4	17.7	18.8	18.5	19.7	16.3	16.8
	T m (°C)	9.6	10.1	9.0	9.4	5.8	5.4	4.2	6.1	9.3	11.7	12.8	11.0	8.7
	Pp (mm)	161.3	79.1	79.9	12.6	4.2	2.6	0.0	2.4	4.8	59.0	56.9	191.8	654.6
Macusani	T mín (°C)	1.9	0.9	0.2	-0.7	-5.4	-7.1	-8.8	-6.6	-4.1	0.0	0.2	1.2	-2.4
	T máx (°C)	10.6	11.4	10.8	11.7	12.1	12.4	12.2	13.3	12.4	12.0	13.6	11.7	12.0
	T m (°C)	6.3	6.2	5.5	5.5	3.4	2.7	1.7	3.4	4.2	6.0	6.9	6.5	4.8
	Pp (mm)	152.4	81.3	106.0	27.0	14.2	4.0	0.0	6.0	14.7	61.0	31.2	118.3	616.1

Fuente. SENAMHI Puno.

En las estaciones analizadas, la distribución anual de las temperaturas medias mensuales tiene escasa variación a lo largo del año; es decir, son similares durante el verano e invierno; sin embargo, los valores mínimos medios mensuales tienen una diferencia apreciable. Esto representa una cierta estacionalidad térmica. (Cuadro 10). En los meses más fríos (junio y julio) existen notorias diferencias térmicas entre el sol y la sombra, entre el día y la noche.

Figura 15. Comportamiento de precipitación pluvial y temperatura máxima, mínima y media anual en las estaciones de SENAMHI.



En Mazocruz y Capaso de puna seca las temperaturas mínimas nocturnas o de madrugada permanecen por debajo de 0°C durante la mayor parte del año, llegando a promedio mínimo media mensual de hasta -15.1°C (julio). Esto supone que las mínimas absolutas alcanzan valores negativos por debajo de -20°C, manifestándose situaciones severas de congelamiento muy inferior a las estaciones de Santa Rosa y Macusani de puna húmeda como se observa en el cuadro 10 y figura 15.

En la figura 08, se observan considerables variaciones de amplitud térmica diaria; sin embargo, la amplitud térmica estacional no presenta variaciones tan sensibles entre los diversos meses del año, especialmente con respecto a las temperaturas máximas diurnas a lo largo del año. En los meses de verano (diciembre-marzo) se caracteriza por presentar frecuente nubosidad y hace que las temperaturas máximas del día no

resulten muy elevadas; la misma que reduce las pérdidas de calor por irradiación terrestre nocturna, haciendo que en estos meses las temperaturas nocturnas no descieran demasiado, cosa que sí ocurren en los meses de invierno, generalmente de cielos muy despejados, que facilitan la rápida irradiación terrestre que retorna hacia el espacio la radiación recibida durante el día.

La precipitación pluvial total mensual en las estaciones de Santa Rosa y Macusani de puna húmeda registran 654.6 mm y 616.1 mm respectivamente, superiores a los registros obtenidos en las estaciones de Mazocruz y Capaso correspondiente a puna seca que registran 457.3mm y 405.5mm respectivamente.

La precipitación pluvial muestra extremas variaciones por estación de diciembre a marzo. Las lluvias son más frecuentes con mayor intensidad y persistencia. Totalizan entre 70 a 80% de lluvia promedio anual; en cambio en los meses de junio, julio y agosto las precipitaciones son casi nulas, mientras en los meses de otoño (abril y mayo) y primavera (setiembre a noviembre) la precipitación pluvial es escasa, pudiendo registrar mayor variación de la precipitación durante los meses de primavera y una variación menor en otoño. (Figura 15).

## 4.2 TEMPERATURA Y CONTENIDO DE HUMEDAD DEL SUELO

### 4.2.1 Temperatura del suelo

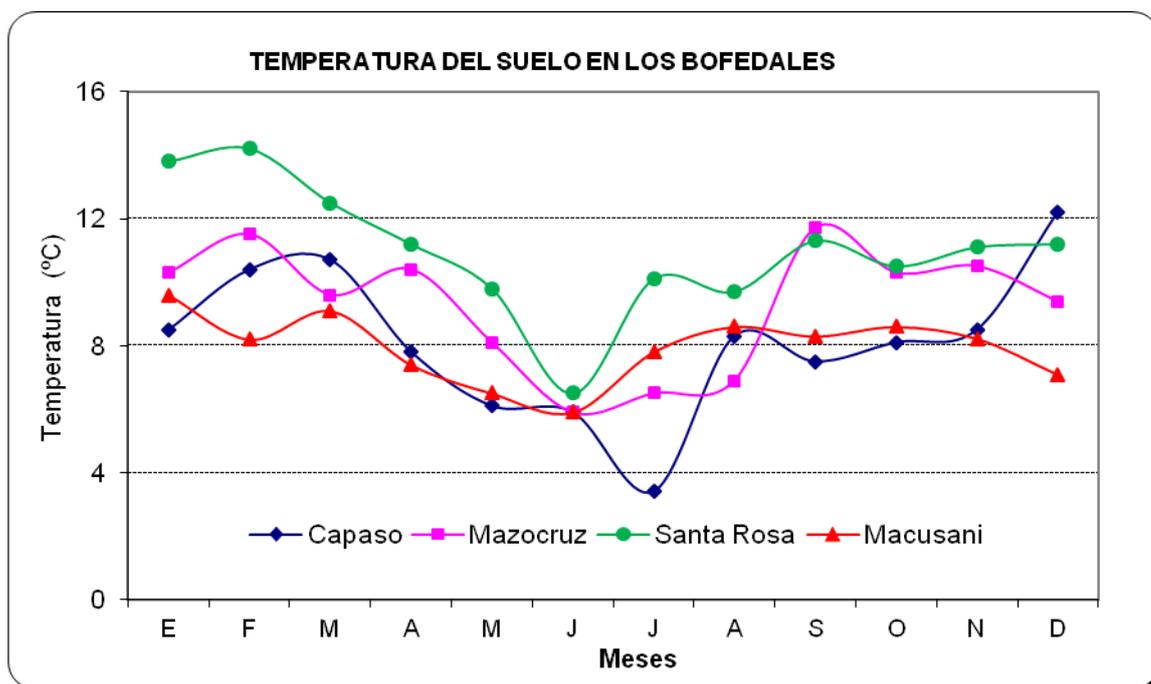
Los resultados de registro de temperaturas del suelo a 15 cm. de profundidad por debajo de la superficie, se muestran en el siguiente cuadro 11.

Cuadro 11. Temperatura del suelo en los bofedales de puna seca y húmeda.

Bofedal	Meses												Media
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
Capaso	8.50	10.40	10.70	7.80	6.10	5.90	3.40	8.30	7.50	8.10	8.50	12.20	8.12
Mazocruz	10.30	11.50	9.60	10.40	8.10	5.90	6.50	6.90	11.70	10.30	10.50	9.40	9.26
Santa Rosa	13.80	14.20	12.50	11.20	9.80	6.50	10.10	9.70	11.30	10.50	11.10	11.20	10.99
Macusani	9.60	8.20	9.10	7.40	6.50	5.90	7.80	8.60	8.30	8.60	8.23	7.10	7.94
<b>Media</b>	<b>10.55</b>	<b>11.08</b>	<b>10.48</b>	<b>9.20</b>	<b>7.63</b>	<b>6.05</b>	<b>6.95</b>	<b>8.38</b>	<b>9.70</b>	<b>9.38</b>	<b>9.58</b>	<b>9.98</b>	<b>9.08</b>

Fuente: Elaboración propia.

Figura 16. Temperatura del suelo en bofedales de puna seca y húmeda.



En el cuadro 11 se observa que en el bofedal de Santa Rosa (puna húmeda) registra mayor temperatura del suelo en comparación a los demás bofedales, seguido por el bofedal de Mazocruz (puna seca); el bofedal de Capaso en el mes de julio registra la temperatura del suelo más baja de 3.40°C.

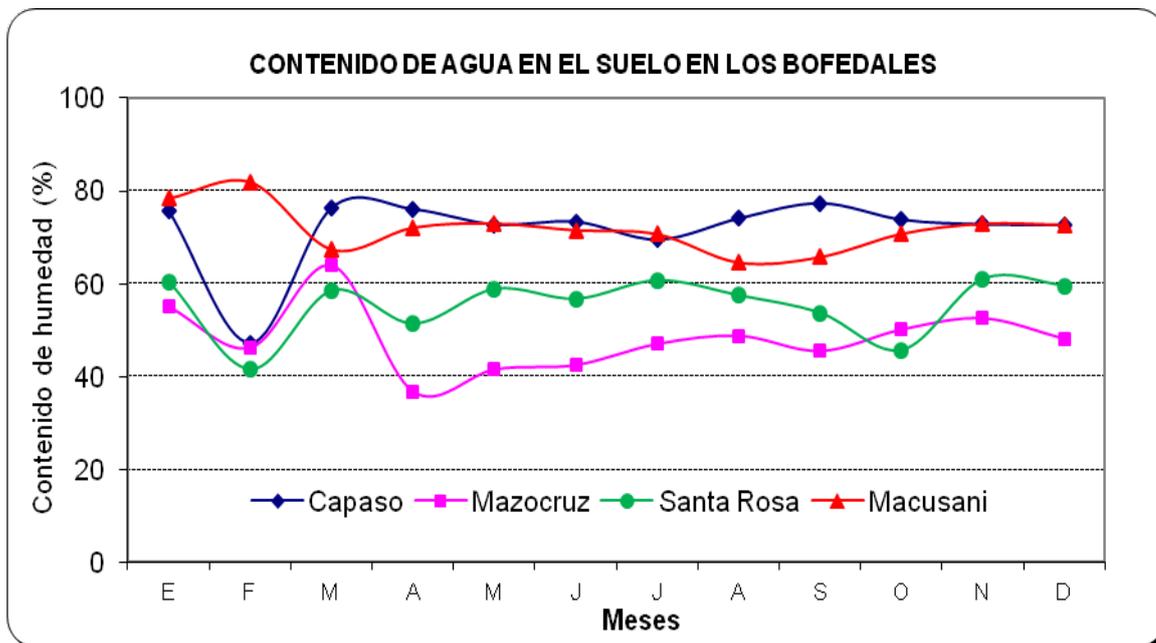
#### 4.2.2 Contenido de humedad del suelo

Cuadro 12. Contenido de humedad del suelo (%) en los bofedales de puna seca y húmeda.

Bofedal	Meses												Media
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
Capaso	75.64	47.24	76.45	76.10	72.79	73.39	69.54	74.10	77.37	73.82	72.81	72.68	71.83
Mazocruz	55.03	46.21	64.03	36.65	41.52	42.46	47.04	48.78	45.48	50.15	52.57	48.10	48.17
Santa Rosa	60.32	41.61	58.49	51.42	58.83	56.71	60.67	57.44	53.69	45.76	60.99	59.58	55.46
Macusani	78.48	81.96	67.35	72.16	73.01	71.56	70.70	64.54	65.75	70.80	72.99	72.73	71.84
Media	67.37	54.26	66.58	59.08	61.54	61.03	61.99	61.22	60.57	60.13	64.84	63.27	61.82

Fuente: Elaboración propia.

Figura 17. Contenido de humedad del suelo en bofedales de puna seca y húmeda.



En el cuadro 12 se observa el comportamiento del contenido de humedad del suelo en los bofedales de puna seca y húmeda; los bofedales de Macusani y Capaso registran mayor contenido de humedad del suelo de bido a que tiene una relacion directa con la textura del suelo. Mientras los bofedales de Santa Rosa y Mazocruz tienen menor contenido de humedad.

Por otro en la Figura 17 y Cuadro 12 se observa que en los bofedales de Capaso, Mazrocruz y Santa Rosa registran que en el mes de febrero una norable dispimucion debido a que en estos meses se registro menor precipitacion pluvial.

### 4.3 COMPOSICIÓN FLORÍSTICA Y PRODUCCIÓN DE FORRAJE EN EL BOFEDAL

#### 4.3.1 Composición florística de los bofedales

Los resultados de la evaluación de composición florística en los cuatro bofedales de puna seca y húmeda se han agrupado en especies deseables, poco deseable e indeseables como se aprecian en el Cuadro 08.

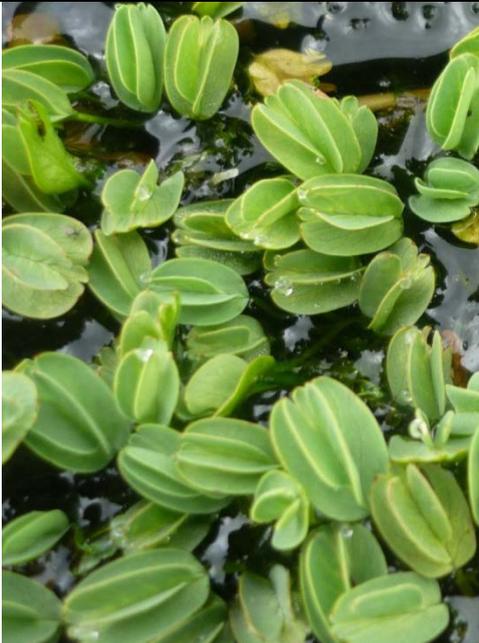
Cuadro 13. Composición florística en bofedales de puna seca y puna húmeda.

Nº	ESPECIES	CLAVE	Época de Lluvias (%)				Época Seca (%)			
			P. Seca		P. Húmeda		P. Seca		P. Húmeda	
			Ca	Mz	Sr	Mc	Ca	Mz	Sr	Mc
<b>DESEABLES</b>			<b>79.3</b>	<b>79.0</b>	<b>73.0</b>	<b>70.4</b>	<b>72.7</b>	<b>75.0</b>	<b>62.0</b>	<b>64.7</b>
1	<i>Alchemilla diplophylla</i>	Aldi	5.3	14.3	10.7	4.7	9.7	13.7	11.7	6.7
2	<i>Alchemilla erodifolia</i>	Aler			3.3	0.7			1.0	2.7
3	<i>Alchemilla pinnata</i>	Alpi	1.7	3.7			2.3	3.7		
4	<i>Caltha sagittata</i>	Casa	1.3	3.0	1.7	1.7	2.0	0.7		4.3
5	<i>Carex sp</i>	Carex	4.3	0.7	3.7	4.7	11.3	1.0		1.7
6	<i>Distichia muscoides</i>	Dimu	22.7		13.3	21.0	21.0		12.7	14.0
7	<i>Distichia sp</i>	Di sp	14.0	23.3	6.0		8.3	18.3		
8	<i>Eleocharis albibracteata</i>	Elal	9.3	6.3	7.0	5.7	4.0	3.7	2.0	2.7
9	<i>Festuca dolichophylla</i>	Fedo		0.3	2.3	0.3			3.7	4.0
10	<i>Gentiana peruviana</i>	Gepe				1.3				1.7
11	<i>Hypochoeris stenocephala</i>	Hyste	3.3	1.0	4.3	8.0	0.7	3.3	0.7	5.7
12	<i>Plantago tubulosa</i>	Platu	12.0	18.7	10.0	7.7	10.3	20.7	12.0	10.7
13	<i>Werneria nubigena</i>	Wenu	5.3	3.7	1.3	9.7	3.0	3.7	10.0	3.7
14	<i>Werneria pigmaea</i>	Wepi		4.0				6.3		
15	<i>Werneria sp</i>	Werneria			9.3	5.0			8.3	7.0
<b>POCO DESEABLES</b>			<b>13.3</b>	<b>17.3</b>	<b>24.7</b>	<b>17.7</b>	<b>14.0</b>	<b>19.7</b>	<b>26.0</b>	<b>20.7</b>
16	<i>Castilleja pumila</i>	Capu	1.3	1.3	0.3		1.3	2.3	0.0	
17	<i>Deyeuxia crhysantha</i>	Decrhy				3.3				2.0
18	<i>Deyeuxia rigescens</i>	Derig		6.7	4.0	5.7		5.7	6.7	7.0
19	<i>Liliopsis andicola</i>	Lian	1.0	2.7	10.7		1.7	2.7	11.0	
20	<i>Luzula peruviana</i>	Lupe				0.3				1.0
21	<i>Plántago rígida</i>	Plari	10.3	3.0	7.0	7.3	9.3	5.0	7.7	9.3
22	<i>Ranunculus flabellitormis</i>	Rafla	0.7	3.7	2.7	1.0	1.7	4.0	0.7	1.3
<b>INDESEABLES</b>			<b>1.7</b>	<b>0.0</b>	<b>1.0</b>	<b>6.7</b>	<b>4.0</b>	<b>0.0</b>	<b>5.0</b>	<b>5.7</b>
23	<i>Aciachne pulvinata</i>	Acpu			1.0	0.3			4.0	2.3
24	<i>Azorella diapensoides</i>	Azdi				4.3				2.0
25	<i>Oxychoe andina</i>	Oxan	1.7			2.0	4.0		1.0	1.3
<b>SIN VALOR FORRAJERO</b>			<b>5.7</b>	<b>3.7</b>	<b>1.3</b>	<b>5.3</b>	<b>9.3</b>	<b>5.3</b>	<b>7.0</b>	<b>9.0</b>
	Mantillo	M	3.7	1.3	0.3	0.7	7.0	3.0	5.0	3.3
	Suelo desnudo	D	2.0	2.0	1.0	4.7	2.3	2.0	1.7	5.7
	Roca	R		0.3				0.3	0.3	
<b>TOTAL</b>			<b>100.0</b>	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>

Fuente: Elaboración propia

Según el Cuadro 13, en la que se han identificado un total de 25 especies vegetales herbáceas tanto en época de lluvia y época seca.

Cuadro 14. Descripción de las principales especies en bofedales.

<b><u>Alchemilla diplophylla</u></b>	
<p><b>a) Ubicación Taxonómica</b>                      Familia: ROSACEAE                      Nombre Científico: <i>Alchemilla diplophylla</i>                      Nombres comunes: " Libro - libro"</p> <p><b>b) Descripción Morfológica:</b> Planta acuática o subacuática                      Raíz: Pequeña de 1 –3 cm                      Tallo: Delgadas                      Hojas: aovado cuneada que da la apariencia de doble superpuesta.                      Flores: Muy pequeñas, glabras, poco visibles.                      Fruto: Esquizocarpico.</p> <p><b>c) Hábitat:</b> Se encuentra en suelos húmedos, bordes de ríos y lagunas.</p> <p><b>d) Importancia y Uso:</b> Muy palatables, principalmente para las alpacas.</p>	

<b><u>Eleocharis albibracteata</u></b>	
<p><b>a) Ubicación Taxonómica</b>                      Familia: CYPERACEAE                      Nombre Científico: <i>Eleocharis albibracteata</i> Nees et Meyen                      Nombres comunes: Quemillo.</p> <p><b>b) Descripción Morfológica</b>                      Raíz: Fibrosas que nacen de los rizomas y estolones, rizomatosa, semihidrofítica.                      Tallo: delgados y erguidos. Sin nudos                      Hojas: Reducidas a una vaina que rodea la base de los tallos de color verde parduzco algo escamosas.                      Flores: El perianto con cerdas rígidas con pelos retrorsos, 3 estambres y gineceo súpero con estilo trífido.                      Fruto: Globoso.</p> <p><b>c) Hábitat:</b> Habita suelos húmedos, lagunas y bofedales. Prospera dentro de canales y camellones de waru waru.</p> <p><b>d) Importancia y Uso:</b> Es bastante apetecible por el ganado ovino, alpaquero y bovino, forma un césped suave de estrato bajo en áreas inundables.</p>	

**Plantago tubulosa**

**a) Ubicación Taxonómica**

Familia: PLANTAGINACEAE

Nombre Científico: *Plantago tubulosa*  
Decne.

Nombres comunes:

**b) Descripción Morfológica:** Hierbas pigmeas, forman cojines planos y duros.

Raíz: Rizoma corto y grueso, con numerosas raíces adventicias.

Tallo: Acaule.

Hojas: En roseta basal, lanceoladas, más o menos dentadas o lobadas; de tamaño variable.

Flores: Unisexuales, escondidas entre las hojas, exponiendo solamente las anteras o el estilo.

Fruto: sostenido por un largo carpóforo, parecido a un tubo.

**c) Hábitat:** Bofedales y áreas cercanas a riachuelos.

**d) Importancia y Uso:** Planta formadora de bofedales en puna húmeda.



**Werneria nubigena**

**a) Ubicación Taxonómica**

Familia: ASTERACEAE.

Nombre Científico: *Werneria*

Nombres comunes: Algodonero, T'asta, Pachaj Chaki, Liriu.

**b) Descripción Morfológica:**

Raíz: Con rizoma oblicuo, del que nacen raíces perpendiculares, la base de la planta con presencia de pelos lanosos.

Tallo: Acaule.

Hojas: Glabras, lineales, verdes, con borde oscuro.

Flores: Margen blanco, ligulado; las flores del centro amarillas.

Fruto: Aquenio.

**c) Hábitat:** Crece en las lomas y laderas altas, más o menos húmedas, junto con *Deyeuxia* y Llapa (*Aciachne acicularis*).

**d) Importancia y Uso:** Especie forrajera de importancia alta para el ganado altoandino.



<b><i>Distichia muscoides</i></b>	
<p><b>a) Ubicación Taxonómica</b>  <b>Familia:</b> JUNACEAE  <b>Nombre Científico:</b> <i>Distichia muscoides</i> Nees et Meyen  <b>Nombres comunes:</b> Kunkuna, Orco tina, Waricha.</p> <p><b>b) Descripción Morfológica:</b> Planta que forma grandes almohadillas planas o convexas duras  <b>Raíz:</b> Profunda y ramificado.  <b>Tallo:</b> de 5 –10 cm, bastante foliado.  <b>Hojas:</b> numerosas hojas dísticas e imbricadas, de 4 - 7 mm. de largo con el ápice obtuso calloso  <b>Flores:</b> solitarias, situadas en el ápice de las ramas.  <b>Fruto:</b> globoso y alargado que sobresale de la masa compacta.</p> <p><b>c) Hábitat:</b> bofedales, bordes de manantiales, suelos anegados.</p> <p><b>d) Importancia y Uso:</b> Muy palatable para alpacas, cubre áreas considerables en puna sobre los 4 200 msnm.</p>	

Fuente: Elaboración propia

#### 4.3.2 Producción de forraje en bofedales

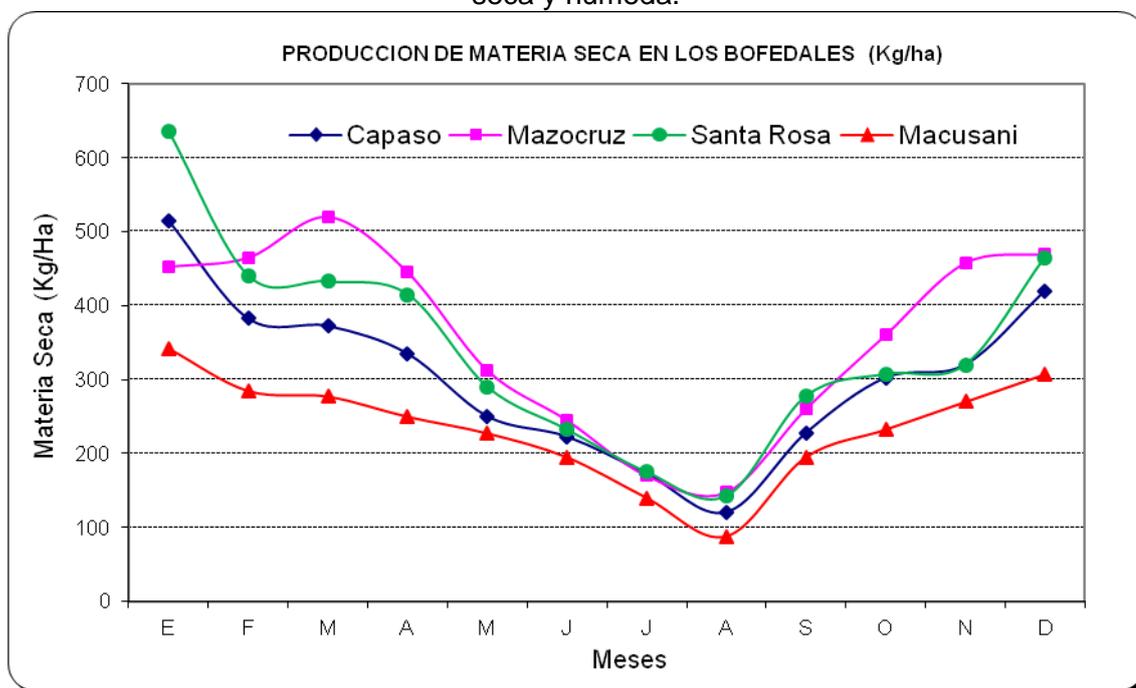
Los resultados de producción de materia seca para los cuatro bofedales por meses de cosecha se encuentran en el Cuadro 15, además podemos apreciar patrones diferentes de producción mensual en los bofedales (Figura 18).

Cuadro 15. Producción mensual de materia seca (kg/ha) en los cuatro bofedales.

Bofedal	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total	Media
Capaso	515.0	382.5	372.5	335.0	250.0	222.5	172.5	120.0	227.5	302.5	320.0	420.0	3640.0	303.3
Mazocruz	452.5	465.0	520.0	445.0	312.5	245.0	170.0	147.5	260.0	360.0	457.5	470.0	4305.0	358.8
Santa Rosa	635.0	440.0	432.5	415.0	290.0	232.5	175.0	142.5	277.5	307.5	320.0	465.0	4132.5	344.4
Macusani	342.5	285.0	277.5	250.0	227.5	195.0	140.0	87.5	195.0	232.5	270.0	307.5	2810.0	234.2
Media	486.3	393.1	400.6	361.3	270.0	223.8	164.4	124.4	240.0	300.6	341.9	415.6	3721.9	310.2

Fuente: Elaboración propia.

Figura 18. Variación de la producción de materia seca (kg/ha) en bofedales de puna seca y húmeda.



En el cuadro 16, se presenta el análisis de varianza para la producción mensual de materia seca de cuatro bofedales, donde se encontró alta significancia estadística entre meses de cosecha (M), lo que indica que existe diferencia en producción de materia seca entre los meses cosecha, principalmente por cuestiones climatológicas. Para bofedales (B), también se encontró una diferencia altamente significativa, lo cual indica que hay diferencias en producción de materia seca entre los cuatro bofedales al estar ubicado en diferentes lugares y condiciones climáticas.

Cuadro 16. Análisis de varianza para la producción de materia seca en los bofedales.

F. de V.	G.L.	S.C.	C.M.	F.c.	p-valor	Sig.
Meses (Bloque)	11	8.36	0.76	24.70	<0.0001	**
Bofedales (Tratamientos)	3	1.80	0.60	19.45	<0.0001	**
Error Experimental (Ee)	33	1.2	0.03			
Total	47	11.17				

CV = 14.14, R<sup>2</sup> = 0.91

El coeficiente de variabilidad fue 14.14 %, el cual indica que el experimento ha sido conducido en forma correcta dentro de los parámetros estadísticos permitidos, por lo tanto hay confiabilidad de los datos del experimento.

La prueba de comparación múltiple de Duncan del Cuadro 17, muestra el promedio de producción de materia seca de los cuatro bofedales en estudio. Donde, los bofedales de Mazocruz de puna seca y Santa Rosa de puna húmeda alcanzaron mayor producción de materia seca promedio de 358.75 kg/ha/mes y 344.38 kg/ha/mes respectivamente, superando estadísticamente a los restantes bofedales. En el bofedal de Capaso de puna seca obtuvo 303.33 kg/ha/mes de materia seca; Pero todos éstos bofedales superan al bofedal de Macusani ocupa el último lugar con 234.17 kg/ha/cosecha de materia seca.

Para los 12 meses de cosecha, el bofedal de Mazocruz y el bofedal de Santa Rosa, ocupan los primeros lugares con mayor producción acumulada anual de 4305 y 4132.5 kg/ha de materia seca, respectivamente. Mientras el Capaso ocupan el tercer lugar con una producción total acumulada de materia seca de 3640 kg/ha, y el bofedal de Macusani ocupa el último lugar con producción de 2810.0 kg/ha de materia seca.

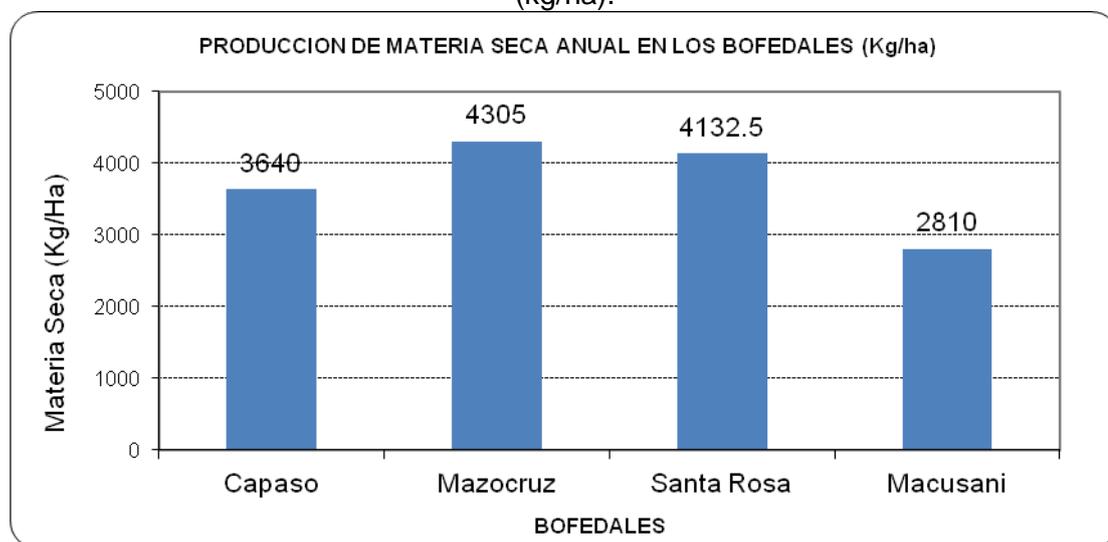
Cuadro 17. Prueba de de significancia Duncan ( $p:0.05$ ) para la producción de materia seca (MS), según tipo de bofedales (de enero a diciembre).

Nº	Bofedales	Zona agro ecológica	Promedio de MS mensual (kg/ha/mes)	Total acumulado anual MS kg/ha	Grupos		
1	Mazocruz	Puna seca	358.75	4305.0	A		
2	Santa Rosa	Puna húmeda	344.38	4132.5	A		
3	Capaso	Puna húmeda	303.33	3640.0		B	
4	Macusani	Puna seca	234.17	2810.0			C

Fuente: Elaboración propia con Software InfStat.

*Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p>0.05$ )*

Figura 19. Rango de variación de la producción de materia seca anual entre bofedales (kg/ha).



La prueba Duncan (Cuadro 18), muestra el promedio mensual de disponibilidad de materia seca de los cuatro bofedales. En el mes de enero se encontró mayor producción de materia seca 486.3 kg/ha superando a los otros meses de cosecha. No hubo diferencias estadísticas en la producción de materia seca entre los meses de diciembre, marzo y febrero de 415.6 kg/ha, 400.6 kg/ha y 393.1 kg/ha, respectivamente, También se puede observar que entre los meses de abril con 361.3 kg/ha y noviembre con 341.9 kg/ha, no difieren estadísticamente, pero son numéricamente superiores a los meses de octubre 306.0 kg/ha, mayo 270.0 kg/ha, setiembre 240.0 kg/ha y junio 223.8 kg/ha; menor producción corresponde a las cosechas efectuados en julio y agosto con 164.4 kg/ha y 124.4 kg/ha respectivamente, que estadísticamente son iguales.

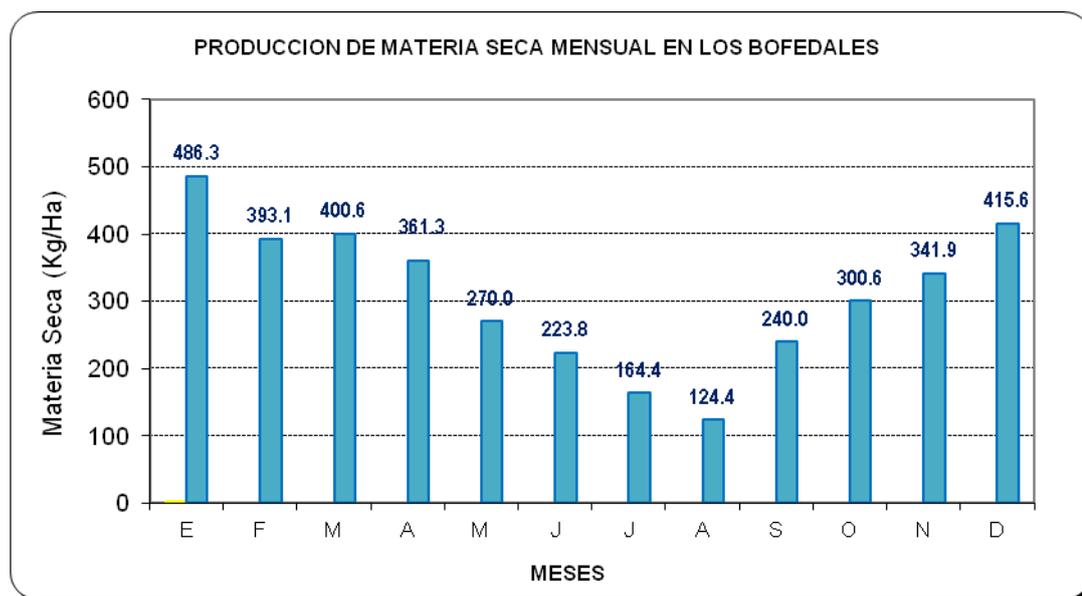
En resumen, en los cuatro bofedales se encontró una disponibilidad mensual promedio de materia seca de 310.20 kg/ha, con un rango de variación entre 124.4 kg/ha para la cosecha de agosto a 486.3 kg/ha para la cosecha de enero.

Cuadro 18. Prueba de Duncan para la producción mensual de materia seca (MS) en todos los bofedales según meses de cosecha.

Nº de Orden	Meses de Cosecha	MS Kg/ha/mes
1	Enero	486.3 A
2	Diciembre	415.6 B
3	Marzo	400.6 B C
4	Febrero	393.1 B C
5	Abril	361.3 C D
6	Noviembre	341.9 C D
7	Octubre	300.6 D E
8	Mayo	270.0 E F
9	Setiembre	240.0 E F
10	Junio	223.8 F G
11	Julio	164.4 G H
12	Agosto	124.4 H

Nota: Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )

Figura 20. Rango de variación de la producción de materia seca (kg/ha) entre meses de cosecha.



Al respecto RUIZ Y TAPIA (1987), indican que debido a la estacionalidad de lluvias y condiciones de temperatura y humedad del suelo adecuado, los pastizales tienen un período definido de crecimiento, así como un período de descanso en la época seca, ocasionando que la producción forrajera siga una curva de crecimiento concentrada en seis o siete meses del año. Este texto difiere un poco de los datos obtenidos en el presente trabajo mostrados en el cuadro 18, debido a que los datos obtenidos

muestran que no hubo un mes sin producción, porque los bofedales donde se hizo el trabajo fueron bofedales permanentes, por lo tanto la humedad del suelo fue casi constante, pero la producción mensual muestra una disminución de la misma en los meses de baja precipitación, esto está relacionado a otros factores como la disminución de la temperatura ambiental y la dormancia de algunas especies.

Por otro lado en lo referente a la producción de materia seca total, el INIA (2000), muestra evaluaciones realizadas en tres sectores de puna seca de el Collao; Sullkanaca, San José y Jihuaña ubicadas en diferentes altitudes, se obtuvo 8669.8, 6165.6 y 10875.7 kg MV/ha respectivamente, mientras que la biomasa aérea seca es de 3163.63; 2726.15 y 2978.35 kg MS/ha. Además al respecto ÁLVAREZ (1993), indica que la disponibilidad forrajera promedio en bofedales durante la época seca es 1,809.4 Kg MS/ha., por otro lado ALZÉRRECA (1983), indica que en estudios de balance y nutrición forrajera en áreas de producción de alpacas en Ulla Ulla, registran rendimientos de 8,000 Kg MS/ha en bofedal hídrico de *Calamagrostis crisantha*; alrededor de 9,000 Kg MS/ha en bofedal hídrico de *Oxychloe andina* y *Distichia muscoides*, aproximadamente 880 Kg MS/ha en bofedal méxico de *Carex sp.* y *Werneria pygmaea*; así como 1100 Kg MS/ha en praderas méxicas de tipo salina de *Calamagrostis curvula*. Estos datos demuestran que existe una diferencia de los valores de producción, esto debido a la gran variabilidad florística que existe en los bofedales, tipo de bofedal, altura sobre el nivel del mar, además de los factores climatológicos que también influyen en la producción.

#### 4.4 CALIDAD DE AGUA Y SUELO

##### 4.4.1 Calidad de agua en los bofedales

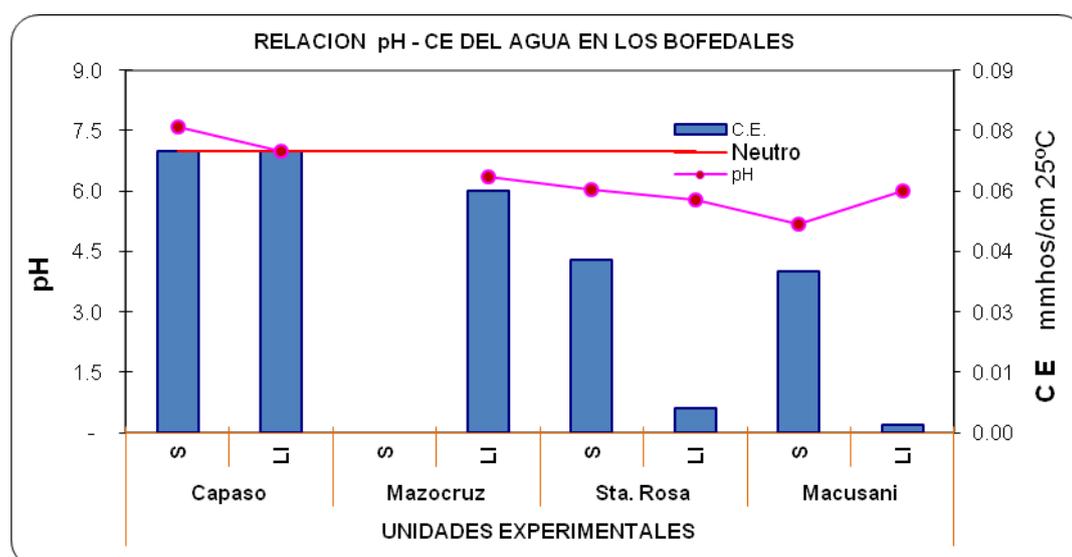
Para evaluar la calidad y características del agua se realizó análisis físico y químico de agua para fines de riego de los lisímetros para la investigación.

Cuadro 19. Análisis físico y químico del agua.

PARÁMETROS	Bofedal							
	Capaso		Mazocruz		Sta. Rosa		Macusani	
	S	LI	S	LI	S	LI	S	LI
Temperatura °C	12.90	17.50		17.60	21.70	16.10	14.00	16.10
pH	7.60	6.99		6.35	6.03	5.77	5.19	6.00
C.E.mmhos/cm 25°C	0.070	0.070		0.060	0.043	0.006	0.040	0.002
Ca meq/l.	0.10	0.60		0.40	0.70	0.30	0.25	0.30
Mg meq/l.	2.30	1.30		0.80	0.20	0.10	0.25	0.10
Na meq/l.	0.41	0.34		0.31	0.40	0.26	0.09	0.08
K meq/l.	0.24	0.70		0.67	0.70	0.07	0.30	0.11
<b>Suma de Cationes</b>	<b>3.05</b>	<b>2.94</b>	<b>-</b>	<b>2.18</b>	<b>2.00</b>	<b>0.73</b>	<b>0.89</b>	<b>0.59</b>
CO3 meq/l.	-	-		-	-	-	-	-
HCO3 meq/l.	6.80	0.40		0.60	0.30	0.70	1.50	0.50
Cl meq/l.	0.60	0.30		0.10	0.40	0.20	0.10	0.20
SO4 meq/l.	1.29	0.91		1.08	0.95	1.08	1.41	1.02
NO3 meq/l.	1.50	0.50		1.10	0.60	1.30	0.50	1.60
<b>Suma de Aniones</b>	<b>10.19</b>	<b>2.11</b>	<b>-</b>	<b>2.88</b>	<b>2.25</b>	<b>3.28</b>	<b>3.51</b>	<b>3.32</b>
SAR	0.36	0.34		0.40	0.23	0.58	0.01	0.17
Clasificación	C1S1	C1S2		C1S0	C1S1	C1S1	C1S1	C1S1

Fuente: Laboratorio de Aguas y Suelos de EEA Illpa Puno del INIA

Figura 21. Relación entre pH y Conductividad Eléctrica (CE) del agua en bofedales.



#### 4.4.2 Características físicas y químicas del suelo

En la investigación se tomo muestras seleccionadas de suelo que se colocaron en los Lisímetros, donde se determinó la textura, pH, la materia orgánica, boro, nitrógeno total, calcio, sodio, como se puede apreciar en el cuadro siguiente:

##### a) Análisis físico

Cuadro 20. Resultados de análisis físico del suelo de los bofedales.

Bofedal	Mtra	Análisis mecánico				Propiedades hídricas		
		Arena (%)	Arcilla (%)	Limo (%)	Textura	Cc (%)	Pm (%)	Agua Disponible
Capaso	1	38	13	49	F	17.67	9.48	8.19
Mazocruz	1	47	11	42	FA	15.79	8.30	7.49
	2	38	9	53	FL	16.40	8.68	7.72
Santa Rosa	1	46	9	45	F	15.29	7.98	7.30
Macusani	1	58	5	37	FA	12.35	6.14	6.21
	2	52	5	43	Fa	13.18	6.66	6.52
Media puna seca		41.00	11.00	48.00		16.62	8.82	7.80
Media puna húmeda		52.00	6.33	41.67		13.61	6.93	6.68

Fuente: Laboratorio de Aguas y Suelos de EEA Illpa Puno del INIA.

La textura del suelo de los bofedales de puna seca son bastante variables, pudiendo encontrar desde franco (F), franco arenoso (FA) y franco limoso (FL), este factor es importante porque permite el drenaje interno y flujo superficial del agua.

En bofedales de puna húmeda, esta característica de la textura se vuelve a manifestarse, es decir muestran desde franco arenoso (FA), franco arcilloso (Fa) y franco (F); en general, los suelos presentan un rango textural bastante variable pero con tendencia a franco arenoso a franco, bajo este medio existe flujo permanente de agua y el desarrollo constante de especies vegetales durante todo el año. Cuadro 14.

Mayor disponibilidad hídrica tienen los bofedales de puna seca en comparación a los bofedales de puna húmeda.

**b) Análisis químico.**

Cuadro 21. Resultados de análisis químico del suelo de los bofedales.

Bofedal	Mtra	Suelo: Agua 1:2:5		CO <sub>3</sub> Ca (%)	Mat. Org. (%)	N. Total (%)
		pH	C.E. mmhos/cm			
Capaso	1	5.10	0.331	-	3.77	0.14
Mazocruz	1	5.31	0.044	-	2.09	0.07
	2	5.52	0.077	-	2.09	0.08
Santa Rosa	1	4.99	0.151	-	3.62	0.13
Macusani	1	4.30	0.086	-	3.68	0.13
	2	4.00	0.037	-	3.68	0.13
Media puna seca		5.31	0.15	-	2.65	0.10
Media puna húmeda		4.43	0.09	-	3.66	0.13

Fuente: Laboratorio de Aguas y Suelos de EEA Illpa Puno del INIA.

De acuerdo a los resultados del análisis químico del suelo en bofedal según la ubicación geográfica; es decir, en puna seca los suelos muestran un pH que varía de 5.10 a 5.52, en promedio este valor representa 5.31 dentro de las propiedades químicas de la reacción del suelo, determinado por métodos electrométrico y nos permiten establecer que los suelos de los bofedales son moderadamente ácidos, apto para el crecimiento de la mayoría de especies forrajeras nativas. En condiciones de puna húmeda el pH del suelo de los bofedales muestra una variación de 4.00 a 4.99, siendo estos valores en promedio de 4.43 y dentro de las propiedades químicas de la reacción del suelo podemos establecer como muy fuertemente ácido a fuertemente ácido, apto para el crecimiento de pastos nativos que se adaptaron a este medio con marcadas limitaciones; las fuertes precipitaciones que se registran en los ecosistemas de puna húmeda son una de las causas del lavado de las bases y la alta acumulación de materia orgánica provocan este tipo de reacciones químicas.

La materia orgánica determinada en los suelos de bofedales de puna seca varían de 2.09% a 3.77%, estos valores están enmarcados dentro del rango bajo a medio, con una tendencia a alto; lo que significa que existe buena acumulación de materia orgánica en estos suelos y una pobre mineralización por encontrarse en altitudes

mayores a 4000 metros. En puna húmeda estos valores son marcadamente superiores y varían ligeramente entre bofedales (3.62% a 3.68%), definitivamente estos valores están enmarcados dentro del rango alto; es decir, existe una alta acumulación de materia orgánica a través de los años en estos suelos debido a una baja mineralización de este elemento, la causa principal son las bajas temperaturas, la altitud y pH bajo, limitando la cadena de la descomposición y la actividad microbiana.

### c) Análisis de Nutrientes.

Cuadro 22. Resultados de nutrientes del suelo en los bofedales.

Bofedal	Mtra	Nutrientes Disponibles				Boro Soluble (ppm)
		P (ppm)	K (ppm)	Mn (ppm)	Zn (ppm)	
Capaso	1	2.30	50.22	-	-	-
Mazocruz	1	5.40	59.62	-	-	-
	2	3.20	58.57	-	-	-
Santa Rosa	1	3.05	35.60	-	-	-
Macusani	1	3.95	42.90	-	-	-
	2	1.40	33.51	-	-	-
Media puna seca		3.63	56.14	-	-	-
Media puna húmeda		2.80	37.34	-	-	-

Fuente: Laboratorio de Aguas y Suelos de EEA Illpa Puno del INIA.

En el cuadro 16. En cuanto a los elementos mayores como el nitrógeno total, fósforo y potasio se precisa que en condiciones de puna seca, los suelos de los bofedales muestran muy bajo a bajo la proporción de nitrógeno total, bajo en fósforo y bajo en potasio; estos rangos descriptivos indican una pobre mineralización de la materia orgánica. Sin embargo, la alta acumulación de la materia orgánica juega un rol importante en la captación de agua como una esponja que permite el crecimiento y desarrollo permanente de la vegetación nativa. En condiciones de puna húmeda los suelos de los bofedales también son bajos en fósforo y potasio, debido a las razones señaladas en puna seca.

## d) Cationes Cambiables.

Cuadro 23. Resultados de cationes cambiables del suelo en los bofedales.

Bofedal	Mtra	Cationes Cambiables					CIC me/100g.	Σ de Aniones
		Al me/100g.	Ca me/100g.	Mg me/100g.	Na me/100g.	K me/100g.		
Capaso	1	0.05	16.50	4.70	0.87	1.93	10.30	34.35
Mazocruz	1	0.05	4.00	1.30	0.47	1.49	6.99	14.30
	2	T	2.80	2.60	0.46	1.48	7.10	14.44
Santa Rosa	1	0.10	5.20	3.80	0.18	0.78	8.99	19.05
Macusani	1	0.10	6.10	1.40	0.29	0.79	8.30	16.98
	2	0.15	5.30	3.20	0.32	1.00	10.00	19.97
<b>Media puna seca</b>		<b>0.05</b>	<b>7.77</b>	<b>2.87</b>	<b>0.60</b>	<b>1.63</b>	<b>8.13</b>	<b>21.03</b>
<b>Media una húmeda</b>		<b>0.12</b>	<b>5.53</b>	<b>2.80</b>	<b>0.26</b>	<b>0.86</b>	<b>9.10</b>	<b>18.67</b>

Fuente: Laboratorio de Aguas y Suelos de EEA Illpa Puno del INIA.

La fracción soluble en la que se encuentran los cationes y aniones en el suelo es la parte de los minerales que las plantas pueden tomar para realizar su metabolismo, mantenerse sanas y producir cosechas.

En el presente estudio se observa que la mayoría de cationes presentes, no pueden ser aprovechados por las plantas.

El sodio es un elemento que debe tenerse en consideración. En aquellos suelos con pH menor de 5 se debe preferir el empleo de Roca Fosfórica y Guano de Islas, pues dados sus orígenes marinos, traen consigo Sodio.

Los niveles de Potasio están en el límite inferior de escasez. Se debe incorporar Potasio en forma de Sulfatos.

### 4.5 EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO REFERENCIA (ET<sub>o</sub>)

La evapotranspiración de referencia se ha determinado mediante métodos indirectos utilizando datos meteorológicos:

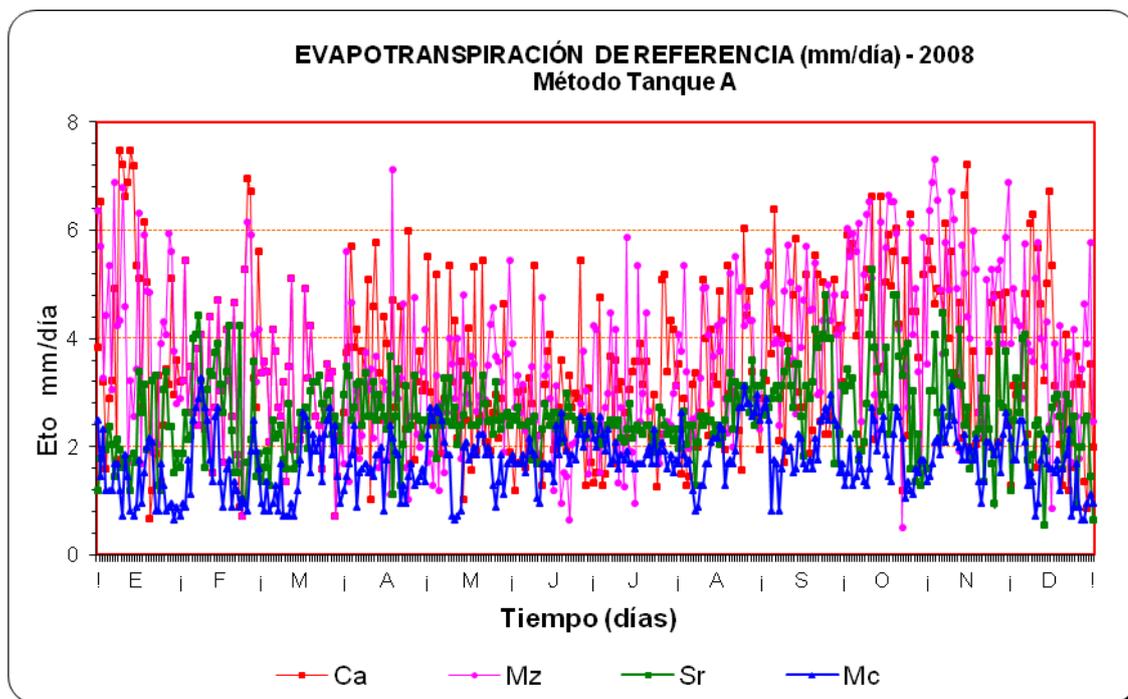
#### 4.5.1 Método del tanque evaporímetro Clase A

Cuadro 24. Evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) por método del Tanque A en bofedales de puna seca y húmeda.

Bofedal	Eto mensual (mm/día) Método Tanque A - 2008												Media
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	
Capaso	4.12	3.43	2.89	3.52	3.11	2.70	3.00	3.12	3.72	4.57	4.08	3.29	3.46
Mazocruz	4.16	3.40	2.86	3.00	3.06	2.52	2.77	3.72	4.30	4.71	5.02	3.68	3.60
Santa Rosa	2.10	2.74	2.35	2.68	2.60	2.41	2.31	2.57	3.16	2.96	2.81	2.25	2.58
Macusani	1.31	1.74	1.53	1.58	1.79	1.88	1.87	2.02	2.00	1.75	2.01	1.49	1.75
<b>Media</b>	<b>2.92</b>	<b>2.82</b>	<b>2.41</b>	<b>2.70</b>	<b>2.64</b>	<b>2.38</b>	<b>2.49</b>	<b>2.86</b>	<b>3.30</b>	<b>3.50</b>	<b>3.48</b>	<b>2.68</b>	<b>2.85</b>

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 22. Evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) por método de Tanque A en bofedales de puna seca y húmeda.



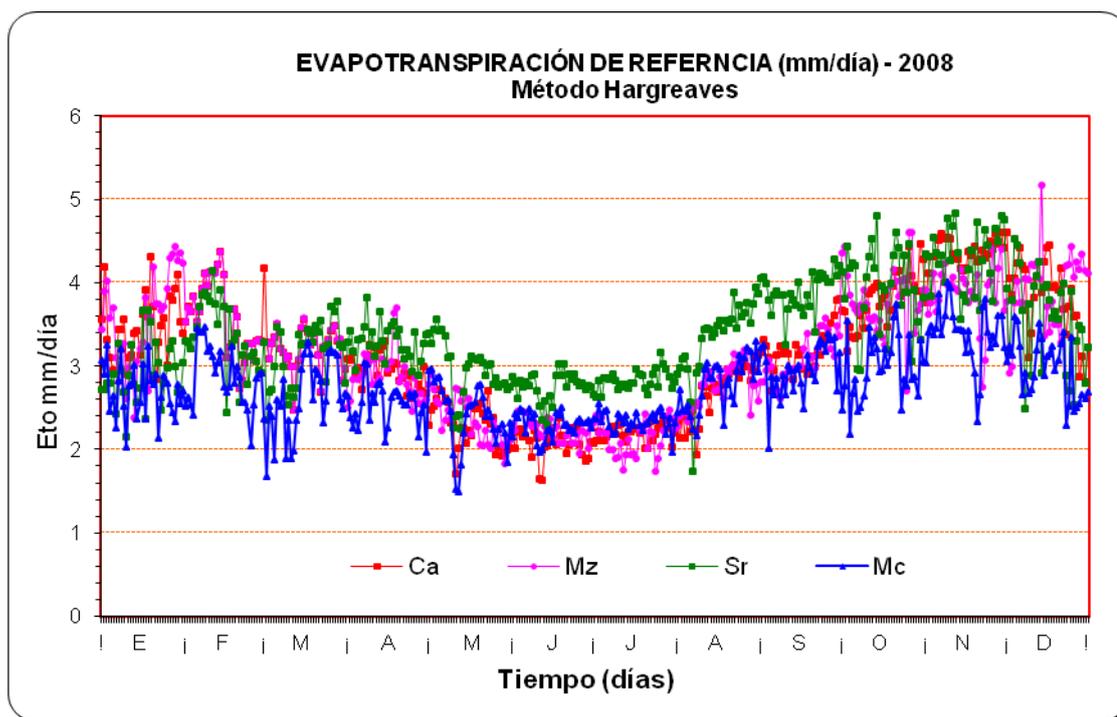
### 4.5.2 Método Hargreaves Modificado

Cuadro 25. Evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) por método de Hargreaves.

bofedral	Eto mensual (mm/día) Método Hargreaves - 2008												Media
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	
Capaso	3.47	3.59	3.23	2.95	2.30	2.08	2.20	2.68	3.19	3.81	4.35	3.84	3.14
Mazocruz	3.57	3.58	3.21	2.90	2.37	2.23	2.12	2.74	3.08	3.80	3.88	3.91	3.12
Santa Rosa	2.91	3.37	3.14	3.28	2.96	2.75	2.82	3.35	3.88	3.94	4.29	3.57	3.36
Macusani	2.70	2.88	2.61	2.54	2.40	2.29	2.34	2.77	2.96	2.98	3.39	2.98	2.74
<b>Media</b>	<b>3.16</b>	<b>3.35</b>	<b>3.05</b>	<b>2.92</b>	<b>2.51</b>	<b>2.34</b>	<b>2.37</b>	<b>2.89</b>	<b>3.28</b>	<b>3.63</b>	<b>3.98</b>	<b>3.58</b>	<b>3.09</b>

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 23. Evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) por método de Hargreaves modificado en bofedales de puna seca y húmeda.



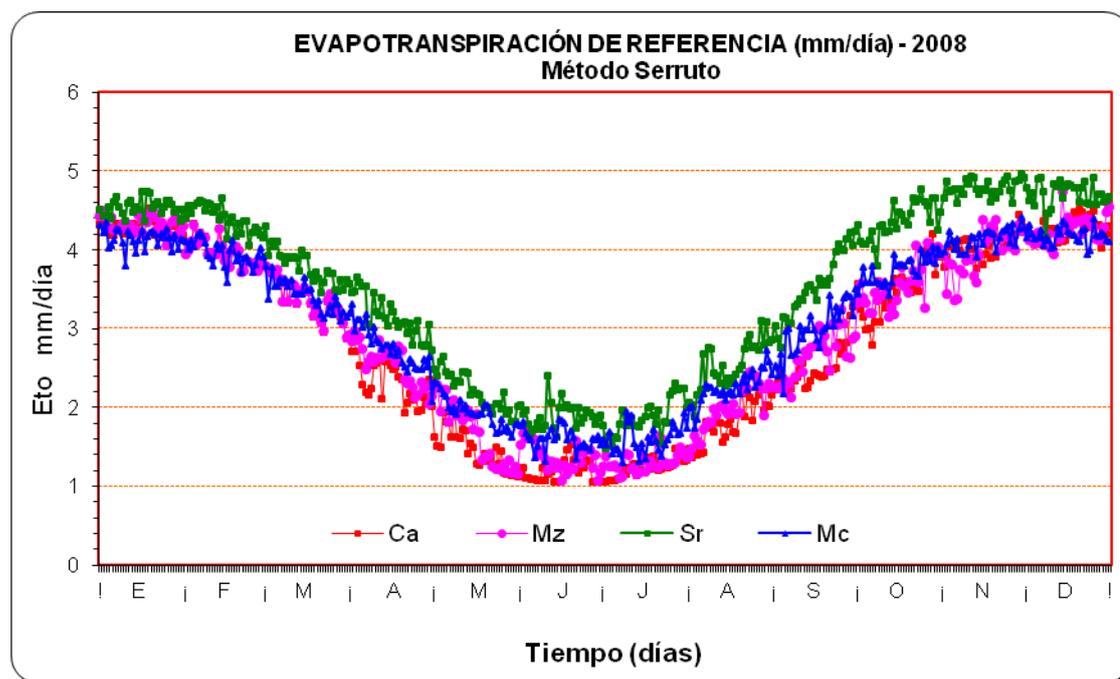
4.5.3 Método de Serruto

Cuadro 26. Evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) por método de Serruto.

Bofeadal	Eto mensual (mm/día) Método Serruto - 2008												Media
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	
Capaso	4.29	3.97	3.37	2.33	1.46	1.18	1.24	1.82	2.51	3.52	4.05	4.28	2.83
Mazocruz	4.32	3.96	3.38	2.54	1.66	1.37	1.31	1.99	2.66	3.57	3.97	4.25	2.91
Santa Rosa	4.54	4.40	3.79	3.15	2.20	1.90	1.87	2.54	3.54	4.37	4.79	4.71	3.48
Macusani	4.15	3.96	3.41	2.75	1.94	1.61	1.60	2.25	2.98	3.75	4.14	4.18	3.06
<b>Media</b>	<b>4.32</b>	<b>4.07</b>	<b>3.49</b>	<b>2.69</b>	<b>1.81</b>	<b>1.51</b>	<b>1.50</b>	<b>2.15</b>	<b>2.92</b>	<b>3.80</b>	<b>4.24</b>	<b>4.35</b>	<b>3.07</b>

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 24. Evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) por método de Serruto en bofedales de puna seca y húmeda.



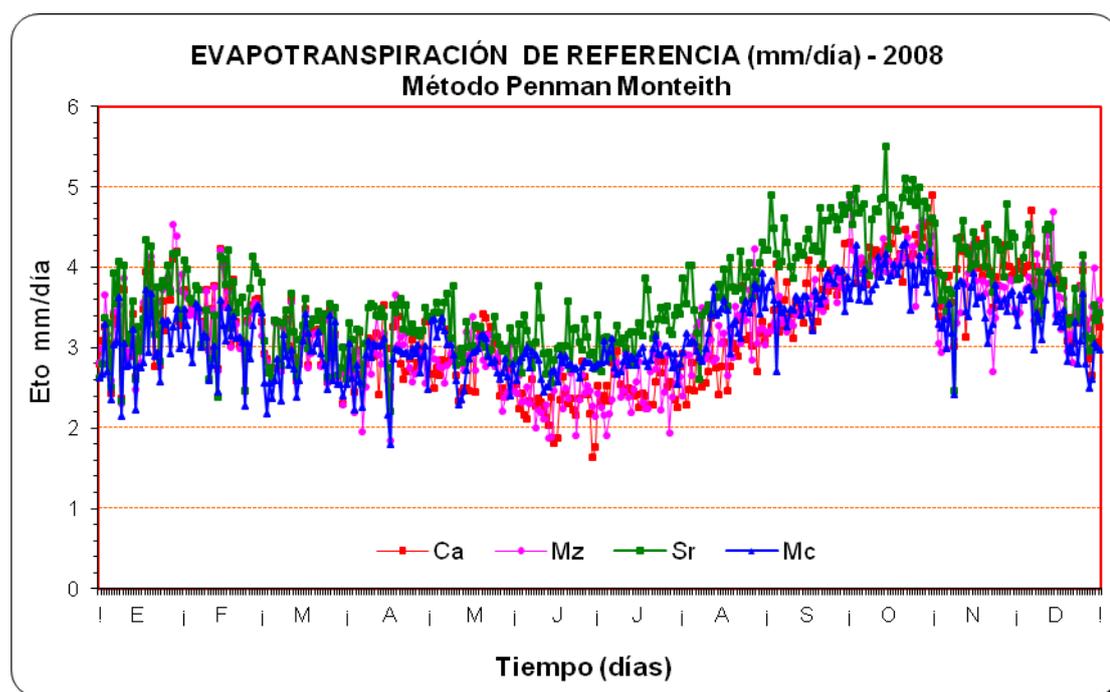
#### 4.5.4 Método de Penman Monteith (FAO - 56)

Cuadro 27. Evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) por método de Penman Monteith.

Bofedal	Eto mensual (mm/día) Método Penman Monteith - 2008												Media
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	
Capaso	3.29	3.44	2.98	2.97	2.79	2.27	2.52	2.91	3.61	4.20	3.90	3.66	3.21
Mazocruz	3.38	3.40	2.96	2.80	2.84	2.37	2.49	3.13	3.52	4.13	3.57	3.63	3.19
Santa Rosa	3.44	3.56	3.11	3.25	3.17	3.04	3.23	3.72	4.38	4.70	4.09	3.76	3.62
Macusani	2.98	3.14	2.79	2.81	2.89	2.76	2.88	3.32	3.61	3.91	3.47	3.29	3.15
<b>Media</b>	<b>3.27</b>	<b>3.38</b>	<b>2.96</b>	<b>2.96</b>	<b>2.92</b>	<b>2.61</b>	<b>2.78</b>	<b>3.27</b>	<b>3.78</b>	<b>4.24</b>	<b>3.76</b>	<b>3.58</b>	<b>3.29</b>

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 25. Evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) por método de Penman Monteith en base a todos los datos climáticos en bofedales de puna seca y húmeda.



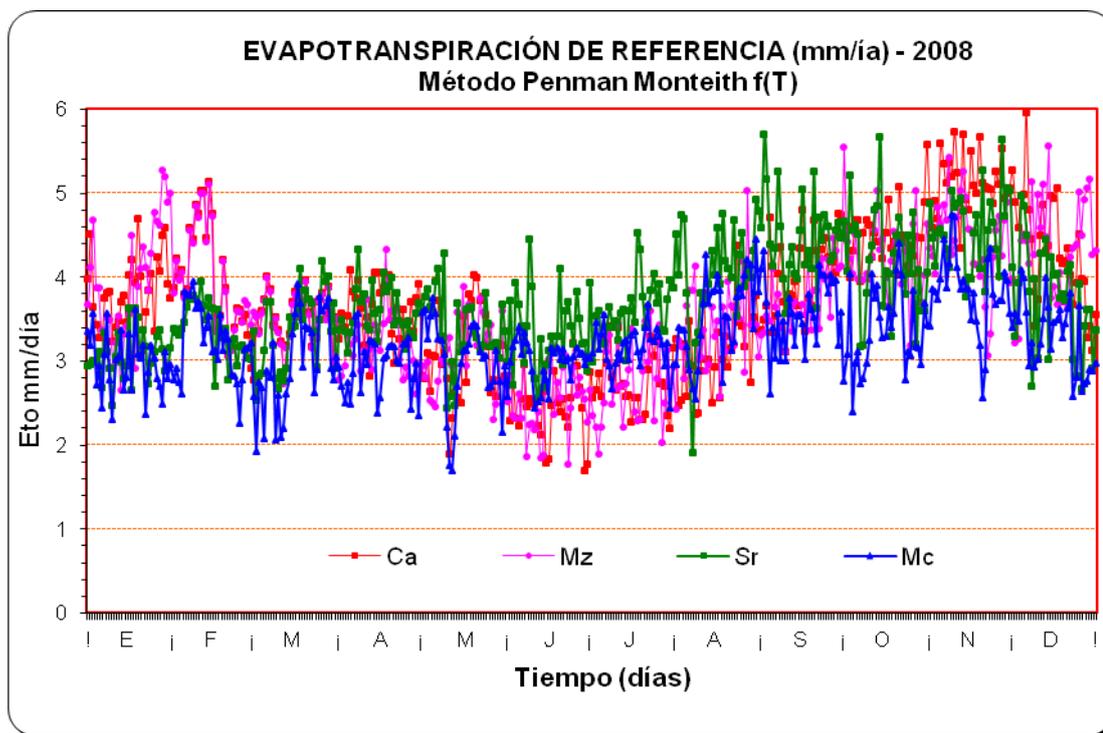
### 4.5.5 Método de Penman Monteith (FAO - 56) en función a la temperatura

Cuadro 28. Evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) por método de Penman Monteith en función a la temperatura.

Bofedal	Eto mensual (mm/día) Método Penman Monteith - 2008												Media
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	
Capaso	3.82	3.99	3.52	3.58	3.07	2.44	2.76	3.14	4.01	4.48	5.13	4.34	3.69
Mazocruz	3.96	3.99	3.53	3.20	3.09	2.51	2.73	3.41	3.72	4.27	4.43	4.35	3.60
Santa Rosa	3.08	3.38	3.36	3.58	3.40	3.33	3.62	4.04	4.47	4.20	4.57	3.76	3.73
Macusani	2.97	3.21	2.97	2.95	2.98	2.99	3.15	3.53	3.57	3.36	3.83	3.30	3.24
<b>Media</b>	<b>3.46</b>	<b>3.64</b>	<b>3.34</b>	<b>3.33</b>	<b>3.14</b>	<b>2.82</b>	<b>3.06</b>	<b>3.53</b>	<b>3.94</b>	<b>4.08</b>	<b>4.49</b>	<b>3.94</b>	<b>3.56</b>

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 26. Evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) por método de Penman Monteith en función de temperatura en bofedales de puna seca y húmeda.



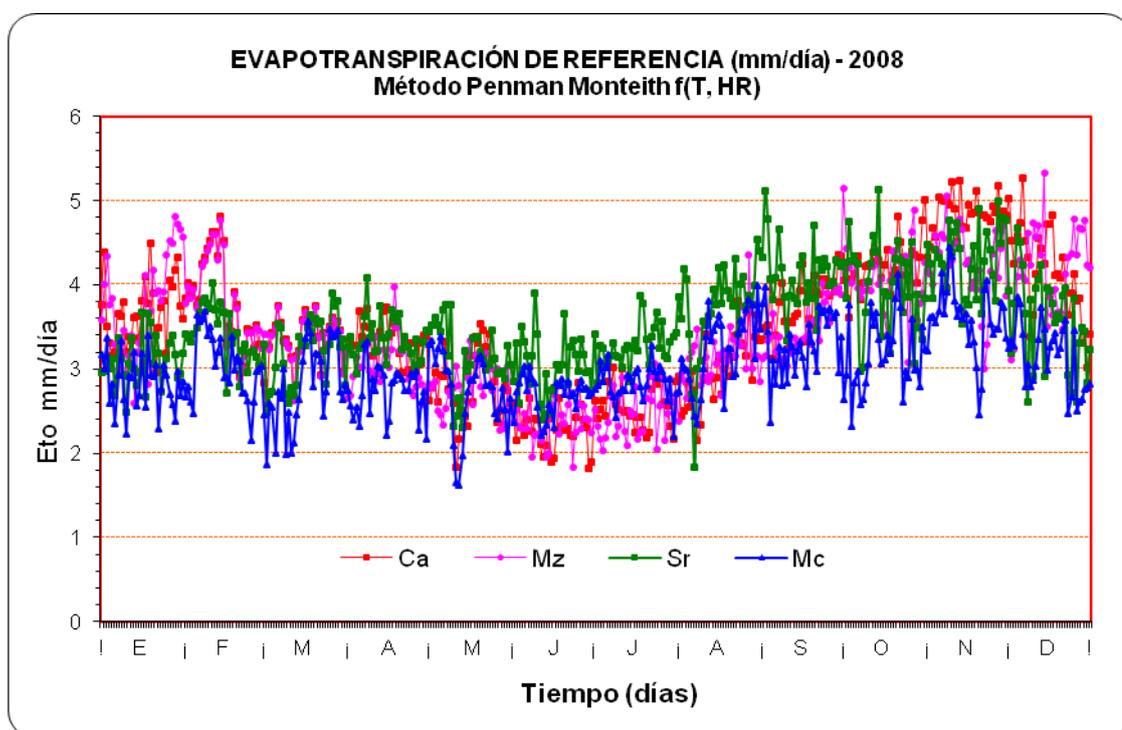
### 4.5.6 Método de Penman Monteith (FAO - 56) en función a la temperatura y humedad relativa

Cuadro 29. Evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) por método de Penman Monteith en función a la temperatura y humedad relativa.

Bofedal	Eto mensual (mm/día) Método Penman Monteith - 2008												Media
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	
Capaso	3.68	3.82	3.34	3.32	2.80	2.29	2.56	3.00	3.77	4.25	4.85	4.16	3.49
Mazocruz	3.78	3.80	3.37	3.04	2.78	2.36	2.48	3.13	3.48	4.11	4.24	4.18	3.39
Santa Rosa	3.09	3.41	3.20	3.36	3.16	3.05	3.28	3.73	4.13	3.97	4.30	3.59	3.52
Macusani	2.84	3.03	2.78	2.74	2.73	2.69	2.84	3.22	3.29	3.17	3.59	3.13	3.00
<b>Media</b>	<b>3.35</b>	<b>3.52</b>	<b>3.17</b>	<b>3.11</b>	<b>2.87</b>	<b>2.60</b>	<b>2.79</b>	<b>3.27</b>	<b>3.67</b>	<b>3.87</b>	<b>4.25</b>	<b>3.77</b>	<b>3.35</b>

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 27. Evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) por método de Penman Monteith en función de temperatura y humedad relativa en bofedales de puna seca y húmeda.



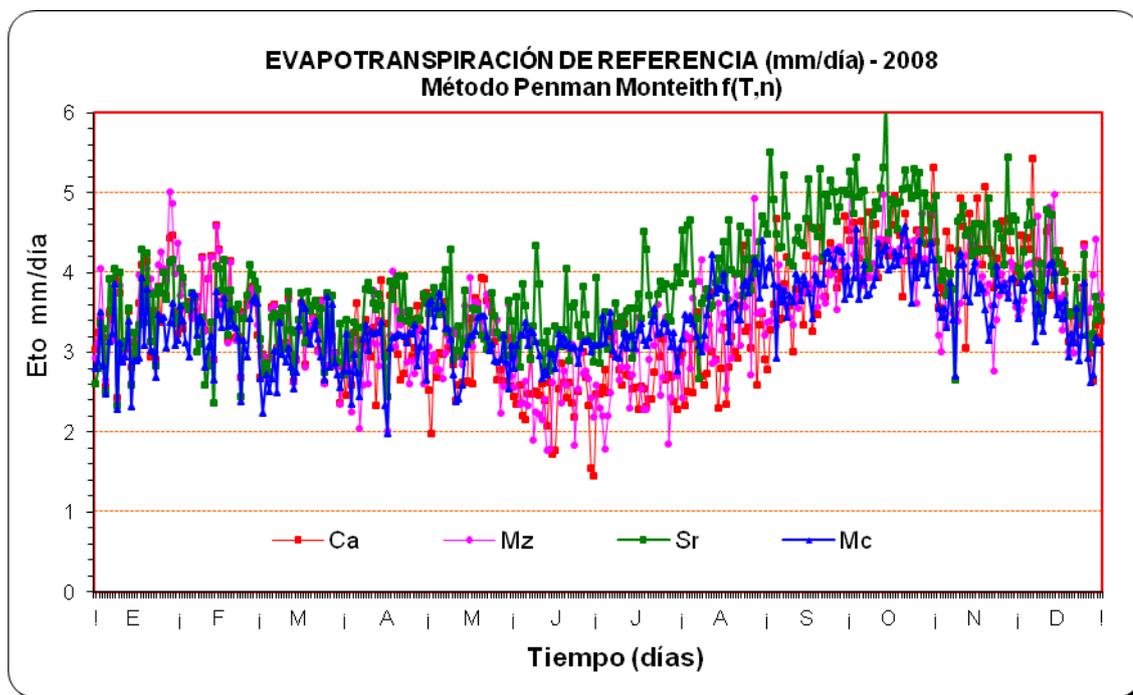
### 4.5.7 Método de Penman Monteith (FAO - 56) en función a la temperatura y horas de sol

Cuadro 30. Evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) por método de Penman Monteith en función a la temperatura y horas de sol.

Bofedal	Eto mensual (mm/día) Método Penman Monteith - 2008												Media
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	
Capaso	3.44	3.59	3.13	3.22	3.03	2.41	2.71	3.05	3.84	4.43	4.22	3.85	3.41
Mazocruz	3.58	3.61	3.14	2.97	3.15	2.52	2.74	3.41	3.76	4.30	3.78	3.82	3.40
Santa Rosa	3.43	3.52	3.27	3.47	3.41	3.33	3.57	4.04	4.71	4.91	4.36	3.92	3.83
Macusani	3.11	3.31	2.97	3.02	3.14	3.05	3.19	3.63	3.88	4.09	3.71	3.45	3.38
<b>Media</b>	<b>3.39</b>	<b>3.51</b>	<b>3.13</b>	<b>3.17</b>	<b>3.18</b>	<b>2.83</b>	<b>3.05</b>	<b>3.53</b>	<b>4.05</b>	<b>4.43</b>	<b>4.02</b>	<b>3.76</b>	<b>3.50</b>

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 28. Evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) por método de Penman Monteith en función de temperatura y horas de sol en bofedales de puna seca y húmeda.



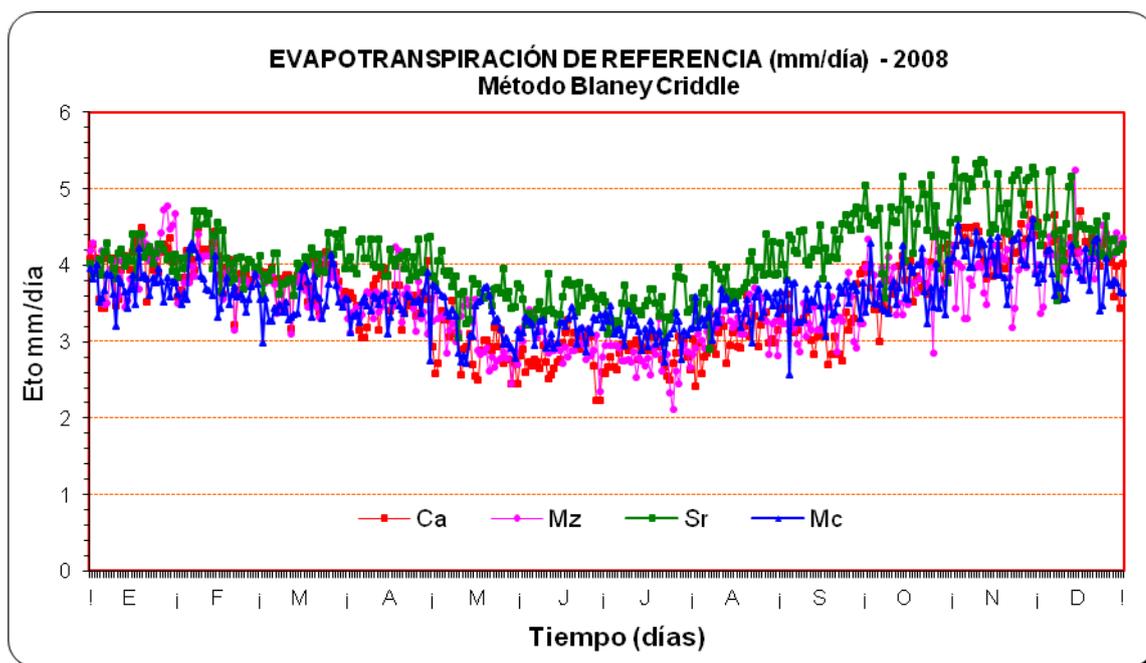
### 4.5.8 Método de Blaney – Criddle

Cuadro 31. Evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) por método de Blaney - Criddle.

Bofedal	Eto mensual (mm/día) Método Blaney Criddle - 2008												Media
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	
Capaso	4.01	3.96	3.79	3.53	2.91	2.80	2.84	3.06	3.22	3.84	4.27	4.18	3.53
Mazocruz	4.06	3.89	3.72	3.49	3.06	2.99	2.78	3.24	3.26	3.81	3.91	4.14	3.53
Santa Rosa	4.11	4.17	4.00	4.08	3.68	3.53	3.47	3.78	4.30	4.54	4.98	4.44	4.09
Macusani	3.74	3.72	3.55	3.47	3.28	3.17	3.14	3.41	3.51	3.71	4.15	3.87	3.56
<b>Media</b>	<b>3.98</b>	<b>3.93</b>	<b>3.77</b>	<b>3.64</b>	<b>3.23</b>	<b>3.12</b>	<b>3.06</b>	<b>3.37</b>	<b>3.57</b>	<b>3.97</b>	<b>4.33</b>	<b>4.16</b>	<b>3.68</b>

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 29. Evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) por método de Blaney Criddle en bofedales de puna seca y húmeda.



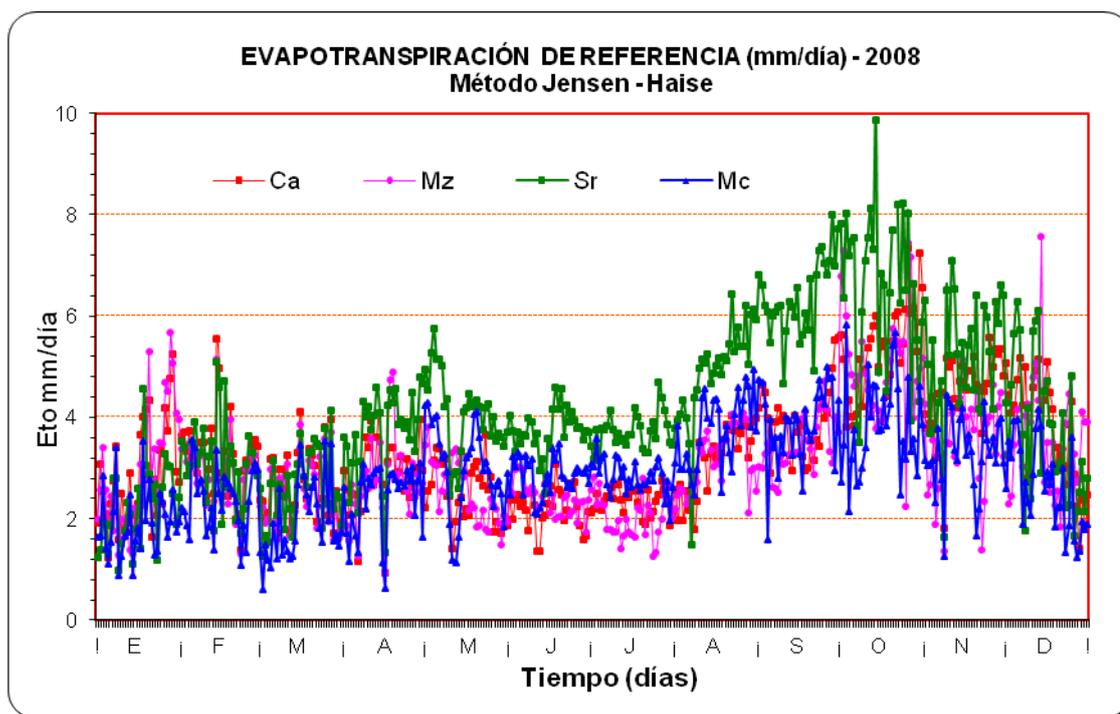
4.5.9 Método de Jensen – Haise

Cuadro 32. Evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) por método de Jensen – Haise.

Bofedal	Eto mensual (mm/día) Método Jensen Haise - 2008												Media
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	
Capaso	2.84	3.26	2.66	2.88	2.50	2.21	2.35	3.18	3.90	5.36	4.55	3.76	3.29
Mazocruz	2.91	3.04	2.50	2.69	2.55	2.41	2.04	3.16	3.44	5.04	3.44	3.62	3.07
Santa Rosa	2.22	3.15	2.64	3.74	4.07	3.74	3.72	4.92	6.36	6.69	5.24	3.75	4.19
Macusani	1.91	2.36	1.93	2.40	2.99	2.84	2.84	3.72	3.87	3.84	3.30	2.63	2.89
<b>Media</b>	<b>2.47</b>	<b>2.95</b>	<b>2.43</b>	<b>2.93</b>	<b>3.03</b>	<b>2.80</b>	<b>2.74</b>	<b>3.75</b>	<b>4.39</b>	<b>5.23</b>	<b>4.13</b>	<b>3.44</b>	<b>3.36</b>

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 30. Evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) por método de Jensen - Haise en bofedales de puna seca y húmeda.



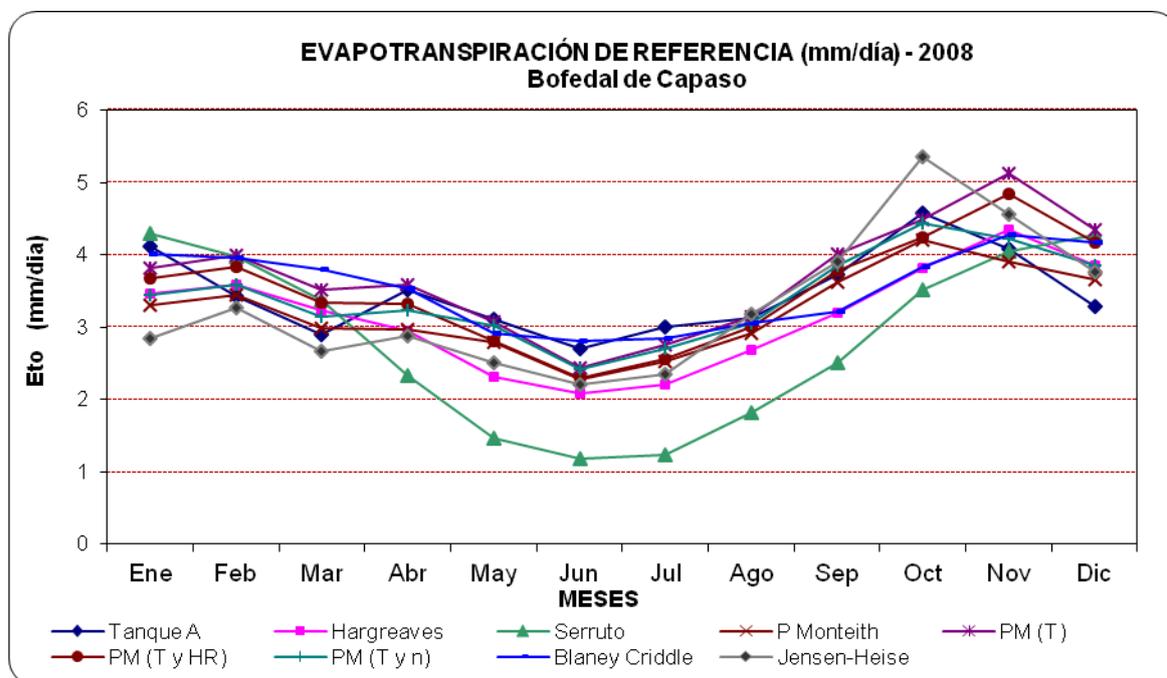
En el cuadro 33, se observa los valores de Evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) estimados para todos los métodos indirectos utilizados en el presente trabajo de investigación.

Cuadro 33. Resumen de evapotranspiración de referencia (ETo) por métodos climáticos (promedios mensuales) en Capaso.

Métodos Climáticos	ETo mensual (mm/día) - Capaso												Media
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	
Tanque A	4.12	3.43	2.89	3.52	3.11	2.70	3.00	3.12	3.72	4.57	4.08	3.29	3.46
Hargreaves	3.47	3.59	3.23	2.95	2.30	2.08	2.20	2.68	3.19	3.81	4.35	3.84	3.14
Serruto	4.29	3.97	3.37	2.33	1.46	1.18	1.24	1.82	2.51	3.52	4.05	4.28	2.83
P Monteith	3.29	3.44	2.98	2.97	2.79	2.27	2.52	2.91	3.61	4.20	3.90	3.66	3.21
PM (T)	3.82	3.99	3.52	3.58	3.07	2.44	2.76	3.14	4.01	4.48	5.13	4.34	3.69
PM (T y HR)	3.68	3.82	3.34	3.32	2.80	2.29	2.56	3.00	3.77	4.25	4.85	4.16	3.49
PM (T y n)	3.44	3.59	3.13	3.22	3.03	2.41	2.71	3.05	3.84	4.43	4.22	3.85	3.41
Blaney Criddle	4.01	3.96	3.79	3.53	2.91	2.80	2.84	3.06	3.22	3.84	4.27	4.18	3.53
Jensen-Haise	2.84	3.26	2.66	2.88	2.50	2.21	2.35	3.18	3.90	5.36	4.55	3.76	3.29
<b>Media</b>	<b>3.66</b>	<b>3.67</b>	<b>3.21</b>	<b>3.14</b>	<b>2.66</b>	<b>2.27</b>	<b>2.46</b>	<b>2.88</b>	<b>3.53</b>	<b>4.27</b>	<b>4.38</b>	<b>3.93</b>	<b>3.34</b>

Fuente: Cálculos realizados en base a datos de campo

Figura 31. Comparación de ETo (mm/día) de promedios mensuales por métodos climáticos en Capaso.

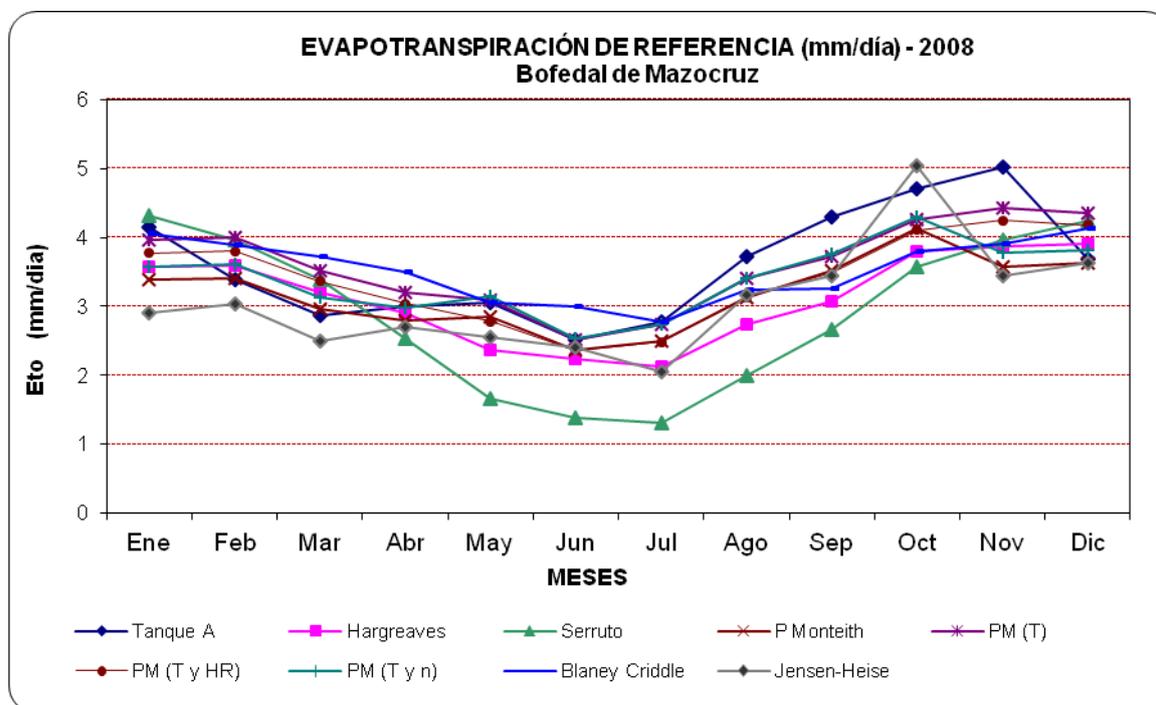


Cuadro 34. Resumen de evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) por métodos climáticos (promedios mensuales) en Mazocruz.

Métodos Indirectos	ET <sub>o</sub> mensual (mm/día) - Mazocruz												Media
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	
Tanque A	4.16	3.40	2.86	3.00	3.06	2.52	2.77	3.72	4.30	4.71	5.02	3.68	3.60
Hargreaves	3.57	3.58	3.21	2.90	2.37	2.23	2.12	2.74	3.08	3.80	3.88	3.91	3.12
Serruto	4.32	3.96	3.38	2.54	1.66	1.37	1.31	1.99	2.66	3.57	3.97	4.25	2.91
P Monteith	3.38	3.40	2.96	2.80	2.84	2.37	2.49	3.13	3.52	4.13	3.57	3.63	3.19
PM (T)	3.96	3.99	3.53	3.20	3.09	2.51	2.73	3.41	3.72	4.27	4.43	4.35	3.60
PM (T y HR)	3.78	3.80	3.37	3.04	2.78	2.36	2.48	3.13	3.48	4.11	4.24	4.18	3.39
PM (T y n)	3.58	3.61	3.14	2.97	3.15	2.52	2.74	3.41	3.76	4.30	3.78	3.82	3.40
Blaney Criddle	4.06	3.89	3.72	3.49	3.06	2.99	2.78	3.24	3.26	3.81	3.91	4.14	3.53
Jensen-Haise	2.91	3.04	2.50	2.69	2.55	2.41	2.04	3.16	3.44	5.04	3.44	3.62	3.07
<b>Media</b>	<b>3.75</b>	<b>3.63</b>	<b>3.18</b>	<b>2.96</b>	<b>2.73</b>	<b>2.37</b>	<b>2.38</b>	<b>3.10</b>	<b>3.47</b>	<b>4.19</b>	<b>4.03</b>	<b>3.95</b>	<b>3.31</b>

Fuente: Cálculos realizados en base a datos de campo

Figura 32. Comparación de ET<sub>o</sub> (mm/día) de promedios mensuales por métodos climáticos en Mazocruz.

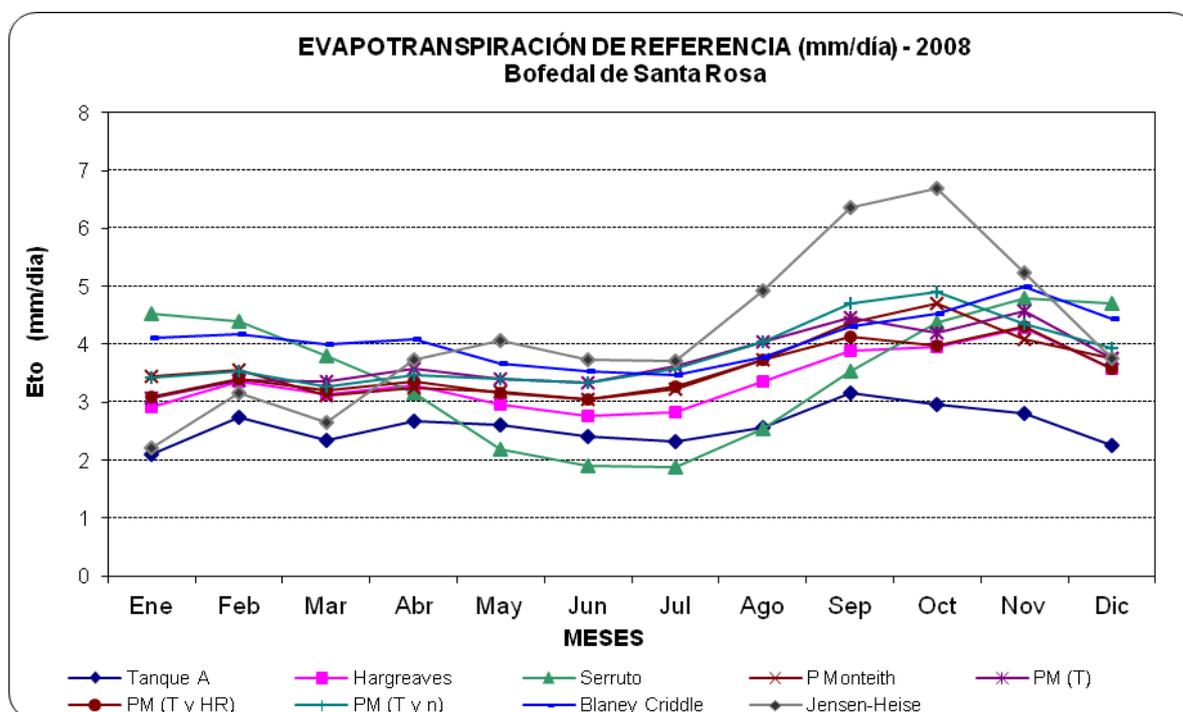


Cuadro 35. Resumen de evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) por métodos climáticos (promedios mensuales) en Santa Rosa.

Métodos Indirectos	ET <sub>o</sub> mensual (mm/día) – Santa Rosa												Media
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	
Tanque A	2.10	2.74	2.35	2.68	2.60	2.41	2.31	2.57	3.16	2.96	2.81	2.25	2.58
Hargreaves	2.91	3.37	3.14	3.28	2.96	2.75	2.82	3.35	3.88	3.94	4.29	3.57	3.36
Serruto	4.54	4.40	3.79	3.15	2.20	1.90	1.87	2.54	3.54	4.37	4.79	4.71	3.48
P Monteith	3.44	3.56	3.11	3.25	3.17	3.04	3.23	3.72	4.38	4.70	4.09	3.76	3.62
PM (T)	3.08	3.38	3.36	3.58	3.40	3.33	3.62	4.04	4.47	4.20	4.57	3.76	3.73
PM (T y HR)	3.09	3.41	3.20	3.36	3.16	3.05	3.28	3.73	4.13	3.97	4.30	3.59	3.52
PM (T y n)	3.43	3.52	3.27	3.47	3.41	3.33	3.57	4.04	4.71	4.91	4.36	3.92	3.83
Blaney Criddle	4.11	4.17	4.00	4.08	3.68	3.53	3.47	3.78	4.30	4.54	4.98	4.44	4.09
Jensen-Haise	2.22	3.15	2.64	3.74	4.07	3.74	3.72	4.92	6.36	6.69	5.24	3.75	4.19
<b>Media</b>	<b>3.21</b>	<b>3.52</b>	<b>3.21</b>	<b>3.40</b>	<b>3.18</b>	<b>3.01</b>	<b>3.10</b>	<b>3.63</b>	<b>4.33</b>	<b>4.48</b>	<b>4.38</b>	<b>3.75</b>	<b>3.60</b>

Fuente: Cálculos realizados en base a datos de campo

Figura 33. Comparación de ET<sub>o</sub> (mm/día) de promedios mensuales por métodos climáticos en Santa Rosa.

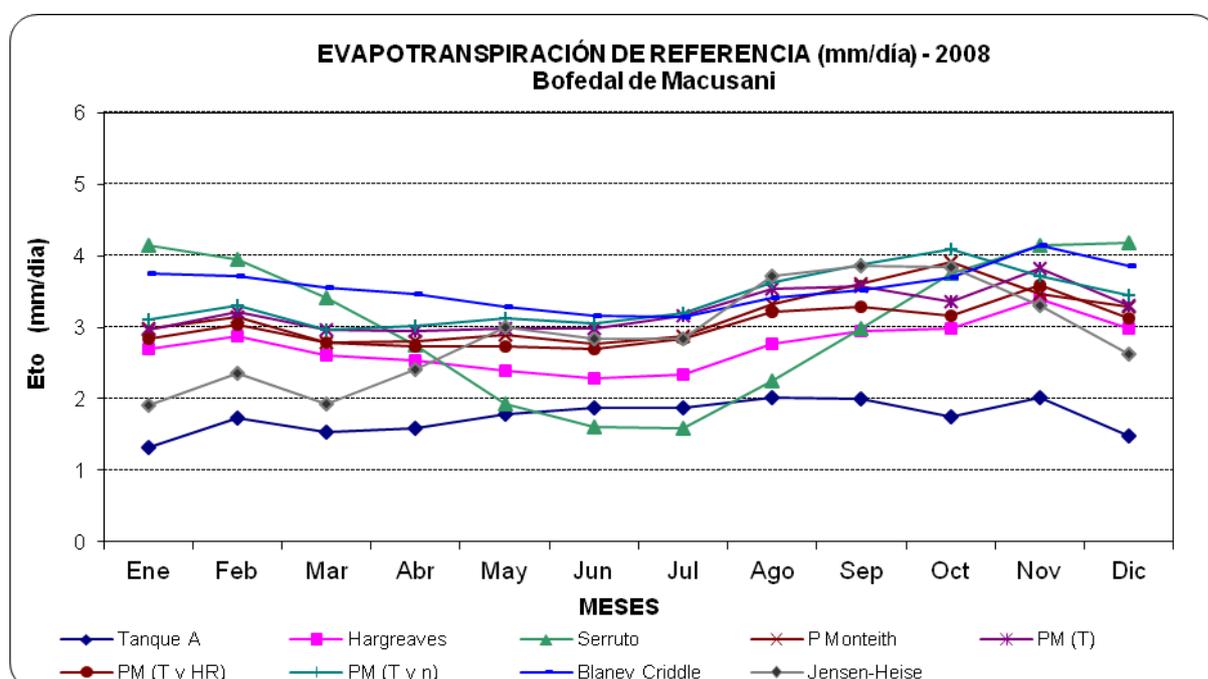


Cuadro 36. Resumen de evapotranspiración de referencia (ETo) por métodos climáticos (promedios mensuales) en Macusani.

Métodos Indirectos	ETo mensual (mm/día) - Macusani												Media
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	
Tanque A	1.31	1.74	1.53	1.58	1.79	1.88	1.87	2.02	2.00	1.75	2.01	1.49	1.75
Hargreaves	2.70	2.88	2.61	2.54	2.40	2.29	2.34	2.77	2.96	2.98	3.39	2.98	2.74
Serruto	4.15	3.96	3.41	2.75	1.94	1.61	1.60	2.25	2.98	3.75	4.14	4.18	3.06
P Monteith	2.98	3.14	2.79	2.81	2.89	2.76	2.88	3.32	3.61	3.91	3.47	3.29	3.15
PM (T)	2.97	3.21	2.97	2.95	2.98	2.99	3.15	3.53	3.57	3.36	3.83	3.30	3.24
PM (T y HR)	2.84	3.03	2.78	2.74	2.73	2.69	2.84	3.22	3.29	3.17	3.59	3.13	3.00
PM (T y n)	3.11	3.31	2.97	3.02	3.14	3.05	3.19	3.63	3.88	4.09	3.71	3.45	3.38
Blaney Criddle	3.74	3.72	3.55	3.47	3.28	3.17	3.14	3.41	3.51	3.71	4.15	3.87	3.56
Jensen-Haise	1.91	2.36	1.93	2.40	2.99	2.84	2.84	3.72	3.87	3.84	3.30	2.63	2.89
<b>Media</b>	<b>2.86</b>	<b>3.04</b>	<b>2.73</b>	<b>2.69</b>	<b>2.68</b>	<b>2.59</b>	<b>2.65</b>	<b>3.10</b>	<b>3.30</b>	<b>3.40</b>	<b>3.51</b>	<b>3.15</b>	<b>2.97</b>

Fuente: Cálculos realizados en base a datos de campo

Figura 34. Comparación de ETo (mm/día) de promedios mensuales por métodos climáticos en Macusani.



#### 4.5.10 Análisis estadístico de evapotranspiración de referencia ETo de los métodos indirectos.

Cuadro 37. Análisis de varianza de la evapotranspiración de referencia por meses en los bofedales.

F. de V.	G.L.	S.C.	C.M.	F.c.	p-valor	Sig.
Meses ( <b>Bloque</b> )	11	103.14	9.38	33.70	<0.0001	**
Bofedales ( <b>Tratamientos</b> )	3	21.38	7.13	25.62	<0.0001	**
Métodos	8	26.98	3.37	12.12	<0.0001	**
Error Experimental ( <b>Ee</b> )	409	113.80	0.28			
Total	431	265.30				

$$CV = 15.95, R^2 = 0.57$$

El cuadro 37 nos muestra los resultados del análisis de varianza (ANOVA) para evapotranspiración de referencia mensual ETo en bofedales de puna seca y húmeda, donde se encontró alta significancia estadística entre meses, lo que indica que existen diferencias en la ETo entre los meses de evaluación principalmente entre la época de lluvias y seca por las condiciones del clima del lugar. Para Bofedales de puna seca y húmeda también se encontró una diferencia significativa, lo cual nos indica que las necesidades hídricas del bofedal varían según ubicación agroecológica y condiciones climáticas.

El coeficiente de variabilidad fue 15.95 %, el cual indica que la evaluación se encuentra dentro de los parámetros estadísticos permitidos, por lo tanto hay confiabilidad de los datos.

Cuadro 38. Prueba de significancia de Duncan ( $p:0.05$ ) para la evapotranspiración de referencia entre diferentes métodos para los bofedales de puna seca y húmeda.

Nº	Meses	Media estimada (mm/día)	Grupos				
1	Blaney Crilddle	3.68	A				
2	P Monteith (T)	3.56	A	B			
3	P Monteith (T y n)	3.50	A	B	C		
4	Jensen – Haise	3.36		B	C		
5	P Monteith (T y HR)	3.35		B	C		
6	P Monteith	3.29			C	D	
7	Hargreaves	3.09				D	
8	Serruto	3.07				D	
9	Tanque A	2.85					E

Fuente: Elaboración propia con Software InfStat y R.

*Nota: Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p>0.05$ )*

Según el cuadro 38; El análisis estadístico nos muestra que todos los métodos indirectos utilizados para el cálculo de la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) a través de la prueba de significancia de Duncan a la probabilidad de (0.05), los datos de la media estimada resultan diferentes en comparación con cada uno de los métodos empíricos; pero estadísticamente usando el método de Duncan por ser datos no sesgados los métodos Serruto y Tanque A presentan una media estimada de ET<sub>o</sub> de 3.07 mm/día y 2.85mm/día respectivamente que son los más bajos en comparación a los demás métodos diferenciado como grupo D y E.

El método de Blaney Crilddle presenta una media estimada de evapotranspiración de referencia de 3.68 3.726mm/dia que es el más alto en comparación con los demás métodos empíricos representado como grupo A como se aprecia en el cuadro 38.

Estadísticamente el método de Penman Monteith en base a lotos los datos presenta una media estimada de evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) de 3.29 mm/día, siendo el más confiable debido q es el método recomendado por la FAO (Riego y drenaje de FAO) para el cálculo de ET<sub>o</sub>.

Cuadro 39. Prueba de significancia de Duncan ( $p < 0.05$ ) para la evapotranspiración de referencia entre bofedales para diferentes métodos directos.

Nº	Bofedales	Zona agro ecológica	Media estimada (mm/día)	Grupos		
1	Santa Rosa	Puna húmeda	3.60	A		
2	Capaso	Puna seca	3.34		B	
3	Mazocruz	Puna seca	3.31		B	C
4	Macusani	Puna húmeda	2.97			C

Fuente: Elaboración propia con Software InfStat y R.

*Nota: Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )*

De acuerdo al cuadro 39, los bofedales de Mazocruz (Mz) y Capaso (Ca) estadísticamente son similares; mientras los demás bofedal son diferentes.

Cuadro 40. Prueba de significancia de Duncan ( $p < 0.05$ ) para la ETo entre meses para diferentes métodos.

Nº	Meses	Media estimada (mm/día)	Grupos							
1	Octubre	4.08	A							
2	Noviembre	4.07	A							
3	Diciembre	3.69		B						
4	Setiembre	3.66		B						
5	Febrero	3.47		B	C					
6	Enero	3.37			C	D				
7	Agosto	3.18				D	E			
8	Marzo	3.08					E			
9	Abril	3.05					E	F		
10	Mayo	2.81						F	G	
11	Julio	2.65							G	H
12	Junio	2.56								H

Fuente: Elaboración propia con Software InfStat y R.

*Nota: Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )*

#### 4.6 NECESIDADES HÍDRICAS DEL BOFEDAL

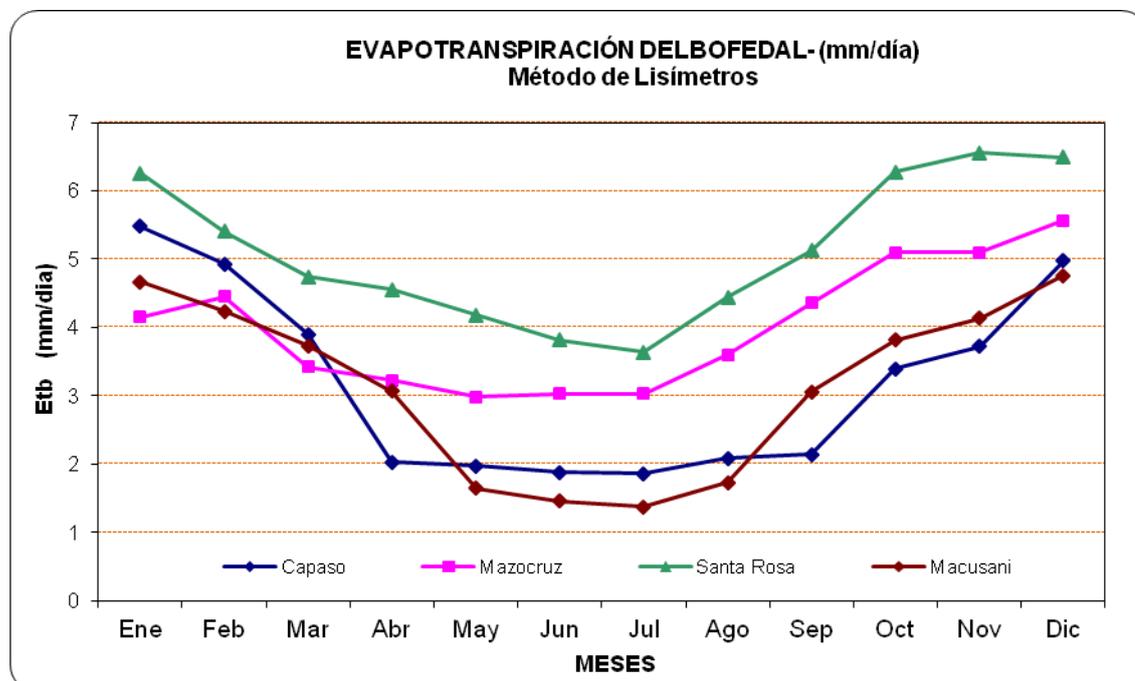
##### 4.6.1 Evapotranspiración del bofedal por el método del lisímetro

Cuadro 41. Evapotranspiración del bofedal (ETb) por método de lisímetros (promedios mensuales).

Bofedal	Evapotranspiración del bofedal (mm/día) Método Lisímetro - 2008												Media
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	
Capaso	5.48	4.93	3.90	2.03	1.97	1.88	1.86	2.09	2.14	3.40	3.72	4.97	3.20
Mazocruz	4.15	4.45	3.43	3.23	2.98	3.03	3.03	3.60	4.36	5.10	5.10	5.57	4.00
Santa Rosa	6.26	5.41	4.75	4.56	4.18	3.82	3.64	4.44	5.12	6.28	6.55	6.49	5.12
Macusani	4.67	4.23	3.73	3.07	1.65	1.46	1.37	1.73	3.06	3.82	4.13	4.76	3.14
<b>Media</b>	<b>5.14</b>	<b>4.75</b>	<b>3.95</b>	<b>3.22</b>	<b>2.70</b>	<b>2.55</b>	<b>2.47</b>	<b>2.96</b>	<b>3.67</b>	<b>4.65</b>	<b>4.87</b>	<b>5.45</b>	<b>3.87</b>

Fuente: Cálculos realizados en base a datos de campo.

Figura 35: Comparación de ET del bofedal (mm/día) de promedios mensuales por método de lisímetros en puna seca y húmeda.



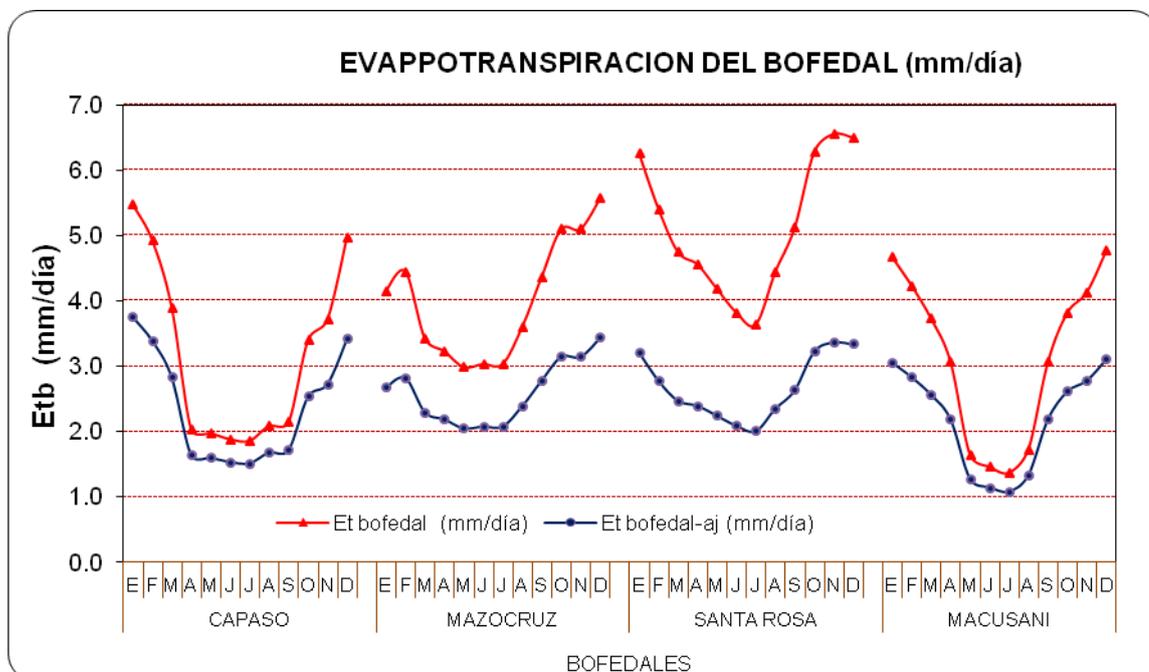
4.6.2 Evapotranspiración del bofedal bajo condiciones de estrés hídrico

Cuadro 42. Evapotranspiración del bofedal bajo condiciones de estrés hídrico y determinación de coeficiente de cultivo ajustado (Kc –aj).

Loc	Parámetros de Et en condiciones de estrés hídrico	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	
Capaso	Et bofedal (mm/día)	5.48	4.93	3.90	2.03	1.97	1.88	1.86	2.09	2.14	3.40	3.72	4.97	
	Eto (mm/día)	3.29	3.44	2.98	2.97	2.79	2.27	2.52	2.91	3.61	4.20	3.90	3.66	
	Kc bofedal	Media mensual	1.66	1.43	1.31	0.68	0.71	0.83	0.74	0.72	0.59	0.81	0.95	1.36
		Media anual	0.98											
	Et bofedal-aj (mm/día)	3.76	3.39	2.83	1.64	1.59	1.53	1.51	1.68	1.71	2.53	2.73	3.42	
	Kc-aj del bofedal bajo estrés hídrico	Media mensual	1.14	0.99	0.95	0.55	0.57	0.67	0.60	0.58	0.47	0.60	0.70	0.93
Media anual		0.73												
Mazocruz	Et bofedal (mm/día)	4.15	4.45	3.43	3.23	2.98	3.03	3.03	3.60	4.36	5.10	5.10	5.57	
	Eto (mm/día)	3.38	3.40	2.96	2.80	2.84	2.37	2.49	3.13	3.52	4.13	3.57	3.63	
	Kc bofedal	Media mensual	1.23	1.31	1.16	1.15	1.05	1.28	1.22	1.15	1.24	1.23	1.43	1.53
		Media anual	1.25											
	Et bofedal-aj (mm/día)	2.67	2.82	2.29	2.19	2.05	2.07	2.08	2.39	2.78	3.14	3.14	3.43	
	Kc-aj del bofedal bajo estrés hídrico	Media mensual	0.79	0.83	0.77	0.78	0.72	0.87	0.83	0.76	0.79	0.76	0.88	0.95
Media anual		0.81												
Santa Rosa	Et bofedal (mm/día)	6.26	5.41	4.75	4.56	4.18	3.82	3.64	4.44	5.12	6.28	6.55	6.49	
	Eto (mm/día)	3.44	3.56	3.11	3.25	3.17	3.04	3.23	3.72	4.38	4.70	4.09	3.76	
	Kc bofedal	Media mensual	1.82	1.52	1.53	1.40	1.32	1.25	1.13	1.19	1.17	1.34	1.60	1.73
		Media anual	1.42											
	Et bofedal-aj (mm/día)	3.21	2.78	2.47	2.39	2.24	2.09	2.00	2.35	2.63	3.23	3.37	3.34	
	Kc-aj del bofedal bajo estrés hídrico	Media mensual	0.93	0.78	0.79	0.74	0.71	0.69	0.62	0.63	0.60	0.69	0.82	0.89
Media anual		0.74												
Macusani	Et bofedal (mm/día)	4.67	4.23	3.73	3.07	1.65	1.46	1.37	1.73	3.06	3.82	4.13	4.76	
	Eto (mm/día)	2.98	3.14	2.79	2.81	2.89	2.76	2.88	3.32	3.61	3.91	3.47	3.29	
	Kc bofedal	Media mensual	1.57	1.35	1.34	1.09	0.57	0.53	0.48	0.52	0.85	0.98	1.19	1.45
		Media anual	0.99											
	Et bofedal-aj (mm/día)	3.06	2.83	2.81	2.19	1.27	1.14	1.08	1.33	2.18	2.61	2.78	3.10	
	Kc-aj del bofedal bajo estrés hídrico	Media mensual	1.03	0.90	1.01	0.78	0.44	0.41	0.37	0.40	0.60	0.67	0.80	0.94
Media anual		0.70												

Fuente: Cálculos realizados en base a datos de campo

Figura 36: Comparación de evapotranspiración del bofedal (ETb) y evapotranspiración del bofedal ajustados (ETb-aj) en puna seca y húmeda.



#### 4.6.3 Análisis estadístico de la evapotranspiración del bofedal (ETb)

Para corroborar el análisis de los resultados de ETb, objetivo del presente trabajo de investigación, se empleó el Diseño en Bloque Completo al Azar (DBCA), en donde los meses vienen a ser los bloques y los tratamientos son los bofedales.

Cuadro 43. Análisis de varianza para la evapotranspiración en Bofedales (mm/día).

F. de V.	G.L.	S.C.	C.M.	F.c.	p-valor	Sig.
Meses ( <b>Bloque</b> )	11	51.45	4.68	16.90	<0.0001	**
Bofedales ( <b>Tratamientos</b> )	3	30.93	10.31	37.26	<0.0001	**
Error Experimental ( <b>Ee</b> )	33	9.13	0.28			
Total	47	91.52				

CV = 13.61; R<sup>2</sup> = 0.90

El cuadro 43 nos muestra los resultados del análisis de varianza (ANOVA) para evapotranspiración mensual del bofedal en puna seca y húmeda, donde se encontró alta significancia estadística entre meses, lo que indica que existen diferencias en la ETb entre los meses de evaluación principalmente entre la época de lluvias y seca por las condiciones del clima del lugar. Para Bofedales de puna seca y húmeda también se encontró una diferencia significativa, lo cual nos indica que las necesidades hídricas del bofedal varían según ubicación agroecológica y condiciones climáticas.

El coeficiente de variabilidad fue 13.61 %, el cual indica que el experimento ha sido conducido en forma correcta dentro de los parámetros estadísticos permitidos, por lo tanto hay confiabilidad de los datos del experimento.

Cuadro 44. Prueba de significancia Duncan ( $p:0.05$ ) para la evapotranspiración del bofedal (ETb) según ubicación del bofedal de enero diciembre.

Nº	Bofedales	Zona agro ecológica	Media estimada (mm/día)	Grupos		
1	Santa Rosa	Puna húmeda	5.13	A		
2	Mazocruz	Puna seca	4.00		B	
3	Capaso	Puna seca	3.20			C
4	Macusani	Puna húmeda	3.14			C

Fuente: Elaboración propia con Software InfStat y R.

*Nota: Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p>0.05$ )*

En el cuadro 34 observamos el comportamiento de la prueba de comparación múltiple de Duncan ( $p:0.05$ ), muestra la evapotranspiración del bofedal (ETb) en los cuatro bofedales en estudio. Donde el bofedal de Santa Rosa (Sr) de puna húmeda alcanzó mayor evapotranspiración promedio mensual de 5.13 mm/día, superando estadísticamente a los restantes Bofedales; seguido por el bofedal de Mazocruz (Mz) de puna seca con 4.00 mm/día de evapotranspiración; Mientras los bofedales de Capaso (Ca) de puna seca y Macusani (Mc) de puna húmeda son similares estadísticamente con 3.20 mm/día y 3.14 mm/día de evapotranspiración diaria.

La prueba Duncan (Cuadro 45), muestra el promedio mensual de evapotranspiración del bofedal (ETb) en dos bofedales de puna seca y dos bofedales de puna húmeda. El mes de diciembre se encontró mayor evapotranspiración del bofedal 5.45 mm/día. No

hubo diferencias estadísticas en la evapotranspiración entre los meses de diciembre, enero, noviembre, febrero y octubre de 5.45 mm/día, 5.14 mm/día, 4.88 mm/día, 4.76 mm/día y 4.65 mm/día, respectivamente. También se puede observar que entre los meses de octubre con 4.65 mm/día y marzo con 3.95 mm/día, no difieren estadísticamente, pero son numéricamente superiores a los meses de setiembre 3.67 mm/día, abril 3.22 mm/día, agosto 2.97 mm/día y mayo 2.70 mm/día; menor evapotranspiración corresponde a los registros efectuados en junio y julio con 2.55 mm/día y 2.48 mm/día respectivamente, que estadísticamente son iguales.

Cuadro 45. Prueba de significancia Duncan ( $p:0.05$ ) para la evapotranspiración del bofedal (ETb) según meses en todos los bofedales.

Nº	Meses	Media estimada (mm/día)	Grupos				
1	Diciembre	5.45	A				
2	Enero	5.14	A				
3	Noviembre	4.88	A				
4	Febrero	4.76	A				
5	Octubre	4.65	A	B			
6	Marzo	3.95		B	C		
7	Setiembre	3.67			C	D	
8	Abril	3.22			C	D	E
9	Agosto	2.97				D	E
10	Mayo	2.70					E
11	Junio	2.55					E
12	Julio	2.48					E

Fuente: Elaboración propia con Software InfStat.

*Nota: Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p>0.05$ )*

En resumen, en los cuatro bofedales se registro la evapotranspiración de 3.87 mm/día, con un rango de variación entre 2.48 mm/día en el mes de junio y 5.45 mm/día en el mes de diciembre.

#### 4.7 COEFICIENTE DEL CULTIVO (Kc) DEL BOFEDAL

De acuerdo con los valores de ETo indicados en los cuadros 33, 34, 35 y 36 se obtuvieron los coeficientes de cultivo (kc) para los cuatro bofedales evaluados, Cuadro 46.

Cuadro 46. Coeficientes de cultivo (Kc) en bofedales de puna seca y húmeda calculado por métodos climáticos.

Métodos climáticos		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Media
Capaso	Tanque A	1.33	1.44	1.35	0.58	0.635	0.7	0.6	0.669	0.58	0.74	0.912	1.51	0.92
	Hargreaves	1.58	1.42	1.12	0.59	0.569	0.54	0.5	0.602	0.62	0.98	1.072	1.43	0.92
	Serruto	1.28	1.15	0.91	0.47	0.46	0.44	0.4	0.487	0.5	0.79	0.867	1.16	0.75
	P Monteith	1.66	1.43	1.31	0.68	0.708	0.83	0.7	0.716	0.59	0.81	0.953	1.36	0.98
	P M (T)	1.43	1.24	1.11	0.57	0.642	0.77	0.7	0.665	0.53	0.76	0.725	1.15	0.85
	P M (T y HR)	1.49	1.34	1.06	0.55	0.536	0.51	0.5	0.567	0.58	0.92	1.011	1.35	0.87
	P M (T y n)	1.59	1.43	1.13	0.59	0.573	0.55	0.5	0.607	0.62	0.99	1.081	1.44	0.93
	Blaney Criddle	1.37	1.24	1.03	0.58	0.678	0.67	0.7	0.682	0.66	0.88	0.871	1.19	0.88
	Jensen Haise	1.93	1.51	1.47	0.71	0.79	0.85	0.8	0.656	0.55	0.63	0.817	1.32	1
Mazocruz	Tanque A	1.00	1.31	1.20	1.08	0.98	1.20	1.10	0.97	1.01	1.08	1.02	1.51	1.12
	Hargreaves	1.20	1.28	0.99	0.93	0.86	0.87	0.87	1.04	1.26	1.47	1.47	1.60	1.15
	Serruto	0.97	1.04	0.80	0.75	0.70	0.71	0.71	0.84	1.02	1.19	1.19	1.30	0.93
	P Monteith	1.23	1.31	1.16	1.15	1.05	1.28	1.22	1.15	1.24	1.23	1.43	1.53	1.25
	P M (T)	1.05	1.11	0.97	1.01	0.97	1.21	1.11	1.06	1.17	1.19	1.15	1.28	1.11
	P M (T y HR)	1.13	1.21	0.93	0.88	0.81	0.82	0.82	0.98	1.19	1.39	1.39	1.51	1.09
	P M (T y n)	1.21	1.29	1.00	0.94	0.87	0.88	0.88	1.05	1.27	1.48	1.48	1.62	1.16
	Blaney Criddle	1.02	1.14	0.92	0.93	0.98	1.01	1.09	1.11	1.34	1.34	1.30	1.35	1.13
	Jensen Haise	1.43	1.46	1.37	1.20	1.17	1.26	1.49	1.14	1.27	1.01	1.48	1.54	1.32
Santa Rosa	Tanque A	2.98	1.98	2.02	1.70	1.61	1.58	1.57	1.73	1.62	2.12	2.33	2.89	2.01
	Hargreaves	1.80	1.56	1.37	1.31	1.21	1.10	1.05	1.28	1.48	1.81	1.89	1.87	1.48
	Serruto	1.46	1.26	1.11	1.06	0.98	0.89	0.85	1.04	1.19	1.46	1.53	1.51	1.19
	P Monteith	1.82	1.52	1.53	1.40	1.32	1.25	1.13	1.19	1.17	1.34	1.60	1.73	1.42
	P M (T)	2.03	1.60	1.41	1.27	1.23	1.15	1.00	1.10	1.15	1.49	1.43	1.73	1.38
	P M (T y HR)	1.70	1.47	1.29	1.24	1.14	1.04	0.99	1.21	1.39	1.71	1.78	1.76	1.39
	P M (T y n)	1.82	1.57	1.38	1.32	1.22	1.11	1.06	1.29	1.49	1.82	1.90	1.89	1.49
	Blaney Criddle	1.52	1.30	1.19	1.12	1.14	1.08	1.05	1.18	1.19	1.38	1.31	1.46	1.24
	Jensen Haise	2.82	1.71	1.80	1.22	1.03	1.02	0.98	0.90	0.81	0.94	1.25	1.73	1.35
Macusani	Tanque A	3.55	2.44	2.43	1.94	0.92	0.78	0.73	0.85	1.53	2.18	2.05	3.20	1.88
	Hargreaves	1.35	1.22	1.07	0.88	0.47	0.42	0.39	0.50	0.88	1.10	1.19	1.37	0.91
	Serruto	1.09	0.99	0.87	0.72	0.38	0.34	0.32	0.40	0.71	0.89	0.96	1.11	0.73
	P Monteith	1.57	1.35	1.34	1.09	0.57	0.53	0.48	0.52	0.85	0.98	1.19	1.45	0.99
	P M (T)	1.57	1.32	1.26	1.04	0.55	0.49	0.43	0.49	0.86	1.13	1.08	1.44	0.97
	P M (T y HR)	1.27	1.15	1.01	0.83	0.45	0.40	0.37	0.47	0.83	1.04	1.12	1.29	0.85
	P M (T y n)	1.36	1.23	1.08	0.89	0.48	0.42	0.40	0.50	0.89	1.11	1.20	1.38	0.91
	Blaney Criddle	1.25	1.14	1.05	0.88	0.50	0.46	0.44	0.51	0.87	1.03	1.00	1.23	0.86
	Jensen Haise	2.45	1.80	1.93	1.28	0.55	0.51	0.48	0.46	0.79	0.99	1.25	1.81	1.19

Fuente: Cálculos realizados en base a datos de campo.

Figura 37. Comparación de Kc del bofedal calculado por diferentes métodos climático en el bofedal de Capaso.

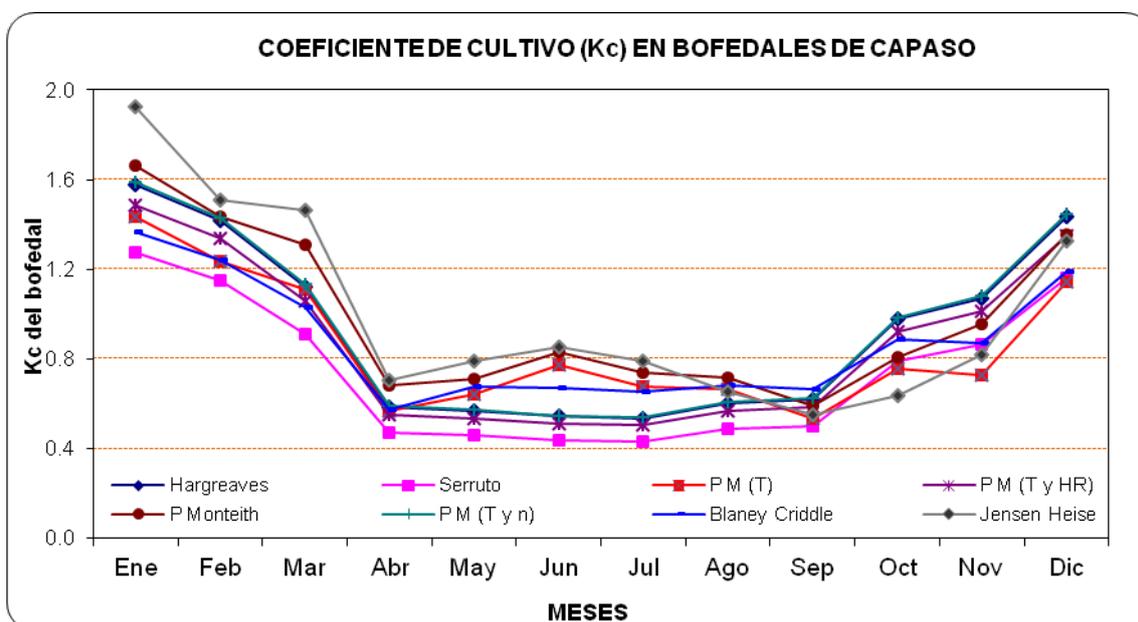


Figura 38. Comparación de Kc del bofedal calculado por diferentes métodos climático en el bofedal de Mazocruz.

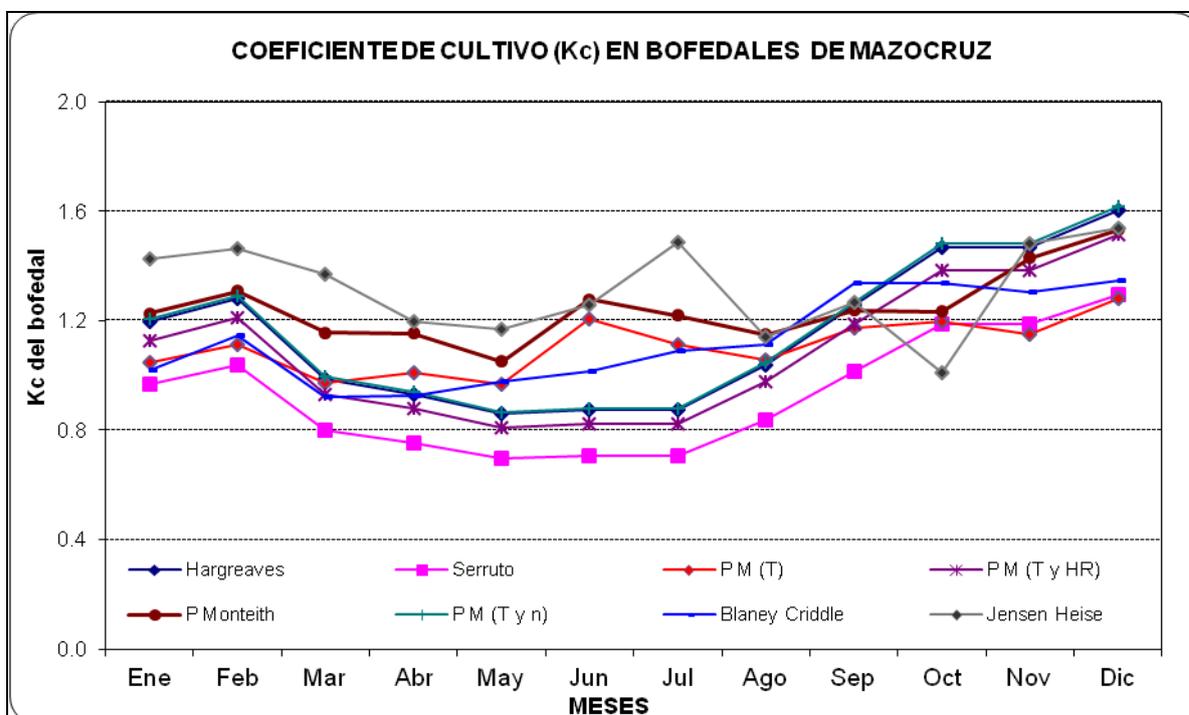


Figura 39. Comparación de Kc del bofedal calculado por diferentes métodos climático en el bofedal de Santa Rosa.

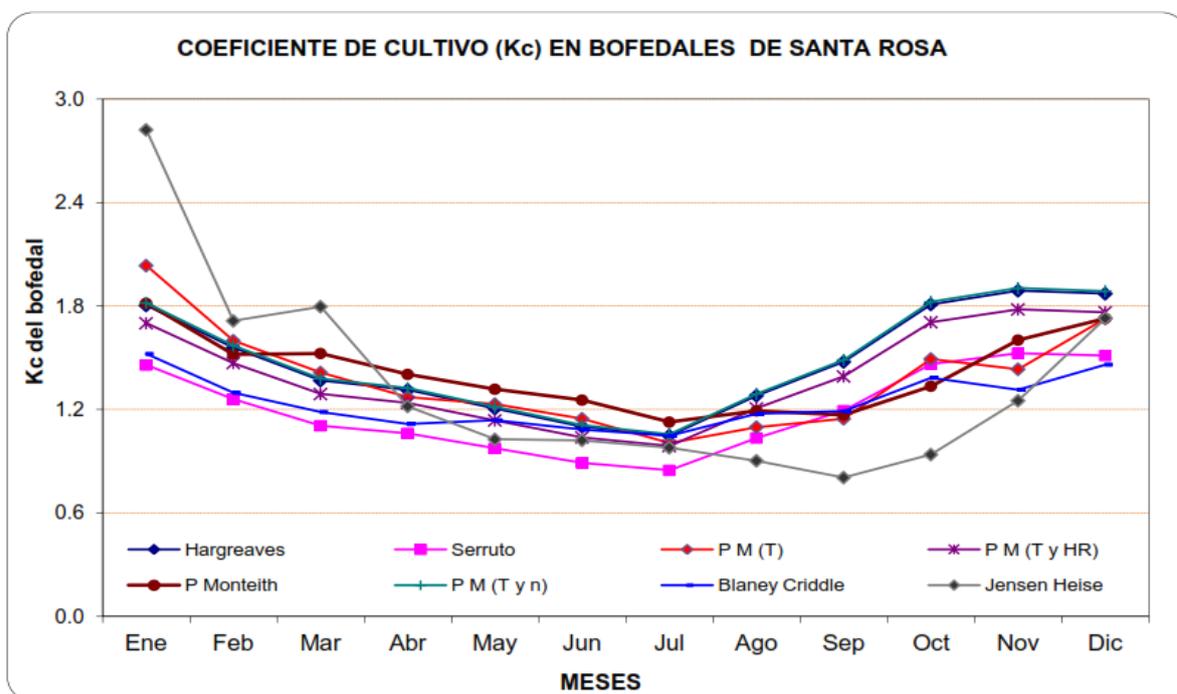
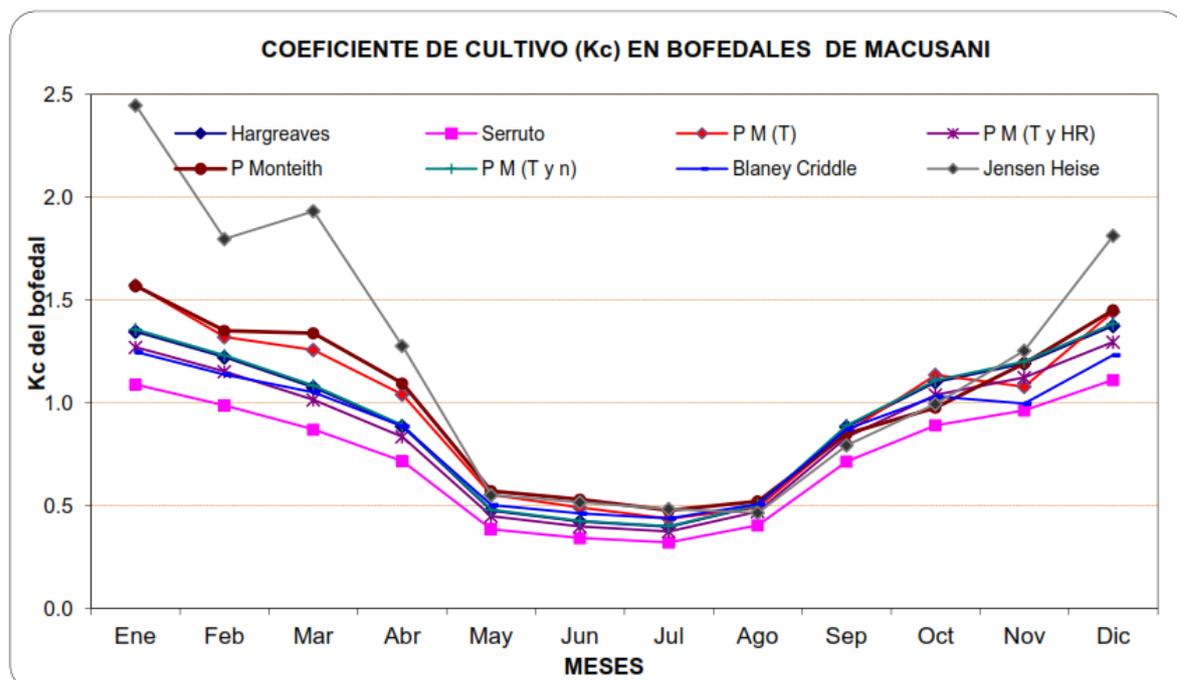


Figura 40. Comparación de Kc del bofedal calculado por diferentes métodos climático en el bofedal de Macusani.

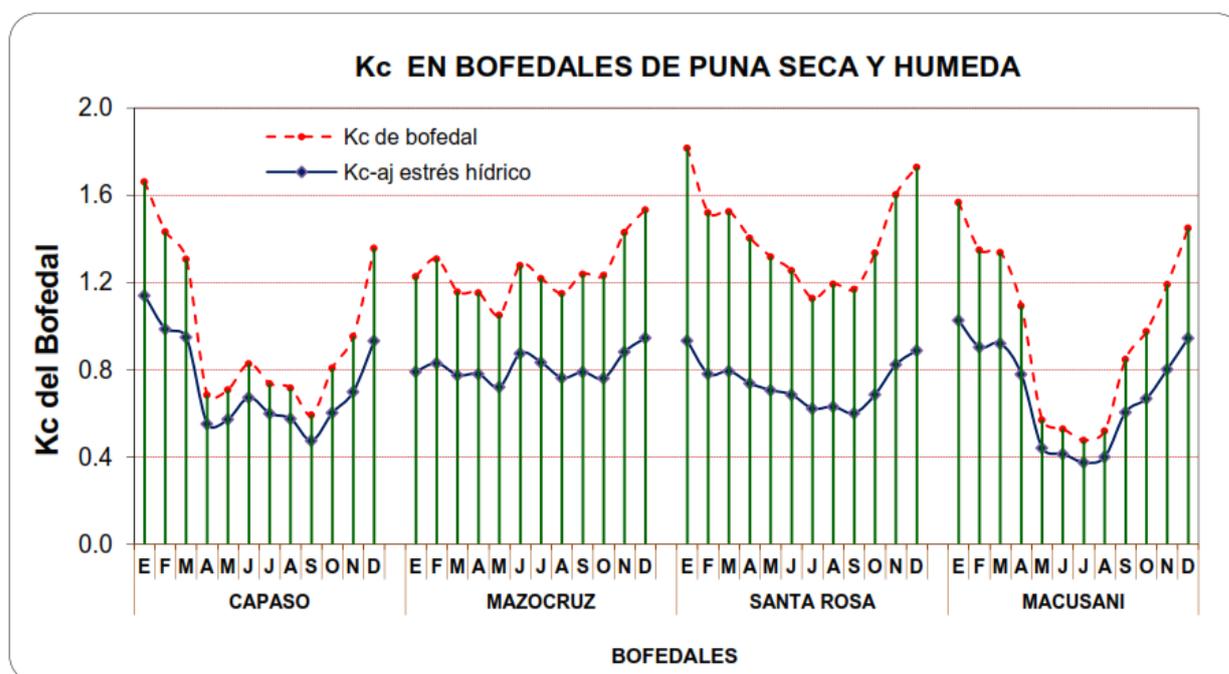


Cuadro 47. Coeficiente de cultivo (Kc) en bofedales de puna seca y húmeda calculado por Penman Monteith y Kc-aj determinado bajo condiciones de estrés hídrico.

Localidad		Kc y Kc-aj del bofedal												Media
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	
Kc	Capaso	1.66	1.43	1.31	0.68	0.71	0.83	0.74	0.72	0.59	0.81	0.95	1.36	0.98
	Mazocruz	1.23	1.31	1.16	1.15	1.05	1.28	1.22	1.15	1.24	1.23	1.43	1.53	1.25
	Santa Rosa	1.82	1.52	1.53	1.40	1.32	1.25	1.13	1.19	1.17	1.34	1.60	1.73	1.42
	Macusani	1.57	1.35	1.34	1.09	0.57	0.53	0.48	0.52	0.85	0.98	1.19	1.45	0.99
Media mensual		1.57	1.40	1.33	1.08	0.91	0.97	0.89	0.89	0.96	1.09	1.29	1.52	1.16
Media anual		1.16												
Kc-aj	Capaso	1.14	0.99	0.95	0.55	0.57	0.67	0.60	0.58	0.47	0.60	0.70	0.93	0.73
	Mazocruz	0.79	0.83	0.77	0.78	0.72	0.87	0.83	0.76	0.79	0.76	0.88	0.95	0.81
	Santa Rosa	0.93	0.78	0.79	0.74	0.71	0.69	0.62	0.63	0.60	0.69	0.82	0.89	0.74
	Macusani	1.03	0.90	1.01	0.78	0.44	0.41	0.37	0.40	0.60	0.67	0.80	0.94	0.70
Media mensual		0.97	0.88	0.88	0.71	0.61	0.66	0.61	0.59	0.62	0.68	0.80	0.93	0.74
Media anual		0.74												

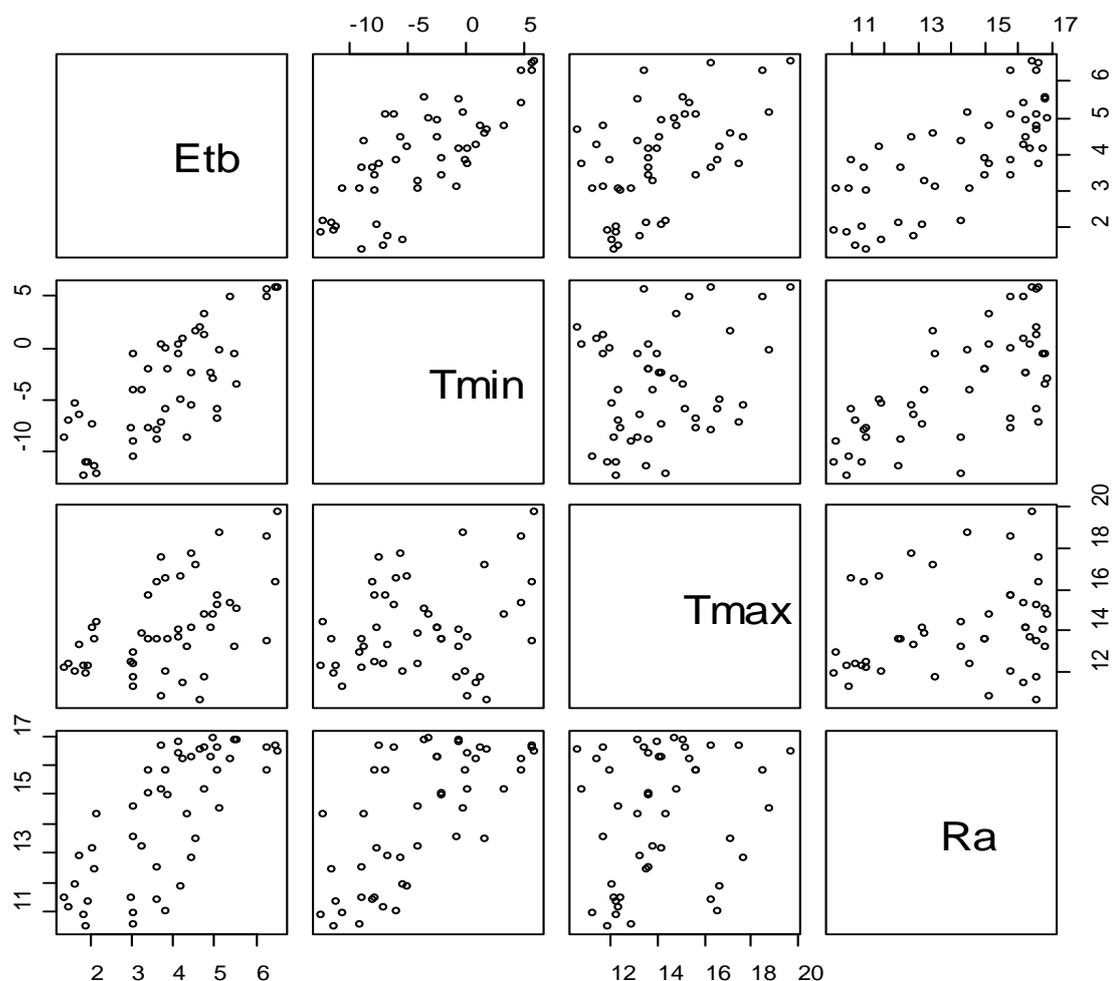
Fuente: Cálculos realizados en base a datos de campo.

Figura 41. Comparación de Kc del bofedal y Kc-aj bajo condiciones de estrés hídrico en puna seca y húmeda.



#### 4.8 MODELO PARA ESTIMAR LAS NECESIDADES DE AGUA EN BOFEDALES

Figura 42. Análisis de correlación en la evapotranspiración del bofedal y variables meteorológicas.



El modelo encontrado para regresión lineal múltiple y potencial múltiple tiene  $R^2 = 0.7021$  y  $R^2 = 0.6855$  respectivamente y las ecuaciones son la siguiente:

$$ETb = -0.5591 + 0.2473Tmax + 0.41611Ra$$

$$ETb = 0.0851Tm^{0.1109} * Ra^{0.13592}$$

Donde:

ETb : Evapotranspiración del bofedal (mm/día).

T : Temperatura media del aire (°C).

Ra : Radiación en el tope de la atmósfera (mm/día).

## V. CONCLUSIONES

Concluido el trabajo de investigación sobre la “Determinación experimental de las necesidades hídricas del bofedal en puna seca y húmeda en el departamento de Puno”; determinado por el método directo de Lisímetro y analizados con los métodos indirectos en base a los datos climáticos; para el cálculo de la evapotranspiración de referencia donde podemos concluir lo siguiente:

1. Las necesidades hídricas en bofedal de puna seca y puna húmeda durante el año de investigación 2008, calculado mediante el método de Lisímetros se obtuvo un promedio mensual de 5.54 mm/día en diciembre, 5.14 mm/día en enero, 4.87 mm/día en noviembre, 4.75 mm/día en febrero, 4.65 mm/día en octubre, 3.95 mm/día en marzo, 3.67 mm/día en setiembre, 3.22 mm/día en abril, 2.96 mm/día en agosto, 2.70 mm/día en mayo, 2.55 mm/día en junio y 2.47 mm/día en julio. En los meses que pertenecen a la época de avenidas se observan mayores requerimientos de agua en bofedales.

Los valores de  $K_c$  del bofedal fueron determinados usando los datos Lisimétricos de  $ET_b$  y  $ET_o$  (método Penman Monteith – FAO). El coeficiente de cultivo para el bofedal obtenido en la investigación fue de un máximo de 1.57 en enero, con un mínimo de 0.89 en julio y agosto respectivamente; presentando un promedio anual de  $K_c = 1.16$  para el bofedal. En el bofedal de Santa Rosa (puna húmeda) tiene un  $K_c$  promedio anual de 1.42, seguido por el bofedal de Mazocruz (puna seca) con 1.25, Macusani (puna húmeda) con 0.99 y el bodal de Capaco (puna seca) con 0.98. La curva de  $K_c$ , en el caso de los bofedales no tiene un final como en los cultivos de cereales puesto que el bofedal es una especie forrajera de tipo perenne; cabe señalar que el  $K_c$  es mayor en época de avenida y tendencia baja en época seca.

Se ha determinado el modelo para estimar las necesidades de agua en bofedales es:

$$ET_b = 0.0851T_m^{0.1109} * Ra^{0.13592} \text{ con } R=0.6855.$$

2. Los métodos utilizados para calcular la  $ET_o$  se obtuvo los siguientes resultados: Según el análisis estadístico, todos los métodos indirectos utilizados para el cálculo de la evapotranspiración de referencia ( $ET_o$ ); la prueba de significancia de Duncan a la

probabilidad de (0.05), los datos de la media estimada resultan diferentes entre métodos y localidades; pero estadísticamente usando el método de Duncan por ser datos no sesgados los métodos Serruto y Tanque A presentan una media estimada de ETo de 3.07 mm/día y 2.85mm/día respectivamente que son los más bajos en comparación a los demás métodos diferenciado como grupo D y E. Mientras el método de Blaney Criiddle presenta una media estimada de evapotranspiración de referencia de 3.68 mm/día que es el más alto en comparación con los demás métodos empíricos.

El método de Penman Monteith en base a todos los datos presenta mayor confiabilidad utilizando la prueba significancia a la probabilidad de 0.05 de Duncan por usar todas las variables climáticas, con una media estimada de 3.29 mm/mes; además es recomendable el uso de este método para el cálculo de la ETo y también la FAO-56 lo recomienda.

Para observar el comportamiento de la evapotranspiración del bofedal en puna seca y húmeda se efectuó pruebas de significancia de Duncan a la probabilidad de 0.05 para la evapotranspiración del cultivo de bofedal donde la media estimada en los bofedales de Santa Rosa (puna húmeda) es de 3.60 mm/día, Capaso (puna seca) con 3.34 mm/día, Mazocruz (puna seca) 3.31 mm/día y Macusani (puna húmeda) de 2.97 mm/día donde no hay mucha diferencia, sin embargo estadísticamente el bofedal de Santa Rosa y Macusani son diferentes a los bofedales de puna seca que son similares.

## VI. RECOMENDACIONES

Concluido con el presente trabajo de investigación sobre la “Determinación experimental de las necesidades hídricas del bofedal en puna seca y húmeda en el departamento de Puno”; por el método directo del Lisímetro y comparando con los métodos indirectos; se sugiere lo siguiente:

1. Continuar con las investigaciones sobre las necesidades hídricas en bofedales utilizando otros tipos de lisímetros e implementación de sensores para obtener requerimientos de agua reales para el riego del bofedal. Y es necesario realizar investigaciones de bofedales en otras zonas del departamento de Puno ya que las necesidades hídricas varían y tendrán diferentes comportamientos hídricos durante el año; realizar los intervalos de riego diarios y en condiciones de riego saturado.
2. El método indirecto recomendable para el cálculo de evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) es el método de Penman Monteith – FAO, por el uso de todas las variables climáticas. Es un método con gran probabilidad de predecir ET<sub>o</sub> correctamente con un amplio rango de localizaciones de climas y tiene disposición para su aplicación en situaciones de falta de datos, por lo que será el método utilizado para el cálculo de la evapotranspiración de referencia y estadísticamente se demostró en la presente investigación.
3. Cuando no existe la posibilidad de obtener datos lisimétricos en las zonas estudiadas los valores de K<sub>c</sub> se pueden estimar a partir del método propuesto por la FAO, pero con ciertas limitaciones.
4. Se recomienda utilizar los resultados de la evapotranspiración en bofedales en el planeamiento de proyectos de riego, programación de riegos en bofedal y en los estudios hidrológicos
5. Realizar estudios de la hidrogeología en bofedales a fin de estimar la conductividad hidráulica y determinar el nivel freático óptimo para cada tipo de bofedal con la instalación de piezómetros.

## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Aguilera, C., M. 1996. Relación Agua Suelo Planta y Atmósfera. Universidad Autónoma de Chapingo - México, 218 pp.
2. Alzérreca, H. 2001. Los campos naturales de pastoreo del Parque Nacional Sajama (PNS) y su capacidad de carga. Proyecto Manejo de Áreas Protegidas y Zonas de Amortiguación, Cooperación Técnica Alemana (MAPZA-GTZ). Informe de Consultoría. La Paz, Bolivia. 92pp.
3. Allen, R; Pereira, L; Raes, D; Smith, M. 2006. Evapotranspiración del cultivo. Estudio Riego y Drenaje, FAO-56. Organización de las Naciones Unidas Para la Agricultura y Alimentación. Roma.
4. Astorga J. 1987. Manejo de praderas nativas. Copia mimeografiado. UNA-Puno, Perú.
5. Autoridad Binacional de Lago Titicaca (ALT). 1993. Manejo y uso de agua en bofedales potenciación de la ganadería camélida. Plan Director Global Binacional de Protección- Prevención de Inundaciones y Aprovechamiento de los Recursos del Lago Titicaca, Río Desaguadero, Lago Poopó y Lago Salar de Coipasa (Sistema T.D.P.S.). La Paz, Bolivia. pp.12-13.
6. Argote G., Zea R. 2011. Manual y conservación de bofedales, Estacion Experimental Illpa Puno del INIA, 150pp.
7. Cadena, V. 2012. Hablemos de Riego. Dirección de Gestión Riego Provincia de Pichincha. Quito: Creadores Gráficos.
8. Calvache, M. 2012. Riego Andino Tecnificado. Quito; Universidad Central de Ecuador.
9. Choque J. 1990. Evaluación Agrostológica y ganadera de unidades familiares alpaqueras en puna seca del altiplano. Informe técnico Proyecto alpacas PAL. Serie de pastos, Puno - Perú.
10. Doorembos J., Pruitt W. O. 1977. "Las necesidades de agua de los cultivos" estudio FAO Riego y Drenaje Nº 24 Roma. 144 pp.
11. Flores M. 1991. Utilización de pastizales en status de conocimiento en Camélidos Sudamericanos (FAO).

12. García J, 1990 Agrometeorología. Energía y agua en la agricultura. Perú. 174 p.
13. Gurovich, I 1985. "Fundamentos y diseño de sistemas de riego". Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, San José de Costa Rica.
14. Jara R., Jorge. 1998. "Necesidades de agua de los cultivos". Universidad de Concepción. Editorial la Discusión, Chili. 250 pp.
15. Jensen, *et al.* . 1990. Evapotranspiración and irrigation water requirements. ASCE - Manuals and Reports on Engineering Practice. 270pp.
16. Lara, R. Y A. Lenis. 1996. Identificación y Caracterización de Bofedales en los Lípez - Potosí. En: Seminario Talle Manejo Sostenible de Praderas Nativas Andinas. Programa de Autodesarrollo Campesino-Fase Consolidación, Foro Boliviano para el Medioambiente y Desarrollo (PAC-C, FOBOMADE). Potosí, Bolivia. pp.33-38.
17. Miller T. 1994. "Ecología y Medio Ambiente". Grupo Editorial Interamericana. México. 869 pp.
18. Olivares, A. 1988. Experiencias de Investigaciones en Pradera Nativa en un Ecosistema Frágil. En: Primera Reunión Nacional en Praderas Nativas de Bolivia. Programa de Autodesarrollo Campesino, Corporación Desarrollo de Oruro (PAC, CORDEOR). Oruro, Bolivia. pp.265- 291.
19. Palacios, F. 1987. Pastizales de regadío para alpacas. En: Pastores de puna uywamichiq punarunakuna. Compilador Jorge A. Flores Ochoa. Instituto de Estudios peruanos. Lima, Perú. pp.155-170.
20. Palacios V., E. 1995. Curso Gerencial sobre sistemas de riego presurizado. Colegio de Postgraduados. Distrito Federal de México.
21. Plan Director Global Binacional de Protección, Prevención de Inundaciones y Aprovechamiento de los Recursos del lago Titicaca, río Desaguadero, lago Poopó y salar de Coipasa (Sistema TDPS). 1993. Estudio del Medio Natural. Convenio ALA/86/03 y ALA/87/23-Perú y Bolivia. Comisión de las Comunidades Europeas. La Paz, Bolivia. s/p.
22. Reinoso J. *et al.* 2001. Informe final sub-contrato N° 21.11 del ALT con CIRNMA. "Determinar la capacidad de carga de los bofedales para la alpaca en el ámbito peruano"
23. Serruto C, Ramón A. 1993. Riegos y Drenaje. UNA - PUNO. 240 pp.

24. Serruto C., R. (1993). "Una nueva fórmula para el cálculo de la evapotranspiración potencial". PIWA, Puno, Perú.
25. Smith, M. Seibert, P. 1993. La vegetación de la región de los Kallawaya y del Altiplano de Ulla Ulla en los Andes Boliviano. En: Ecología en Bolivia, Revista No.20. Instituto de Ecología, Universidad Mayor de San Andrés. La Paz, Bolivia. 84 pp.
26. Vargas G. 1992. Estructura Dinámica Estacional de la Vegetación en Bofedal, Tolar y Pajonal "Iru Ichu" en el Ecosistema de Puna Seca. Tesis para optar el título de: Ingeniero Zootecnista. Universidad Agraria La Molina. Lima-Perú. 138 pp.
27. Villaman P., R., Tijerina C. L., Quevedo N. A., Crespo P. G. (2001). Comparación de algunos métodos micrometeorológicos para estimar la evapotranspiración en el área de Montecillo, México. Terra, Vol. 19, No.3, pp. 281- 291.

## VIII. ANEXOS

Anexo 01: Registro de datos diarios de temperatura máxima, mínima y media; precipitación pluvial, humedad relativa, evaporación, velocidad del viento y horas de sol obtenida de estaciones de SENAMHI Puno.

Bof	Parámetros Meteorológicos	Meses											
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Capaso	Temperatura Mínima (°C)	-0.65	-2.40	-2.02	-7.50	11.05	11.13	12.31	11.45	12.18	-7.74	-7.27	-3.06
	Temperatura Máxima (°C)	13.23	14.16	13.61	14.17	12.30	11.90	12.27	13.57	14.37	15.69	17.51	14.75
	Temperatura Media (°C)	6.29	5.88	5.80	3.33	0.63	0.38	-0.02	1.06	1.09	3.98	5.12	5.84
	Precipitación Pluvial (mm)	146.00	86.90	53.20	1.50	0.00	0.00	0.00	6.60	0.00	0.00	0.60	110.70
	Radiación Extraterrestre (mm/día)	16.83	16.27	14.99	13.12	11.35	10.47	10.88	12.40	14.29	15.80	16.62	16.90
	Evaporación (mm/día)	5.00	4.18	3.51	4.33	3.96	3.32	3.63	3.87	4.78	5.70	5.05	4.04
	Velocidad de Viento (m/s)	1.86	2.07	1.87	2.49	2.52	1.82	1.76	1.66	2.17	2.37	2.40	1.89
	Humedad Relativa (%)	65.26	60.04	61.61	50.03	46.97	47.25	44.50	44.31	41.85	47.45	45.51	57.80
Mazocruz	Temperatura Mínima (°C)	-0.64	-2.40	-2.02	-4.13	-7.70	-9.07	10.47	-8.85	-8.72	-6.82	-5.98	-3.57
	Temperatura Máxima (°C)	14.00	14.15	13.61	13.82	12.47	12.90	11.26	13.63	13.20	15.66	15.22	15.10
	Temperatura Media (°C)	6.68	5.88	5.80	4.84	2.38	1.92	0.40	2.39	2.24	4.42	4.62	5.76
	Precipitación Pluvial (mm)	108.30	86.90	53.20	18.30	1.90	0.00	0.00	0.00	3.80	5.20	31.40	50.10
	Radiación Extraterrestre (mm/día)	16.79	16.26	15.02	13.18	11.43	10.56	10.96	12.47	14.33	15.80	16.59	16.86
	Evaporación (mm/día)	5.05	4.15	3.47	3.67	3.95	3.04	3.51	4.69	5.25	5.70	6.14	4.45
	Velocidad de Viento (m/s)	2.24	2.10	1.87	1.82	3.56	1.67	3.32	2.95	2.31	1.69	1.69	1.73
	Humedad Relativa (%)	64.17	60.04	61.61	57.02	52.47	49.24	49.43	48.42	49.44	49.25	51.63	56.15
Santa Rosa	Temperatura Mínima (°C)	5.71	4.82	3.20	1.67	-5.00	-5.91	-7.96	-5.59	-0.17	4.83	5.87	5.75
	Temperatura Máxima (°C)	13.49	15.35	14.82	17.13	16.65	16.57	16.35	17.69	18.77	18.53	19.71	16.34
	Temperatura Media (°C)	9.60	10.09	9.01	9.40	5.82	5.33	4.20	6.05	9.30	11.68	12.79	11.04
	Precipitación Pluvial (mm)	161.30	79.10	79.90	12.60	4.20	2.60	0.00	2.40	4.80	59.00	56.90	191.80
	Radiación Extraterrestre (mm/día)	16.60	16.21	15.15	13.47	11.83	11.00	11.38	12.79	14.50	15.80	16.43	16.63
	Evaporación (mm/día)	2.47	3.22	2.93	3.33	3.21	2.98	2.95	3.24	3.99	3.72	3.54	2.80
	Velocidad de Viento (m/s)	0.00	0.00	2.27	2.49	2.24	2.40	2.92	2.65	3.11	2.80	3.22	2.60
	Humedad Relativa (%)	79.36	73.10	70.71	62.78	51.04	49.36	46.11	48.61	56.45	66.76	66.57	73.24
Macusani	Temperatura Mínima (°C)	1.90	0.92	0.24	-0.71	-5.42	-7.07	-8.79	-6.55	-4.07	-0.04	0.21	1.24
	Temperatura Máxima (°C)	10.61	11.43	10.84	11.75	12.06	12.35	12.21	13.27	12.38	12.03	13.64	11.70
	Temperatura Media (°C)	6.26	6.18	5.54	5.52	3.32	2.64	1.71	3.36	4.16	5.99	6.92	6.47
	Precipitación Pluvial (mm)	152.40	81.30	106.00	27.00	14.20	4.00	0.00	6.00	14.70	61.00	31.20	118.30
	Radiación Extraterrestre (mm/día)	16.55	16.19	15.17	13.54	11.93	11.10	11.48	12.87	14.54	15.80	16.39	16.57
	Evaporación (mm/día)	1.64	2.17	1.92	1.98	2.24	2.35	2.35	2.53	2.50	2.19	2.51	1.86
	Velocidad de Viento (m/s)	3.03	3.24	3.33	3.38	2.86	3.09	3.20	3.18	3.42	3.05	3.31	3.10
	Humedad Relativa (%)	76.67	72.54	72.46	68.15	57.86	53.82	50.86	53.46	59.80	69.16	66.38	72.67

Fuente: SENAMHI Puno

Anexo 02: Cálculo de radiación extraterrestre diaria (Ro) expresada en equivalente de evaporación en mm/día y Duración media del día (N) para diferentes latitudes del hemisferio sur.

**Radiación extraterrestre para periodos diarios (Ra)**

La radiación extraterrestre, Ra, para cada día del año y para diversas latitudes se puede estimar a partir de la constante solar, la declinación solar y la época del año:

$$Ro = \frac{24 * 60}{\pi} G_{SC} d_r [\omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega)] \dots \dots \dots 1$$

Donde:

- Ro : Radiación extraterrestre (MJ/ m2 día)
- Gsc : Constante solar = 0,082 MJ /m2 min
- dr : Distancia relativa inversa Tierra-Sol (Ec. 4)
- ws : Angulo de radiación a la puesta del sol (Ec. 6 o 7) (rad)
- φ : Latitud [rad] (Ecuación 3)
- δ : Declinación solar (Ecuación 5) (rad).

Ro se expresa en MJ/m<sup>2</sup> día en la Ecuación 1. La evaporación equivalente en mm/día se obtiene multiplicando Ra por 0,408 (Ecuación 2). La latitud, φ, expresada en radianes es positiva para el hemisferio norte y negativa para el hemisferio sur.

*Evaporación equivalente (mm/día) = 0.408 \* Radiación(MJ/m<sup>2</sup> día) ... 2*

La conversión de grados decimales a radianes se da por:

$$[radianes] = \frac{\pi}{180} [grados decimales] \dots \dots \dots 3$$

Ejemplo:

$$17^{\circ}10'41.64''(\text{grados y minutos}) = 17+10/60+41.64/3600 = 17.18 (\text{grados decimales})$$

$$= (\pi/180)(-17.18) = -0.30 \text{ radianes}$$

La distancia relativa inversa Tierra-Sol, dr, y la declinación solar, δ, están dadas por:

$$d_r = 1 + 0.033 * \cos\left(\frac{2\pi}{365}J\right) \dots\dots\dots 4$$

$$\delta = 0.409 * \text{sen}\left(\frac{2\pi}{365}J - 1.39\right) \dots\dots\dots 5$$

Donde J es el número del día en el año entre 1 (1 de enero) y 365 (31 de diciembre). Los valores de J para todos los días del año y para cálculos mensuales, J en el día 15 del mes.

El ángulo de radiación a la hora de la puesta del sol,  $\omega_s$ , se da por:

$$\omega_s = \arccos[-\tan(\varphi) \tan(\delta)] \dots\dots\dots 6$$

Como la función de los arccos no está disponible en todos los lenguajes de programación, el ángulo de radiación a la hora de la puesta del sol se puede también calcular usando la función arctan:

$$\omega_s = \frac{\pi}{2} - \arctan\left[\frac{-\tan(\varphi) \tan(\delta)}{X^{0.5}}\right] \dots\dots\dots 7$$

Donde

$$X = 1 - [\tan(\varphi)]^2 [\tan(\delta)]^2 \dots\dots\dots 8$$

$$\text{si } X = 0.00001 \text{ si } X \leq 0$$

**Duración máxima de la insolación (N)**

La duración máxima de la insolación N, está dada por:

$$N = \frac{24}{\pi} \omega_s \dots\dots\dots 9$$

Donde:  $\omega_s$  es el ángulo de radiación a la hora de la puesta del sol calculado con Ecuaciones 6 y 7.

Anexo 03: Parámetros atmosféricos: Presión atmosférica (P), Calor Latente de Vaporización (λ) y Constante Psicométrica (γ) para diferentes altitudes (Z)

Altura (z) msnm	Presión Atmosférica (P)	Calor Latente de Vaporización (λ)		Altura (z) msnm	Presión Atmosférica (P)	Calor Latente de Vaporización (λ)	Constante Psicométrica (γ)
1000	90.0	2.45	0.060	3100	69.6	2.45	0.046
1100	89.0	2.45	0.059	3200	68.8	2.45	0.046
1200	87.9	2.45	0.058	3300	67.9	2.45	0.045
1300	86.8	2.45	0.058	3400	67.1	2.45	0.045
1400	85.8	2.45	0.057	3500	66.2	2.45	0.044
1500	84.8	2.45	0.056	3600	65.4	2.45	0.043
1600	83.8	2.45	0.056	3700	64.6	2.45	0.043
1700	82.8	2.45	0.055	3800	63.7	2.45	0.042
1800	81.8	2.45	0.054	3900	62.9	2.45	0.042
1900	80.8	2.45	0.054	4000	62.1	2.45	0.041
2000	79.8	2.45	0.053	4100	61.3	2.45	0.041
2100	78.8	2.45	0.052	4200	60.6	2.45	0.040
2200	77.9	2.45	0.052	4300	59.8	2.45	0.040
2300	76.9	2.45	0.051	4400	59.0	2.45	0.039
2400	76.0	2.45	0.050	4500	58.3	2.45	0.039
2500	75.0	2.45	0.050	4600	57.5	2.45	0.038
2600	74.1	2.45	0.049	4700	56.8	2.45	0.038
2700	73.2	2.45	0.049	4800	56.0	2.45	0.037
2800	72.3	2.45	0.048	4900	55.3	2.45	0.037
2900	71.4	2.45	0.047	5000	54.6	2.45	0.036
3000	70.5	2.45	0.047	5100	53.9	2.45	0.036

**Presión Atmosférica P.**

$$P = 101.3 \left( \frac{293 - 0.0065Z}{293} \right)^{5.26}$$

**Calor latente de vaporización (λ).** Se considera un valor constante de 2.45 MJ/kg para una temperatura del aire de 20°C. Para la simplificación de la ecuación de FAO Penman Monteith

**Constante Psicométrica (γ).** Se calcula por:

$$\gamma = \frac{c_p P}{\epsilon \lambda} = 0.665 * 10^{-3}$$

- Z : Elevación sobre el nivel del mar (m)
- γ : Constante psicométrica (kPa/°C)
- P : Presión atmosférica (kPa)
- λ : Calor latente de vaporización = 2.45 (MJ/kg)
- c<sub>p</sub> : Calor específico a presión constante = 1.013x10<sup>-3</sup>(MJ/Kg°C)
- ε : Coeficiente de peso molecular de vapor de agua/ aire seco = 0.622

Anexo 04: Porcentaje medio diario (p) de horas diurnas anuales a diferentes latitudes.

Latitud Sur	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
00°	0.270	0.270	0.270	0.270	0.270	0.270	0.270	0.270	0.270	0.270	0.270	0.270
02°	0.274	0.274	0.274	0.270	0.270	0.270	0.270	0.270	0.270	0.274	0.274	0.274
03°	0.276	0.276	0.276	0.270	0.270	0.270	0.270	0.270	0.270	0.276	0.276	0.276
04°	0.278	0.278	0.278	0.270	0.270	0.270	0.270	0.270	0.270	0.278	0.278	0.278
05°	0.280	0.280	0.280	0.270	0.270	0.270	0.270	0.270	0.270	0.280	0.280	0.280
06°	0.282	0.280	0.280	0.270	0.268	0.268	0.268	0.270	0.270	0.280	0.280	0.282
07°	0.284	0.280	0.280	0.270	0.266	0.266	0.266	0.270	0.270	0.280	0.280	0.284
08°	0.286	0.280	0.280	0.270	0.264	0.264	0.264	0.270	0.270	0.280	0.280	0.286
09°	0.288	0.280	0.280	0.270	0.262	0.262	0.262	0.270	0.270	0.280	0.280	0.288
10°	0.290	0.280	0.280	0.270	0.260	0.260	0.260	0.270	0.270	0.280	0.280	0.290
11°	0.290	0.280	0.280	0.270	0.260	0.258	0.260	0.268	0.270	0.280	0.282	0.290
12°	0.290	0.280	0.280	0.270	0.260	0.256	0.260	0.266	0.270	0.280	0.284	0.290
13°	0.290	0.280	0.280	0.270	0.260	0.254	0.260	0.264	0.270	0.280	0.286	0.290
14°	0.290	0.280	0.280	0.270	0.260	0.252	0.260	0.262	0.270	0.280	0.288	0.290
15°	0.290	0.280	0.280	0.270	0.260	0.250	0.260	0.260	0.270	0.280	0.290	0.290
16°	0.292	0.282	0.280	0.268	0.258	0.250	0.258	0.260	0.270	0.280	0.290	0.292
17°	0.294	0.284	0.280	0.266	0.256	0.250	0.256	0.260	0.270	0.280	0.290	0.294
18°	0.296	0.286	0.280	0.264	0.254	0.250	0.254	0.260	0.270	0.280	0.290	0.296
19°	0.298	0.288	0.280	0.262	0.252	0.250	0.252	0.260	0.270	0.280	0.290	0.298
20°	0.300	0.290	0.280	0.260	0.250	0.250	0.250	0.260	0.270	0.280	0.290	0.300
21°	0.302	0.290	0.280	0.260	0.250	0.248	0.248	0.260	0.270	0.282	0.292	0.302
22°	0.304	0.290	0.280	0.260	0.250	0.246	0.246	0.260	0.270	0.284	0.294	0.304
23°	0.306	0.290	0.280	0.260	0.250	0.244	0.244	0.260	0.270	0.286	0.296	0.306
24°	0.308	0.290	0.280	0.260	0.250	0.242	0.242	0.260	0.270	0.288	0.298	0.308
25°	0.310	0.290	0.280	0.260	0.250	0.240	0.240	0.260	0.270	0.290	0.300	0.310
26°	0.310	0.292	0.280	0.260	0.248	0.238	0.240	0.258	0.270	0.290	0.302	0.312
27°	0.310	0.294	0.280	0.260	0.246	0.236	0.240	0.256	0.270	0.290	0.304	0.314
28°	0.310	0.296	0.280	0.260	0.244	0.234	0.240	0.254	0.270	0.290	0.306	0.316
29°	0.310	0.298	0.280	0.260	0.242	0.232	0.240	0.252	0.270	0.290	0.308	0.318
30°	0.310	0.300	0.280	0.260	0.240	0.230	0.240	0.250	0.270	0.290	0.310	0.320
31°	0.312	0.300	0.280	0.258	0.238	0.228	0.238	0.250	0.270	0.290	0.310	0.320
32°	0.314	0.300	0.280	0.256	0.236	0.226	0.236	0.250	0.270	0.290	0.310	0.320
33°	0.316	0.300	0.280	0.254	0.234	0.224	0.234	0.250	0.270	0.290	0.310	0.320
34°	0.318	0.300	0.280	0.252	0.232	0.222	0.232	0.250	0.270	0.290	0.310	0.320
35°	0.320	0.300	0.280	0.250	0.230	0.220	0.230	0.250	0.270	0.290	0.310	0.320
36°	0.322	0.302	0.280	0.250	0.228	0.218	0.228	0.248	0.270	0.292	0.312	0.324
37°	0.324	0.304	0.280	0.250	0.226	0.216	0.226	0.246	0.270	0.294	0.314	0.328
38°	0.326	0.306	0.280	0.250	0.224	0.214	0.224	0.244	0.270	0.296	0.316	0.332
39°	0.328	0.308	0.280	0.250	0.222	0.212	0.222	0.242	0.270	0.298	0.318	0.336
40°	0.330	0.310	0.280	0.250	0.220	0.210	0.220	0.240	0.270	0.300	0.320	0.340

Anexo 05: Constantes de a y b para estimar la evapotranspiración de referencia en función de HR (%) y Viento (m/s).

Intervalo de HR (%)	Categoría de velocidad del viento diurno (m/s)							
	>8m/s		5 - 8		2 - 5		0 - 2	
	a	b	a	b	a	b	a	b
Alto > 70	-0.486	0.970	-0.410	0.923	-0.403	0.876	-0.350	0.829
Medio 55 - 70	-0.410	1.086	-0.300	1.020	-0.360	0.962	-0.480	0.912
Bajo 55 - 40	-0.120	1.129	-0.180	1.112	-0.280	1.048	-0.540	1.004

Uso: Blaney Criddle

Anexo 06: Coeficiente de tanque de cultivo (Kp) para el tanque clase A para diversas localizaciones de los tanques y varios valores de velocidad media de viento y de humedad relativa.

Tanque clase A		Caso A: Tanque situado en una superficie cultivada			Caso B: Tanque situado en un suelo desnudo			
HR media (%)		Baja	Media	Alta				
Velocidad del viento (m/s)	Distancia del cultivo a barlovento (m)	< 40	40 - 70	> 70	Distancia del barbecho a barlovento (m)	< 40	40 - 70	> 70
Baja < 2	1	0.55	0.65	0.75	1	0.70	0.80	0.85
	10	0.65	0.75	0.85	10	0.60	0.70	0.80
	100	0.70	0.80	0.85	100	0.55	0.65	0.75
	1000	0.75	0.85	0.85	1000	0.50	0.60	0.70
Moderado (2 - 5)	1	0.50	0.60	0.65	1	0.65	0.75	0.80
	10	0.60	0.70	0.75	10	0.55	0.65	0.70
	100	0.65	0.75	0.80	100	0.50	0.60	0.65
	1000	0.70	0.80	0.80	1000	0.45	0.55	0.60
Alta (5 - 8)	1	0.45	0.50	0.60	1	0.60	0.65	0.70
	10	0.55	0.60	0.65	10	0.50	0.55	0.65
	100	0.60	0.65	0.70	100	0.45	0.50	0.60
	1000	0.65	0.70	0.75	1000	0.40	0.45	0.55
Muy Alta > 8	1	0.40	0.45	0.50	1	0.50	0.60	0.65
	10	0.45	0.55	0.60	10	0.45	0.50	0.55
	100	0.50	0.60	0.65	100	0.40	0.45	0.50
	1000	0.55	0.60	0.65	1000	0.35	0.40	0.45

Uso: Lisímetro y Tanque A

Fuente: Serie FAO Riego y drenaje drenaje No. 24

Anexo 07: Características típicas de la humedad del suelo para diferentes tipos de suelo.

Tipos de suelo (Clasificación de la textura del suelo del USDA)	Características de la humedad del suelo			Parámetros de Evaporación	
	θFC	θWP	(θFC - θWP)	Cantidad de agua que puede ser agotada a través de la evaporación	
				Etapa 1 AFE	Etapa 1 y 2 AET* (Ze = 0,10 m)
	m3/m3	m3/m3	m3/m3	mm	mm
Arenoso	0,07 - 0,17	0,02 - 0,07	0,05 - 0,11	2 - 7	6 - 12
Arenoso Franco	0,11 - 0,19	0,03 - 0,10	0,06 - 0,12	4 - 8	9 - 14
Franco Arenoso	0,18 - 0,28	0,06 - 0,16	0,11 - 0,15	6 - 10	15 - 20
Franco	0,20 - 0,30	0,07 - 0,17	0,13 - 0,18	8 - 10	16 - 22
Franco Limoso	0,22 - 0,36	0,09 - 0,21	0,13 - 0,19	8 - 11	18 - 25
Limoso	0,28 - 0,36	0,12 - 0,22	0,16 - 0,20	8 - 11	22 - 26
Franco Arcillo Limoso	0,30 - 0,37	0,17 - 0,24	0,13 - 0,18	8 - 11	22 - 27
Arcillo Limoso	0,30 - 0,42	0,17 - 0,29	0,13 - 0,19	8 - 12	22 - 28
Arcilloso	0,32 - 0,40	0,20 - 0,24	0,12 - 0,20	8 - 12	22 - 29

Fuente: FAO-56, 2006 cuadro Nº 22 de la publicación actual.

Anexo 08: Certificado de análisis físico y químico de agua en los bofedales de puna seca y húmeda.



MINISTERIO DE AGRICULTURA  
 INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACION AGRARIA  
 DIRECCION GENERAL DE PROYECCION Y SERVICIOS AGRARIOS  
 LABORATORIO CONTROL DE CALIDAD  
 ESTACION EXPERIMENTAL ILLPA - PUNO  
 ANEXO SALCEDO



CERTIFICADO DE ANALISIS DE AGUA

SOLICITANTE  
 INTERESADO  
 DIRECCIÓN  
 PROCEDENCIA  
 LUGAR  
 N° MUESTRAS  
 TIPO DE ANALISIS  
 FECHA DE RECEPCIÓN  
 FECHA DE CERTIFICACIÓN

: INIA INCAGRO.  
 : Ing. Gregorio Argote Quispe.  
 :  
 : Río Capaso y Río Apopata.  
 : Varios.  
 : 02.  
 : Con fines de riego.  
 : 12 de Marzo del 2008.  
 : 14 de Marzo del 2008.

Clave Laboratorio	779	780
N° Muestras	01	02
Clave Usuario	Río Capaso	Río Apopata
Temperatura °C.	17,50	17,60
pH.	6,99	6,35
C. E. mmhos/cm 25°C	0,07	0,06
Ca meq/l.	0,60	0,40
Mg meq/l.	1,30	0,80
Na meq/l.	0,34	0,31
K meq/l.	0,70	0,67
Suma de Cationes	2,94	2,18
CO <sub>3</sub> meq/l.	0,00	0,00
HCO <sub>3</sub> meq/l.	0,40	0,60
Cl meq/l.	0,30	0,10
SO <sub>4</sub> meq/l.	0,91	1,08
NO <sub>3</sub> meq/l.	0,50	1,10
Suma de Aniones	2,11	2,88
SAR	0,34	0,40
Clasificación	C1S1	C1S1

Métodos utilizados en el Laboratorio:

- 1.- Methods of analysis for soils, plants and waters. University of California, Division of Agricultural Sciences E.U.A. Sexta reimpresión, Octubre 1988. 195p.
  - 2.- UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. 1996, Soil survey laboratory methods manual. Soil Survey Investigations Report N° 42, versión 3.0 Washington DC, USA, 693p.
- Determinación de pH Potenciómetro Calomelano.  
 Determinación de Conductividad Eléctrica Conductímetro de tres anillos.  
 Determinación de Calcio EDTA.  
 Determinación de magnesio EDTA.  
 Determinación de Carbonatos Fenolftaleína Titulación Con Acido Sulfúrico.  
 Determinación de Bicarbonatos Anaranjado de metilo.  
 Determinación de Cloruros Titulación con Nitrato de Plata.  
 Determinación de Nitratos Kjeldahl.  
 Determinación de Sulfatos Cloruro de Bario.

Conclusiones:

La muestra analizada de Agua CUMPLE con los requisitos de documentos referenciales.

Nota:

Cualquier corrección y/o enmendadura anula al presente documento. (El informe sólo afecta a las muestras sometidas a ensayo).

Observaciones:

Ninguna.



INIA  
 ESTACION EXPERIMENTAL ILLPA - PUNO

Ing° JORGE CANIHUA ROJAR  
 Jefe Laboratorio Análisis  
 SALCEDO

Prohibida la reproducción total o parcial, por cualquier medio sin el permiso del Laboratorio.

ILLPA : Carretera Puno - Juliaca , Km. 22 Telf. (051) 62-2779  
 PUNO (Sede): Rinconada de Salcedo, Telefax (051) 36-3812 Cel. (051) 62-2760  
 e-mail : illpa@inia.gob.pe, illpauvt@inia.gob.pe j.canihua@hotmail.com

Anexo 09: Certificado de análisis físico y químico del suelo en los bofedales de puna seca y húmeda.



MINISTERIO DE AGRICULTURA  
INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACION AGRARIA-INIA  
SERVICIO NACIONAL DE LABORATORIOS  
ESTACION EXPERIMENTAL ILLPA - PUNO  
ANEXO SALCEDO



**ANALISIS DE CARACTERIZACION**

Nombre: Proyecto INCAGRO. Ing. Gregorio Argote Quispe.

Nº de Boletín: 0256F3.

Dirección:

Procedencia: Varios.

Fecha de Recepción: 24 de Setiembre del 2007.

Fecha de Certificación: 28 de Setiembre del 2007.

Caracterización de Propiedades Relativamente Permanente del Suelo.

Nº	Cod. Lab.	MARCAS	ANALISIS MECANICO				CO <sub>2</sub> Ca %	Yeso me/100g	Mat. Org. %	N. TOTAL %
			Arena %	Arcilla %	Limo %	Textura				
			%	%	%					
1	256 F3	M1 Macusani A	58	5	37	FA	0.00		3.68	0.13
2	256 F4	M2 Macusani B	52	5	43	FA	0.00		3.68	0.13
3	256 F5	M6 Mazocruz B	47	11	42	F	0.00		2.09	0.07
4	256 G1	M5 Mazocruz A	38	9	53	FL	0.00		2.09	0.08
5	256 G2	M7 Capaso A	38	13	49	F	0.00		3.77	0.14
6	256 G3	M3 Santa Rosa A	46	9	45	F	0.00		3.62	0.13
7	256 G4	M4 Pinaya A	48	7	45	FA-F	0.00		3.59	0.13
8										
9										

Caracterización del Estado de Fertilidad y Condiciones Alterables del Suelo.

Nº	Suelo : Agua 1:2.5		NUTRIENTES DISPONIBLES				Boro	CATIONES CAMBIABLES					CIC	Suma Cationes
	pH	C.E. mmhos/cm	P (ppm)	K (ppm)	Mn (ppm)	Zn (ppm)	Soluble (ppm)	Al me/100g	Ca me/100g	Mg me/100g	Na me/100g	K me/100g		
1	4.30	0.086	3.95	42.90				0.10	6.10	1.40	0.29	0.79	8.30	8.68
2	4.00	0.037	1.40	33.51				0.15	5.30	3.20	0.32	1.00	10.00	9.97
3	5.31	0.044	5.40	59.62				0.05	4.00	1.30	0.47	1.49	6.99	7.31
4	5.52	0.077	3.20	58.57				T	2.80	2.60	0.46	1.48	7.10	7.34
5	5.10	0.331	2.30	50.22				0.05	16.50	4.70	0.87	1.93	18.30	24.05
	4.99	0.151	3.05	35.60				0.10	5.20	3.80	0.18	0.78	8.99	10.06
7	5.51	0.055	1.10	50.22				T	8.10	3.80	0.32	1.47	13.40	13.69
8														
9														

Métodos utilizados en el Laboratorio:

1. Determinación de pH Potenciómetro Calomelano.
2. Determinación de Conductividad Eléctrica Conductímetro de tres anillos.
3. Determinación de Materia Orgánica Walkley y Black modificado.
4. Determinación de Nitrógeno total Semimicrokjeldahl.
5. Determinación de Carbonatos de calcio Gasovolumétrico.
6. Determinación de Aluminio cambiante Peech.
7. Determinación de Calcio y Magnesio EDTA - VERSENATO.
8. Determinación de potasio Disponible Fotómetro de flama. (Acetato De Amonio).
9. Determinación de Sodio y Potasio cambiante Fotómetro de flama (Acetato de Amonio pH 7).

Conclusiones:

La muestra analizada de SUELO CUMPLE con los requisitos de documentos referenciales.

Nota:

Cualquier corrección y/o enmendadura anula al presente documento.



INIA  
ESTACION EXPERIMENTAL ILLPA - PUNO  
Ingº JORGE CANIHUA ROJAS  
Jefe Laboratorio Análisis  
SALCEDO

Anexo 10: Cálculo de evapotranspiración referencia ETo método de Tanque de Tipo A.

$$ET_o = K_p * E_{pan}$$

ETo : Evapotranspiración de referencia (mm/día).

Kp : Coeficiente del tanque evaporímetro.

Epan : Evaporación del tanque evaporímetro (mm/día).

ETo diaria y promedio mensual para el mes de enero y para el bofedal de Capaso.

Bof	Mes	Día	HR (%)	Vv m/s	Evap (mm/día)	Kp	ETo (mm/día)	ETo (mm/día)
Ca	1	1	63.80	2.67	4.80	0.80	3.84	4.1
Ca	1	2	56.40	1.33	7.70	0.85	6.55	
Ca	1	3	68.00	2.00	4.00	0.80	3.20	
Ca	1	4	70.10	2.00	2.00	0.80	1.60	
Ca	1	5	71.10	2.00	3.60	0.80	2.88	
Ca	1	6	71.10	1.33	3.80	0.85	3.23	
Ca	1	7	65.90	1.33	5.80	0.85	4.93	
Ca	1	8	65.90	2.33	2.20	0.80	1.76	
Ca	1	9	63.80	0.67	8.80	0.85	7.48	
Ca	1	10	72.20	0.67	8.50	0.85	7.23	
Ca	1	11	70.10	0.67	7.80	0.85	6.63	
Ca	1	12	68.90	2.00	8.60	0.80	6.88	
Ca	1	13	67.00	1.33	8.80	0.85	7.48	
Ca	1	14	65.90	2.00	9.00	0.80	7.20	
Ca	1	15	68.90	1.33	6.30	0.85	5.36	
Ca	1	16	63.90	2.67	6.40	0.80	5.12	
Ca	1	17	61.10	1.33	3.20	0.85	2.72	
Ca	1	18	65.00	2.00	7.70	0.80	6.16	
Ca	1	19	57.60	2.00	6.30	0.80	5.04	
Ca	1	20	63.00	1.33	0.80	0.85	0.68	
Ca	1	21	73.40	3.33	1.50	0.80	1.20	
Ca	1	22	68.00	1.33	2.20	0.85	1.87	
Ca	1	23	62.60	1.33	3.90	0.85	3.32	
Ca	1	24	61.70	2.67	1.70	0.80	1.36	
Ca	1	25	70.00	2.67	3.00	0.80	2.40	
Ca	1	26	60.00	2.00	4.30	0.80	3.44	
Ca	1	27	62.00	1.33	3.70	0.85	3.15	
Ca	1	28	59.10	3.33	6.40	0.80	5.12	
Ca	1	29	58.30	2.67	3.70	0.80	2.96	
Ca	1	30	62.80	2.00	4.50	0.80	3.60	
Ca	1	31	65.40	2.00	4.00	0.80	3.20	

Fuente: Cálculo evapotranspiración de referencia con datos de campo.

Anexo 11: Cálculo de evapotranspiración referencia ETo método de Hargreaves Modificado.

$$ET_o = 0.0023R_o(T + 17.78)(T_{max} - T_{min})^{0.50}$$

ET<sub>o</sub> : Evapotranspiración de referencia diaria, (mm/día).

R<sub>o</sub> : Radiación solar extraterrestre de evaporación (mm/día).

T : Temperatura media del aire (°C).

T<sub>max</sub> : Temperatura máxima del aire (°C).

T<sub>min</sub> : Temperatura mínima del aire (°C).

ETo diaria y promedio mensual para el mes de enero y para el bofedal de Capaso.

Bof	Mes	Dia	Tmin (°C)	Tmax (°C)	T (°C)	Tmax- Tmin	Ro (mm/día)	ETo (mm/día)	ETo (mm/día)
Ca	1	1	-1.0	13.5	6.3	14.5	16.93	3.57	3.5
Ca	1	2	-2.0	16.5	7.3	18.5	16.92	4.19	
Ca	1	3	0.0	12.5	6.3	12.5	16.92	3.31	
Ca	1	4	0.0	11.5	5.8	11.5	16.92	3.11	
Ca	1	5	-0.5	10.5	5.0	11.0	16.91	2.94	
Ca	1	6	-0.5	10.5	5.0	11.0	16.91	2.94	
Ca	1	7	-0.5	13.0	6.3	13.5	16.91	3.44	
Ca	1	8	-0.5	13.0	6.3	13.5	16.90	3.43	
Ca	1	9	-1.0	13.5	6.3	14.5	16.90	3.56	
Ca	1	10	0.0	10.5	5.3	10.5	16.89	2.90	
Ca	1	11	0.0	11.5	5.8	11.5	16.88	3.10	
Ca	1	12	-0.5	11.5	5.5	12.0	16.88	3.13	
Ca	1	13	0.0	13.0	6.5	13.0	16.87	3.40	
Ca	1	14	-0.5	13.0	6.3	13.5	16.86	3.43	
Ca	1	15	-0.5	11.5	5.5	12.0	16.86	3.13	
Ca	1	16	-0.5	14.0	6.8	14.5	16.85	3.62	
Ca	1	17	-0.5	15.5	7.5	16.0	16.84	3.92	
Ca	1	18	0.0	14.0	7.0	14.0	16.83	3.59	
Ca	1	19	-0.5	17.5	8.5	18.0	16.82	4.32	
Ca	1	20	-0.5	14.5	7.0	15.0	16.81	3.71	
Ca	1	21	0.5	10.5	5.5	10.0	16.80	2.85	
Ca	1	22	0.0	12.5	6.3	12.5	16.79	3.28	
Ca	1	23	-2.0	13.0	5.5	15.0	16.77	3.48	
Ca	1	24	-2.0	13.5	5.8	15.5	16.76	3.57	
Ca	1	25	-0.5	11.0	5.3	11.5	16.75	3.01	
Ca	1	26	-1.5	15.0	6.8	16.5	16.73	3.84	
Ca	1	27	-0.5	15.0	7.3	15.5	16.72	3.79	
Ca	1	28	-1.5	15.5	7.0	17.0	16.70	3.93	
Ca	1	29	-1.0	16.5	7.8	17.5	16.69	4.10	
Ca	1	30	-1.5	13.5	6.0	15.0	16.67	3.53	
Ca	1	31	-0.7	13.0	6.2	13.7	16.65	3.40	

Fuente: Cálculo evapotranspiración de referencia con datos de campo.

Anexo 12: Cálculo de evapotranspiración referencia ETo método de Serruto.

$$ET_o = 0.003(R_s)^{2.5} + (0.16T^{0.88})$$

ET<sub>o</sub> : Evapotranspiración de referencia, (mm/día).

T : Temperatura media del aire (°C).

Ro : Radiación solar extraterrestre de evaporación (mm/día).

ETo diaria y promedio mensual para el mes de enero y para el bofedal de Capaso.

Bof	Mes	Día	X	Tmin (°C)	Tmax (°C)	T (°C)	Ro (mm/día)	ETo (mm/día)	ETo (mm/día)
Ca	1	1	!	-1.0	13.5	6.3	16.93	4.34	4.3
Ca	1	2		-2.0	16.5	7.3	16.92	4.45	
Ca	1	3		0.0	12.5	6.3	16.92	4.34	
Ca	1	4		0.0	11.5	5.8	16.92	4.28	
Ca	1	5		-0.5	10.5	5.0	16.91	4.19	
Ca	1	6		-0.5	10.5	5.0	16.91	4.19	
Ca	1	7		-0.5	13.0	6.3	16.91	4.33	
Ca	1	8		-0.5	13.0	6.3	16.90	4.33	
Ca	1	9		-1.0	13.5	6.3	16.90	4.32	
Ca	1	10		0.0	10.5	5.3	16.89	4.21	
Ca	1	11		0.0	11.5	5.8	16.88	4.26	
Ca	1	12		-0.5	11.5	5.5	16.88	4.23	
Ca	1	13		0.0	13.0	6.5	16.87	4.34	
Ca	1	14		-0.5	13.0	6.3	16.86	4.31	
Ca	1	15	E	-0.5	11.5	5.5	16.86	4.22	
Ca	1	16		-0.5	14.0	6.8	16.85	4.35	
Ca	1	17		-0.5	15.5	7.5	16.84	4.43	
Ca	1	18		0.0	14.0	7.0	16.83	4.37	
Ca	1	19		-0.5	17.5	8.5	16.82	4.53	
Ca	1	20		-0.5	14.5	7.0	16.81	4.36	
Ca	1	21		0.5	10.5	5.5	16.80	4.19	
Ca	1	22		0.0	12.5	6.3	16.79	4.27	
Ca	1	23		-2.0	13.0	5.5	16.77	4.17	
Ca	1	24		-2.0	13.5	5.8	16.76	4.20	
Ca	1	25		-0.5	11.0	5.3	16.75	4.13	
Ca	1	26		-1.5	15.0	6.8	16.73	4.29	
Ca	1	27		-0.5	15.0	7.3	16.72	4.34	
Ca	1	28		-1.5	15.5	7.0	16.70	4.31	
Ca	1	29		-1.0	16.5	7.8	16.69	4.38	
Ca	1	30		-1.5	13.5	6.0	16.67	4.18	
Ca	1	31		-0.7	13.0	6.2	16.65	4.19	

Fuente: Cálculo evapotranspiración de referencia con datos de campo.

Anexo 13: Cálculo de Evapotranspiración de referencia ETo método de Penman Monteith con todos los datos.

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_{n---} - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$$

- ETo : Evapotranspiración de referencia (mm/día).  
 Rn : Radiación neta en la superficie del cultivo (MJ/m<sup>2</sup> día).  
 Ra : Radiación extraterrestre (mm/día).  
 G : Flujo del calor del suelo (MJ /m<sup>2</sup> día).  
 T : Temperatura media del aire a 2 m de altura (°C).  
 U<sub>2</sub> : Velocidad del viento a 2 m de altura (m/s).  
 e<sub>s</sub> : Presión de vapor de saturación (kPa).  
 e<sub>a</sub> : Presión real de vapor (kPa).  
 e<sub>s</sub> – e<sub>a</sub> : Déficit de presión de vapor (kPa).  
 Δ : Pendiente de la curva de presión de vapor (kPa/°C).  
 γ : Constante psicométrica (kPa/°C).

**METODO PENMAN - MONTEITH - FAO**  
A PARTIR DE TODOS LOS DATOS

**DONDE:**

- Eto = Evapotranspiración (mm/día).
- Rn = Radiación neta en la superficie del cultivo (MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>).
- Ra = Radiación extraterrestre (mm/Día).
- G = Flujo del calor del suelo (MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>).
- T = Temperatura media del aire a 2 m de altura (°C).
- U2 = Velocidad del viento a 2 m de altura (m/s).
- es = Presión de vapor saturado (kPa).
- ea = Presión real de Vapor (kPa).
- es - ea = Deficit de presión de vapor (kPa).
- = Pendiente de la curva de presión de vapor (kPa °C<sup>-1</sup>).
- = Constante psicrométrica (kPa °C<sup>-1</sup>).

$$ET_o = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{90}{T + 273}}{\Delta + \gamma(1 + 0.3)}$$

**Latitud Sur exacta :**

**16° 43' 58" → 16,73**

Anexo 14: Cálculo de evapotranspiración referencia ETo método de Penman Monteith con temperatura.

**METODO PENMAN - MONTEITH - FAO**  
 CALCULO DE LA ETO CUANDO SE CUENTA CON TEMPERATURA

RESUMEN MENSUAL

MESES	Temperature Min.(grados centigrados)	Temperature Max.(grados centigrados)	Temperatura Media (grados centigrados)	Abs. Temp.	Boltzmann Constant	es (Tmin) (Presión de sat. Máxima)	es (Tmax)(Presión de sat. Mínima)	es media	ea (De la Temp. mínima)	Radiación Extraterrestre (de Tabla 1)	Clear Sky solar	Velocidad del viento(m/s)	Radiación Global calculada	Boltz T <sup>4</sup>	0.34-0.14raiz(ea)	1.35*Rs/Rso-0.35	0.77*Rs	Rn	G	Rn-G	Delta	Gamma (De Tabla 3)	Termino Radiativo Delta	Termino Radiativo Gamma	900/Tabs.	es-ea	Eto (mm/dia)	Total mensual (mm/mes)
ENE	-0.65	13.23	6.29	279.29	4.9E-09	0.58	1.53	1.06	0.58	41.25	33.00	2.00	24.50	29.95	0.23	0.65	18.87	14.30	-0.01	14.31	0.07	0.04	0.49	0.30	3.22	0.47	3.81	117.98
FEB	-2.46	14.18	5.86	278.86	4.9E-09	0.52	1.63	1.07	0.52	39.94	31.95	2.00	25.91	29.82	0.24	0.74	19.95	14.60	0.01	14.59	0.06	0.04	0.49	0.30	3.23	0.56	4.00	112.00
MAR	-1.94	13.63	5.85	278.85	4.9E-09	0.53	1.57	1.05	0.53	37.13	29.70	2.00	23.37	29.79	0.24	0.71	17.99	12.94	0.00	12.94	0.06	0.04	0.49	0.30	3.23	0.52	3.59	111.33
ABR	-7.37	14.15	3.39	276.39	4.9E-09	0.36	1.62	0.99	0.36	32.54	26.03	2.00	24.11	28.88	0.26	0.90	18.57	11.88	0.08	11.81	0.06	0.04	0.45	0.33	3.26	0.63	3.51	105.35
MAY	-7.48	12.52	2.52	275.52	4.9E-09	0.36	1.46	0.91	0.36	28.13	22.51	2.00	20.07	28.49	0.26	0.85	15.45	9.20	0.05	9.15	0.05	0.04	0.44	0.34	3.27	0.55	2.83	87.88
JUN	-10.70	12.90	1.10	274.10	4.9E-09	0.28	1.50	0.89	0.28	25.80	20.64	2.00	19.95	28.00	0.27	0.96	15.36	8.20	-0.02	8.22	0.05	0.04	0.41	0.35	3.28	0.61	2.79	83.83
JUL	-10.45	12.29	0.92	273.92	4.9E-09	0.28	1.45	0.86	0.28	26.63	21.31	2.00	20.21	27.90	0.27	0.93	15.56	8.62	0.02	8.61	0.05	0.04	0.41	0.35	3.29	0.58	2.79	86.34
AGO	-11.35	14.06	1.35	274.35	4.9E-09	0.26	1.62	0.94	0.26	30.31	24.25	2.00	24.35	28.15	0.27	1.01	18.75	11.12	-0.03	11.15	0.05	0.04	0.42	0.35	3.28	0.68	3.44	106.64
SEP	-12.09	14.80	1.36	274.36	4.9E-09	0.24	1.69	0.97	0.24	35.02	28.01	2.00	29.02	28.19	0.27	1.05	22.34	14.33	0.02	14.32	0.05	0.04	0.42	0.35	3.28	0.72	4.08	122.48
OCT	-7.66	15.68	4.01	277.01	4.9E-09	0.35	1.79	1.07	0.35	38.70	30.96	2.00	29.84	29.19	0.26	0.95	22.97	15.82	-0.08	15.90	0.06	0.04	0.46	0.32	3.25	0.72	4.48	138.76
NOV	-7.30	17.51	5.11	278.11	4.9E-09	0.36	2.01	1.18	0.36	40.71	32.57	2.00	32.42	29.68	0.26	0.99	24.96	17.39	-0.01	17.40	0.06	0.04	0.48	0.31	3.24	0.82	5.04	151.32
DIC	-3.25	14.82	5.83	278.83	4.9E-09	0.49	1.71	1.10	0.49	41.38	33.11	2.00	28.02	29.84	0.24	0.79	21.57	15.80	-0.02	15.83	0.06	0.04	0.49	0.31	3.23	0.61	4.35	134.89

Anexo 15: Cálculo de evapotranspiración referencia ETo método de Penman Monteith con temperatura y humedad relativa.

CALCULO DE LA ETo CUANDO SE CUENTA SOLO CON TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA

RESUMEN MENSUAL

MESES	Temperature Min.(grados centigrados)	Temperature Max.(grados centigrados)	Temperatura Media (grados centigrados)	Abs. Temp.	Boltzmann Constant	Humedad Relativa (tanto por 1)	es (Tmin) (Presión de saturación Máxima)	es (Tmax)(Presión de saturación Mínima)	es media	ea (RH * es media)	Radiación Extraterrestre (de Tabla 1)	Clear Sky solar	Velocidad del viento(m/s)	Radiación Global calculada	Boltz T <sup>1/4</sup>	0.34-0.14raiz(ea)	1.35*Rs/Rso-0.35	0.77*Rs	Rn	G	Rn-G	Delta	Gamma (De Tabla 3)	Termino Radiativo Delta	Termino Radiativo Gamma	900/Tabs.	es-ea	Eto (mm/día)	Total mensual Eto (mm/mes)
ENE	-0.65	13.23	6.29	279.29	4.9E-09	0.65	0.58	1.53	1.06	0.69	41.25	33.00	2.00	24.50	29.95	0.22	0.65	18.87	14.49	-0.01	14.50	0.07	0.04	0.49	0.30	3.22	0.37	3.64	112.1
FEB	-2.46	14.18	5.86	278.86	4.9E-09	0.60	0.52	1.63	1.07	0.64	39.94	31.95	2.00	25.91	29.82	0.23	0.74	19.95	14.87	0.01	14.86	0.06	0.04	0.49	0.30	3.23	0.43	3.81	106.1
MAR	-1.94	13.63	5.85	278.85	4.9E-09	0.62	0.53	1.57	1.05	0.65	37.13	29.70	2.00	23.37	29.79	0.23	0.71	17.99	13.17	0.00	13.17	0.06	0.04	0.49	0.30	3.23	0.40	3.41	105.1
ABR	-7.37	14.15	3.39	276.39	4.9E-09	0.50	0.36	1.62	0.99	0.50	32.54	26.03	2.00	24.11	28.88	0.24	0.90	18.57	12.29	0.08	12.21	0.06	0.04	0.45	0.30	3.26	0.49	3.28	98.5
MAY	-7.48	12.52	2.52	275.52	4.9E-09	0.53	0.36	1.46	0.91	0.48	28.13	22.51	2.00	20.07	28.49	0.24	0.85	15.45	9.53	0.05	9.48	0.05	0.04	0.44	0.34	3.27	0.43	2.62	81.3
JUN	-10.70	12.90	1.10	274.10	4.9E-09	0.47	0.28	1.50	0.89	0.41	25.80	20.94	2.00	19.95	28.00	0.25	0.96	15.36	8.65	-0.02	8.67	0.05	0.04	0.41	0.35	3.28	0.48	2.56	76.9
JUL	-10.45	12.29	0.92	273.92	4.9E-09	0.48	0.28	1.45	0.86	0.41	26.63	21.31	2.00	20.21	27.90	0.25	0.93	15.56	9.04	0.02	9.03	0.05	0.04	0.41	0.35	3.29	0.45	2.56	79.4
AGO	-11.35	14.06	1.35	274.35	4.9E-09	0.44	0.26	1.62	0.84	0.41	30.31	24.25	2.00	24.35	28.15	0.25	1.01	18.75	11.65	-0.03	11.67	0.05	0.04	0.42	0.35	3.28	0.53	3.20	99.0
SEP	-12.09	14.80	1.36	274.36	4.9E-09	0.41	0.24	1.69	0.97	0.40	35.02	28.01	2.00	29.02	28.19	0.25	1.05	22.34	14.91	0.02	14.89	0.05	0.04	0.42	0.35	3.28	0.57	3.83	114.1
OCT	-7.66	15.68	4.01	277.01	4.9E-09	0.48	0.35	1.79	1.07	0.51	38.70	30.96	2.00	29.84	29.19	0.24	0.95	22.97	16.30	-0.08	16.38	0.06	0.04	0.46	0.32	3.25	0.56	4.24	131.1
NOV	-7.30	17.51	5.11	278.11	4.9E-09	0.45	0.36	2.01	1.18	0.54	40.71	32.57	2.00	32.42	29.68	0.24	0.99	24.96	17.96	-0.01	17.97	0.06	0.04	0.48	0.31	3.24	0.64	4.79	143.1
DIC	-3.25	14.92	5.83	278.83	4.9E-09	0.57	0.49	1.71	1.10	0.62	41.38	33.11	2.00	28.02	29.84	0.23	0.79	21.57	16.13	-0.02	16.15	0.06	0.04	0.49	0.31	3.23	0.48	4.15	128.1

Anexo 16: Cálculo de evapotranspiración referencia ETo método de Penman Monteith con temperatura y horas de sol reales.

**METODO PENMAN - MONTEITH - FAO**  
 CALCULO DE LA ETo CUANDO SE CUENTA CON TEMPERATURA Y HORAS DE SOL REALES

**RESUMEN MENSUAL**

MESES	Temperature Min.(grados centigrados)	Temperature Max.(grados centigrados)	Temperatura Media (grados centigrados)	Abs. Temp.	Boltzmann Constant	es (Tmin) (Presión de sat. Máxima)	es (Tmax)(Presión de sat. Mínima)	es media	ea (De la Temp, mínima)	Radiación Extraterrestre (de Tabla 1)	n numero de Hras de sol	N (de Tabla 2)	Clear Sky solar	Velocidad del viento(m/s)	Radiación Global calculada	Boltz T <sup>1/4</sup>	0.34-0.14raiz(ea)	1.35*Rs/Rso-0.35	0.77*Rs	Rn	G	Rn-G	Delta	Gamma (De Tabla 3)	Termino Radiativo Delta	Termino Radiativo Gamma	900/Tabs.	es-ea	Eto (mm/dia)	Total mensual (mm/mes)
ENE	-0.65	13.23	6.29	279.29	4.9E-09	0.58	1.53	1.06	0.58	41.25	6.56	12.94	33.00	2.00	20.78	29.95	0.23	0.50	16.00	12.51	-0.01	12.51	0.07	0.04	0.49	0.30	3.22	0.47	3.44	106.68
FEB	-2.46	14.18	5.86	278.86	4.9E-09	0.52	1.63	1.07	0.52	39.94	7.28	12.54	31.95	2.00	21.57	29.82	0.24	0.56	16.61	12.60	0.01	12.59	0.06	0.04	0.49	0.30	3.23	0.56	3.60	100.79
MAR	-1.94	13.63	5.85	278.85	4.9E-09	0.53	1.57	1.05	0.53	37.13	6.28	12.10	29.70	2.00	18.92	29.79	0.24	0.51	14.57	10.96	0.00	10.96	0.06	0.04	0.49	0.30	3.23	0.52	3.20	99.08
ABR	-7.37	14.15	3.39	276.39	4.9E-09	0.36	1.62	0.99	0.36	32.54	7.95	11.60	28.03	2.00	19.28	28.88	0.26	0.65	14.85	10.04	0.08	9.96	0.06	0.04	0.45	0.33	3.26	0.63	3.18	95.26
MAY	-7.48	12.52	2.52	275.52	4.9E-09	0.36	1.46	0.91	0.36	28.13	11.21	11.26	22.51	2.00	21.04	28.49	0.26	0.91	16.20	9.53	0.05	9.48	0.05	0.04	0.44	0.34	3.27	0.55	2.90	89.83
JUN	-10.70	12.90	1.10	274.10	4.9E-09	0.28	1.50	0.89	0.28	25.80	11.14	11.03	20.64	2.00	19.48	28.00	0.27	0.92	15.00	8.09	-0.02	8.12	0.05	0.04	0.41	0.35	3.28	0.61	2.78	83.33
JUL	-10.45	12.29	0.92	273.92	4.9E-09	0.28	1.45	0.86	0.28	26.63	11.35	11.06	21.31	2.00	20.33	27.90	0.27	0.94	15.65	8.69	0.02	8.67	0.05	0.04	0.41	0.35	3.29	0.58	2.80	86.70
AGO	-11.35	14.06	1.35	274.35	4.9E-09	0.26	1.62	0.94	0.26	30.31	11.76	11.46	24.25	2.00	23.12	28.15	0.27	0.94	17.80	10.71	-0.03	10.74	0.05	0.04	0.42	0.35	3.28	0.68	3.37	104.55
SEP	-12.09	14.80	1.36	274.36	4.9E-09	0.24	1.69	0.97	0.24	35.02	12.22	11.90	28.01	2.00	26.73	28.19	0.27	0.94	20.58	13.42	0.02	13.40	0.05	0.04	0.42	0.35	3.28	0.72	3.93	117.86
OCT	-7.66	15.68	4.01	277.01	4.9E-09	0.35	1.79	1.07	0.35	38.70	12.69	12.40	30.96	2.00	29.47	29.19	0.26	0.94	22.69	15.67	-0.08	15.75	0.06	0.04	0.46	0.32	3.25	0.72	4.46	138.14
NOV	-7.30	17.51	5.11	278.11	4.9E-09	0.36	2.01	1.18	0.36	40.71	7.95	12.84	32.57	2.00	22.14	29.68	0.26	0.57	17.05	12.73	-0.01	12.74	0.06	0.04	0.48	0.31	3.24	0.82	4.14	124.15
DIC	-3.25	14.92	5.83	278.83	4.9E-09	0.49	1.71	1.10	0.49	41.38	7.83	12.97	33.11	2.00	22.83	29.84	0.24	0.58	17.58	13.37	-0.02	13.39	0.06	0.04	0.49	0.31	3.23	0.61	3.87	119.82

Anexo 17: Cálculo de evapotranspiración referencia ETo método de Blaney Criddle.

$$ET_o = a + b.f \left[ 1 + \frac{Alt}{10^4} \right]$$

$$f = p.(0.457T + 0.13)$$

- ET<sub>o</sub> : Evapotranspiración de referencia (mm/día).
- f : Factor de uso consuntivo (mm/día).
- Alt : Altura m.s.n.m.
- a,b : Constantes para estimar la evapotranspiración de referencia en f(HR).
- T : Temperatura media del aire (°C).

ETo diaria y promedio mensual para el mes de enero y para el bofedal de Capaso.

Bof	Mes	Dia	Tmin (°C)	Tmax (°C)	T (°C)	HR (%)	Altitud (m)	14°	Porcentaje medio Diario de las horas luz (%)	17°	Factor de uso Consuntivo f (mm/día)	Constante "a" para V=(2 - 5) m/s (a)	Constante "b" para V=(2 - 5) m/s (b)	ETo (mm/día)	ETo (mm/día)
Ca	1	1	-1.0	13.5	6.25	63.80	4350	0.29	0.29	0.29	3.22	-0.36	0.96	4.08	4.0
Ca	1	2	-2.0	16.5	7.25	56.40	4350	0.29	0.29	0.29	3.35	-0.36	0.96	4.27	
Ca	1	3	0.0	12.5	6.25	68.00	4350	0.29	0.29	0.29	3.22	-0.36	0.96	4.08	
Ca	1	4	0.0	11.5	5.75	70.10	4350	0.29	0.29	0.29	3.15	-0.40	0.88	3.56	
Ca	1	5	-0.5	10.5	5.00	71.10	4350	0.29	0.29	0.29	3.05	-0.40	0.88	3.44	
Ca	1	6	-0.5	10.5	5.00	71.10	4350	0.29	0.29	0.29	3.05	-0.40	0.88	3.44	
Ca	1	7	-0.5	13.0	6.25	65.90	4350	0.29	0.29	0.29	3.22	-0.36	0.96	4.08	
Ca	1	8	-0.5	13.0	6.25	65.90	4350	0.29	0.29	0.29	3.22	-0.36	0.96	4.08	
Ca	1	9	-1.0	13.5	6.25	63.80	4350	0.29	0.29	0.29	3.22	-0.36	0.96	4.08	
Ca	1	10	0.0	10.5	5.25	72.20	4350	0.29	0.29	0.29	3.09	-0.40	0.88	3.48	
Ca	1	11	0.0	11.5	5.75	70.10	4350	0.29	0.29	0.29	3.15	-0.40	0.88	3.56	
Ca	1	12	-0.5	11.5	5.50	68.90	4350	0.29	0.29	0.29	3.12	-0.36	0.96	3.95	
Ca	1	13	0.0	13.0	6.50	67.00	4350	0.29	0.29	0.29	3.25	-0.36	0.96	4.13	
Ca	1	14	-0.5	13.0	6.25	65.90	4350	0.29	0.29	0.29	3.22	-0.36	0.96	4.08	
Ca	1	15	-0.5	11.5	5.50	68.90	4350	0.29	0.29	0.29	3.12	-0.36	0.96	3.95	
Ca	1	16	-0.5	14.0	6.75	63.90	4350	0.29	0.29	0.29	3.29	-0.36	0.96	4.18	
Ca	1	17	-0.5	15.5	7.50	61.10	4350	0.29	0.29	0.29	3.39	-0.36	0.96	4.31	
Ca	1	18	0.0	14.0	7.00	65.00	4350	0.29	0.29	0.29	3.32	-0.36	0.96	4.22	
Ca	1	19	-0.5	17.5	8.50	57.60	4350	0.29	0.29	0.29	3.52	-0.36	0.96	4.50	
Ca	1	20	-0.5	14.5	7.00	63.00	4350	0.29	0.29	0.29	3.32	-0.36	0.96	4.22	
Ca	1	21	0.5	10.5	5.50	73.40	4350	0.29	0.29	0.29	3.12	-0.40	0.88	3.52	
Ca	1	22	0.0	12.5	6.25	68.00	4350	0.29	0.29	0.29	3.22	-0.36	0.96	4.08	
Ca	1	23	-2.0	13.0	5.50	62.60	4350	0.29	0.29	0.29	3.12	-0.36	0.96	3.95	
Ca	1	24	-2.0	13.5	5.75	61.70	4350	0.29	0.29	0.29	3.15	-0.36	0.96	3.99	
Ca	1	25	-0.5	11.0	5.25	70.00	4350	0.29	0.29	0.29	3.09	-0.36	0.96	3.90	
Ca	1	26	-1.5	15.0	6.75	60.00	4350	0.29	0.29	0.29	3.29	-0.36	0.96	4.18	
Ca	1	27	-0.5	15.0	7.25	62.00	4350	0.29	0.29	0.29	3.35	-0.36	0.96	4.27	
Ca	1	28	-1.5	15.5	7.00	59.10	4350	0.29	0.29	0.29	3.32	-0.36	0.96	4.22	
Ca	1	29	-1.0	16.5	7.75	58.30	4350	0.29	0.29	0.29	3.42	-0.36	0.96	4.36	
Ca	1	30	-1.5	13.5	6.00	62.80	4350	0.29	0.29	0.29	3.19	-0.36	0.96	4.04	
Ca	1	31	-0.7	13.0	6.15	65.40	4350	0.29	0.29	0.29	3.21	-0.36	0.96	4.07	

Anexo 18: Cálculo de evapotranspiración referencia  $ET_o$  método de Jensen Haise.

$$ET_o = C_t(T - T_x)R_s$$

$$C_t = \frac{1}{38 - \frac{h}{152.5} + \frac{380}{e_2 - e_1}}$$

$$T_x = -2.5 - 0.14 * \left( e_2 - e_1 - \frac{h}{550} \right)$$

$$e = 6.108 * \exp\left(\frac{17.27T}{T + 237.3}\right)$$

$$R_s = \left(0.18 + 0.55 \frac{n}{N}\right) R_o$$

$ET_o$  : Evapotranspiración de referencia (mm/día).

$R_s$  : Radiación solar incidente a nivel del suelo en (mm/día).

$T$  : Temperatura media del aire  $(T_{max} + T_{min})/2$  (°C).

$C_t$  y  $T_x$  : Coeficientes.

$h$  : Altitud m.s.n.m.

$e$  : Presión de vapor a saturación (mbar) correspondiente a la temperatura  $T$  (°C).

**Nota:** La fórmula se aplica dos veces, con la temperatura mínima y máxima, obteniendo respectivamente  $e_1$  y  $e_2$ .

$R_o$  : Radiación extraterrestre expresada en mm/día de evaporación ò Radiación solar si no existiera atmósfera (Anexo 02).

$n$  : Numero de horas de sol reales.

$N$  : Numero máximo teórico de horas de sol (Anexo 02).

ETo diaria y promedio mensual para el mes de enero y para el bofedal de Capaso.

Bof	Mes	Dia	Tmin (°C)	Tmax (°C)	n	Altura (m)	N	Ro (mm/día)	Pres.vap. sat. (e1) tmin	Pres. vap. sat. (e2) tmax	CT	TX	Radiación Solar Rs (mm/día)	ETo (mm/día)	ETo (mm/día)
Ca	1	1	-1.0	13.5	2.90	4350	13.00	16.93	5.68	15.47	0.021	-11.78	5.12	1.91	2.8
Ca	1	2	-2.0	16.5	4.00	4350	13.00	16.92	5.27	18.77	0.027	-12.30	5.91	3.07	
Ca	1	3	0.0	12.5	6.70	4350	13.00	16.92	6.11	14.49	0.018	-11.58	7.84	2.55	
Ca	1	4	0.0	11.5	6.00	4350	12.99	16.92	6.11	13.57	0.017	-11.45	7.34	2.09	
Ca	1	5	-0.5	10.5	2.70	4350	12.99	16.91	5.89	12.70	0.015	-11.36	4.98	1.25	
Ca	1	6	-0.5	10.5	8.50	4350	12.98	16.91	5.89	12.70	0.015	-11.36	9.13	2.29	
Ca	1	7	-0.5	13.0	6.70	4350	12.98	16.91	5.89	14.98	0.019	-11.68	7.84	2.74	
Ca	1	8	-0.5	13.0	9.50	4350	12.97	16.90	5.89	14.98	0.019	-11.68	9.85	3.44	
Ca	1	9	-1.0	13.5	1.70	4350	12.96	16.90	5.68	15.47	0.021	-11.78	4.26	1.59	
Ca	1	10	0.0	10.5	9.80	4350	12.96	16.89	6.11	12.70	0.015	-11.33	10.07	2.49	
Ca	1	11	0.0	11.5	4.70	4350	12.95	16.88	6.11	13.57	0.017	-11.45	6.41	1.83	
Ca	1	12	-0.5	11.5	5.10	4350	12.94	16.88	5.89	13.57	0.017	-11.48	6.70	1.93	
Ca	1	13	0.0	13.0	7.40	4350	12.93	16.87	6.11	14.98	0.019	-11.65	8.35	2.90	
Ca	1	14	-0.5	13.0	2.70	4350	12.93	16.86	5.89	14.98	0.019	-11.68	4.97	1.74	
Ca	1	15	-0.5	11.5	5.80	4350	12.92	16.86	5.89	13.57	0.017	-11.48	7.20	2.07	
Ca	1	16	-0.5	14.0	3.90	4350	12.91	16.85	5.89	15.99	0.021	-11.82	5.83	2.30	
Ca	1	17	-0.5	15.5	6.70	4350	12.90	16.84	5.89	17.61	0.024	-12.05	7.84	3.66	
Ca	1	18	0.0	14.0	10.00	4350	12.89	16.83	6.11	15.99	0.021	-11.79	10.21	4.00	
Ca	1	19	-0.5	17.5	5.90	4350	12.88	16.82	5.89	20.00	0.027	-12.38	7.26	4.17	
Ca	1	20	-0.5	14.5	10.30	4350	12.87	16.81	5.89	16.51	0.022	-11.90	10.42	4.35	
Ca	1	21	0.5	10.5	5.20	4350	12.87	16.80	6.33	12.70	0.014	-11.30	6.76	1.64	
Ca	1	22	0.0	12.5	7.70	4350	12.86	16.79	6.11	14.49	0.018	-11.58	8.55	2.78	
Ca	1	23	-2.0	13.0	3.90	4350	12.85	16.77	5.27	14.98	0.021	-11.77	5.82	2.07	
Ca	1	24	-2.0	13.5	8.20	4350	12.83	16.76	5.27	15.47	0.021	-11.84	8.91	3.35	
Ca	1	25	-0.5	11.0	7.70	4350	12.82	16.75	5.89	13.13	0.016	-11.42	8.54	2.30	
Ca	1	26	-1.5	15.0	8.90	4350	12.81	16.73	5.47	17.05	0.024	-12.03	9.40	4.18	
Ca	1	27	-0.5	15.0	7.60	4350	12.80	16.72	5.89	17.05	0.023	-11.97	8.47	3.74	
Ca	1	28	-1.5	15.5	10.00	4350	12.79	16.70	5.47	17.61	0.025	-12.11	10.19	4.77	
Ca	1	29	-1.0	16.5	9.90	4350	12.78	16.69	5.68	18.77	0.026	-12.24	10.11	5.25	
Ca	1	30	-1.5	13.5	6.70	4350	12.77	16.67	5.47	15.47	0.021	-11.81	7.81	2.93	
Ca	1	31	-0.7	13.0	6.70	4350	12.76	16.65	5.80	14.98	0.020	-11.69	7.81	2.74	

Anexo 19: Determinación de necesidades hídricas por el método directo del Lisímetros.

**BALANCE HÍDRICO EN BOFEDALES DE CAPASO**

Diámetro de lisímetro: 1.1 m

1.0 mm = 1 lt/m<sup>2</sup>

Área del lisímetro 0.86 m<sup>2</sup> = 0.00086 ha.

Fecha	Intervalo (días)	Volumen de agua de riego (Litros)			Lluvia acumulada		Humedad del suelo (mm)	Volumen de agua drenada (litros)			Balance Hídrico (mm)			Evapotranspiración diaria (mm/día)			
		L-1	L-2	L-3	mm	litros		L-1	L-2	L-3	L-1	L-2	L-3	L-1	L-2	L-3	Media
30-12-07	4	18.0	18.0	18.0	0	0.00		2.8	2	1.2	15.20	16.00	16.80	3.28	3.46	3.63	3.46
02-01-08	3	18.0	18.0	18.0	3.6	3.11		8.3	5.1	0.9	12.81	16.01	20.21	3.69	4.61	5.82	4.71
06-01-08	4	18.0	18.0	18.0	26.1	22.55		12.2	6.5	1.5	28.35	34.05	39.05	6.12	7.35	8.43	7.30
10-01-08	4	12.0	12.0	12.0	31.6	27.30		12.5	7.5	3.2	32.80	37.80	42.10	7.08	8.16	9.09	8.11
14-01-08	4	12.0	12.0	12.0	27.9	24.10		16.2	8.5	1.5	19.90	27.60	34.60	4.30	5.96	7.47	5.91
18-01-08	4	18.0	18.0	18.0	29.3	25.31		16.6	8.7	1.6	20.71	28.61	35.71	4.47	6.18	7.71	6.12
22-01-08	4	18.0	18.0	18.0	9.6	8.29		16.9	8.8	1.6	9.39	17.49	24.69	2.03	3.78	5.33	3.71
26-01-08	4	18.0	18.0	18.0	15.7	13.56		16.2	8.6	1.6	15.36	22.96	29.96	3.32	4.96	6.47	4.92
30-01-08	4	18.0	18.0	18.0	2.2	1.90		10	4.2	1.4	9.90	15.70	18.50	2.14	3.39	4.00	3.18
03-02-08	4	18.0	18.0	18.0	0	0.00		3	3.5	1.2	15.00	14.50	16.80	3.24	3.13	3.63	3.33
06-02-08	3	18.0	18.0	18.0	11.6	10.02		6	6.3	1	22.02	21.72	27.02	6.34	6.26	7.78	6.79
10-02-08	4	18.0	18.0	18.0	3.3	2.85		6	6.3	1	14.85	14.55	19.85	3.21	3.14	4.29	3.55
14-02-08	4	18.0	18.0	18.0	0	0.00		6.2	6.4	1.1	11.80	11.60	16.90	2.55	2.51	3.65	2.90
18-02-08	4	18.0	18.0	18.0	15.4	13.30		6.4	6.5	1.3	24.90	24.80	30.00	5.38	5.36	6.48	5.74
22-02-08	4	12.0	12.0	12.0	18.6	16.07		6.4	6.6	1.5	27.67	27.47	32.57	5.98	5.93	7.03	6.31
26-02-08	4	18.0	18.0	18.0	38	32.83		10.8	9.7	8.3	34.03	35.13	36.53	7.35	7.59	7.89	7.61
29-02-08	3	18.0	18.0	18.0	0	0.00		6.6	6.8	5.7	11.40	11.20	12.30	3.28	3.23	3.54	3.35
05-03-08	5	18.0	18.0	18.0	0	0.00		6	6.4	5.6	12.00	11.60	12.40	2.07	2.00	2.14	2.07
09-03-08	4	18.0	18.0	18.0	4.6	3.97		6	6.1	5	15.97	15.87	16.97	3.45	3.43	3.67	3.51
13-03-08	4	18.0	18.0	18.0	30.1	26.00		5.9	6	4.5	38.10	38.00	39.50	8.23	8.21	8.53	8.32
17-03-08	4	18.0	18.0	18.0	0	0.00		5.8	6	1.4	12.20	12.00	16.60	2.64	2.59	3.59	2.94
21-03-08	4	18.0	18.0	18.0	0	0.00		5.3	6.1	1.5	12.70	11.90	16.50	2.74	2.57	3.56	2.96
25-03-08	4	18.0	18.0	18.0	7.9	6.83		5.2	6.2	1.5	19.63	18.63	23.33	4.24	4.02	5.04	4.43
29-03-08	4	18.0	18.0	18.0	3.6	3.11		5.2	6.3	1.6	15.91	14.81	19.51	3.44	3.20	4.21	3.62
03-04-08	5	12.0	12.0	12.0	9.7	8.38		7.5	6.5	1.5	18.88	19.88	24.88	3.26	3.44	4.30	3.67
06-04-08	3	12.0	12.0	12.0	0	0.00		7.2	4.3	1.6	4.80	7.70	10.40	1.38	2.22	2.99	2.20
10-04-08	4	12.0	12.0	12.0	1.5	1.30		7.5	4.0	1.4	5.80	9.30	11.90	1.25	2.01	2.57	1.94
14-04-08	4	12.0	12.0	12.0	0	0.00		7.0	4.0	1.4	5.00	8.00	10.60	1.08	1.73	2.29	1.70
18-04-08	4	12.0	12.0	12.0	0	0.00		6.0	3.8	1.6	6.00	8.20	10.40	1.30	1.77	2.25	1.77
22-04-08	4	12.0	12.0	12.0	0	0.00		6.2	3.6	1.5	5.80	8.40	10.50	1.25	1.81	2.27	1.78
26-04-08	4	12.0	12.0	12.0	0	0.00		5.8	3.5	1.6	6.20	8.50	10.40	1.34	1.84	2.25	1.81
30-04-08	4	12.0	12.0	12.0	0	0.00		5.6	3.3	1.5	6.40	8.70	10.50	1.38	1.88	2.27	1.84
04-05-08	4	12.0	12.0	12.0	0	0.00		5.5	3.2	1.5	6.50	8.80	10.50	1.40	1.90	2.27	1.86
07-05-08	3	12.0	12.0	12.0	0	0.00		5.5	3.2	1.5	6.50	8.80	10.50	1.87	2.53	3.02	2.48
11-05-08	4	12.0	12.0	12.0	0	0.00		5.3	3.2	1.4	6.70	8.80	10.60	1.45	1.90	2.29	1.88
15-05-08	4	12.0	12.0	12.0	0	0.00		5.1	3.1	1.3	6.90	8.90	10.70	1.49	1.92	2.31	1.91
19-05-08	4	12.0	12.0	12.0	0	0.00		5.0	3.0	1.3	7.00	9.00	10.70	1.51	1.94	2.31	1.92
23-05-08	4	12.0	12.0	12.0	0	0.00		4.8	3.0	1.2	7.20	9.00	10.80	1.56	1.94	2.33	1.94
27-05-08	4	12.0	12.0	12.0	0	0.00		4.8	2.9	1.2	7.20	9.10	10.80	1.56	1.97	2.33	1.95
31-05-08	4	12.0	12.0	12.0	0	0.00		4.5	2.9	1.2	7.50	9.10	10.80	1.62	1.97	2.33	1.97

Fecha	Intervalo (días)	Volumen de agua de riego (Litros)			Lluvia acumulada		Humedad del suelo (mm)	Volumen de agua drenada (litros)			Balance Hídrico (mm)			Evapotranspiración diaria (mm/día)			
		L-1	L-2	L-3	mm	litros		L-1	L-2	L-3	L-1	L-2	L-3	L-1	L-2	L-3	Media
06-06-08	6	12.0	12.0	12.0	0	0.00		5.4	3.2	1.5	6.60	8.80	10.50	0.95	1.27	1.51	1.24
10-06-08	4	12.0	12.0	12.0	0	0.00		5.0	2.8	1.3	7.00	9.20	10.70	1.51	1.99	2.31	1.94
14-06-08	4	12.0	12.0	12.0	0	0.00		4.8	2.0	1.3	7.20	10.00	10.70	1.56	2.16	2.31	2.01
18-06-08	4	12.0	12.0	12.0	0	0.00		4.5	2.0	1.2	7.50	10.00	10.80	1.62	2.16	2.33	2.04
22-06-08	4	12.0	12.0	12.0	0	0.00		4.0	2.0	1.2	8.00	10.00	10.80	1.73	2.16	2.33	2.07
26-06-08	4	12.0	12.0	12.0	0	0.00		4.0	2.0	1.1	8.00	10.00	10.90	1.73	2.16	2.35	2.08
30-06-08	4	12.0	12.0	12.0	0	0.00		3.6	2.0	1.0	8.40	10.00	11.00	1.81	2.16	2.38	2.12
07-07-08	7	12.0	12.0	12.0	0	0.00		3.5	2.4	1.0	8.50	9.60	11.00	1.05	1.18	1.36	1.20
11-07-08	4	12.0	12.0	12.0	0	0.00		3.6	2.3	1.0	8.40	9.70	11.00	1.81	2.10	2.38	2.10
15-07-08	4	12.0	12.0	12.0	0	0.00		3.5	2.3	1.0	8.50	9.70	11.00	1.84	2.10	2.38	2.10
19-07-08	4	12.0	12.0	12.0	0	0.00		3.5	2.3	1.0	8.50	9.70	11.00	1.84	2.10	2.38	2.10
23-07-08	4	12.0	12.0	12.0	0	0.00		3.4	2.5	1.8	8.60	9.50	10.20	1.86	2.05	2.20	2.04
27-07-08	4	12.0	12.0	12.0	0	0.00		3.4	2.5	1.8	8.60	9.50	10.20	1.86	2.05	2.20	2.04
31-07-08	4	12.0	12.0	12.0	0	0.00		3.4	4.0	1.8	8.60	8.00	10.20	1.86	1.73	2.20	1.93
07-08-08	7	12.0	12.0	12.0	0	0.00		3.4	1.4	1.8	8.60	10.60	10.20	1.06	1.31	1.26	1.21
11-08-08	4	12.0	12.0	12.0	6.6	5.70		3.4	1.4	1.7	14.30	16.30	16.00	3.09	3.52	3.46	3.36
15-08-08	4	12.0	12.0	12.0	0	0.00		3.3	1.4	1.7	8.70	10.60	10.30	1.88	2.29	2.22	2.13
19-08-08	4	12.0	12.0	12.0	0	0.00		3.3	1.4	1.6	8.70	10.60	10.40	1.88	2.29	2.25	2.14
23-08-08	4	12.0	12.0	12.0	0	0.00		3.2	1.4	1.6	8.80	10.60	10.40	1.90	2.29	2.25	2.15
27-08-08	4	12.0	12.0	12.0	0	0.00		3.2	1.4	1.6	8.80	10.60	10.40	1.90	2.29	2.25	2.15
31-08-08	4	12.0	12.0	12.0	0	0.00		3.2	1.4	1.6	8.80	10.60	10.40	1.90	2.29	2.25	2.15
06-09-08	6	12.0	12.0	12.0	0	0.00		2.5	1.4	1.5	9.50	10.60	10.50	1.37	1.53	1.51	1.47
10-09-08	4	12.0	12.0	12.0	0	0.00		2.4	1.4	1.5	9.60	10.60	10.50	2.07	2.29	2.27	2.21
13-09-08	3	12.0	12.0	12.0	0	0.00		2.4	1.4	1.5	9.60	10.60	10.50	2.76	3.05	3.02	2.95
17-09-08	4	12.0	12.0	12.0	0	0.00		2.3	1.4	1.4	9.70	10.60	10.60	2.10	2.29	2.29	2.22
21-09-08	4	12.0	12.0	12.0	0	0.00		2.3	1.4	1.4	9.70	10.60	10.60	2.10	2.29	2.29	2.22
25-09-08	4	12.0	12.0	12.0	0	0.00		2.3	1.4	1.3	9.70	10.60	10.70	2.10	2.29	2.31	2.23
29-09-08	4	12.0	12.0	12.0	0	0.00		2.4	1.4	1.4	9.60	10.60	10.60	2.07	2.29	2.29	2.22
03-10-08	4	18.0	18.0	18.0	0	0.00		2.3	1.4	2.3	9.70	10.60	9.70	2.10	2.29	2.10	2.16
07-10-08	4	18.0	18.0	18.0	0	0.00		2.1	1.4	2.4	15.90	16.60	15.60	3.43	3.59	3.37	3.46
11-10-08	4	18.0	18.0	18.0	0	0.00		2.0	1.4	2.4	16.00	16.60	15.60	3.46	3.59	3.37	3.47
15-10-08	4	18.0	18.0	18.0	0	0.00		2.0	1.4	1.4	16.00	16.60	16.60	3.46	3.59	3.59	3.54
19-10-08	4	18.0	18.0	18.0	0	0.00		1.9	1.4	1.4	16.10	16.60	16.60	3.48	3.59	3.59	3.55
23-10-08	4	18.0	18.0	18.0	0	0.00		1.9	1.4	1.4	16.10	16.60	16.60	3.48	3.59	3.59	3.55
27-10-08	4	18.0	18.0	18.0	0	0.00		1.8	1.4	1.4	16.20	16.60	16.60	3.50	3.59	3.59	3.56
31-10-08	4	18.0	18.0	18.0	0	0.00		1.7	1.4	1.4	16.30	16.60	16.60	3.52	3.59	3.59	3.56
04-11-08	4	18.0	18.0	18.0	0	0.00		1.8	1.1	1.4	16.20	16.90	16.60	3.50	3.65	3.59	3.58
07-11-08	3	18.0	18.0	18.0	0	0.00		1.7	1.0	1.4	16.30	17.00	16.60	4.69	4.90	4.78	4.79
11-11-08	4	18.0	18.0	18.0	0	0.00		1.7	1.0	1.4	16.30	17.00	16.60	3.52	3.67	3.59	3.59
15-11-08	4	18.0	18.0	18.0	0	0.00		1.7	1.0	1.4	16.30	17.00	16.60	3.52	3.67	3.59	3.59
19-11-08	4	18.0	18.0	18.0	0	0.00		1.7	1.0	1.4	16.30	17.00	16.60	3.52	3.67	3.59	3.59
23-11-08	4	18.0	18.0	18.0	0	0.00		1.7	1.0	1.4	16.30	17.00	16.60	3.52	3.67	3.59	3.59
27-11-08	4	18.0	18.0	18.0	0	0.00		1.7	1.0	1.4	16.30	17.00	16.60	3.52	3.67	3.59	3.59
01-12-08	4	18.0	18.0	18.0	0.6	0.52		2.0	1.0	1.4	16.52	17.52	17.12	3.57	3.78	3.70	3.68
05-12-08	4	12.0	12.0	12.0	0	0.00		2.0	1.0	1.4	16.00	17.00	16.60	3.46	3.67	3.59	3.57
08-12-08	3	12.0	12.0	12.0	10	8.64		2.8	1.5	1.9	17.84	19.14	18.74	5.14	5.51	5.40	5.35
12-12-08	4	12.0	12.0	12.0	1.3	1.12		2.5	1.7	2.0	10.62	11.42	11.12	2.29	2.47	2.40	2.39
16-12-08	4	12.0	12.0	12.0	16	13.82		3.0	1.8	2.5	22.82	24.02	23.32	4.93	5.19	5.04	5.05
20-12-08	4	12.0	12.0	12.0	9.9	8.55		3.5	1.9	2.5	17.05	18.65	18.05	3.68	4.03	3.90	3.87
24-12-08	4	12.0	12.0	12.0	22.2	19.18		3.8	2.0	2.9	27.38	29.18	28.28	5.91	6.30	6.11	6.11
28-12-08	4	12.0	12.0	12.0	31.6	27.30		4.0	2.9	3.0	35.30	36.40	36.30	7.62	7.86	7.84	7.78
01-01-09	4	12.0	12.0	12.0	24.3	20.99		3.8	2.7	2.8	29.19	30.29	30.19	6.31	6.54	6.52	6.46

**BALANCE HÍDRICO EN BOFEDALES DE MAZOCRUZ**

Fecha	Intervalo (días)	Volumen de agua de riego (Litros)			Lluvia acumulada		Volumen de agua drenada (litros)			Balance Hídrico (mm)			Evapotranspiración diaria (mm/día)			
		L-1	L-2	L-3	mm	litros	L-1	L-2	L-3	L-1	L-2	L-3	L-1	L-2	L-3	Media
29-12-07	7	10	10	8	13.1	11.32	3.00	3.80	4.00	20.32	19.52	17.32	2.51	2.41	2.14	2.35
05-01-08	7	0.00	0.00	0.00	26	30.00	3.00	3.56	6.50	37.00	36.44	31.50	4.57	4.50	3.89	4.32
12-01-08	7	0.00	0.00	12.00	50.3	35.00	3.72	5.93	9.50	31.28	29.07	25.50	3.86	3.59	3.15	3.53
19-01-08	7	0.00	3.00	8.00	42.2	36.46	3.72	5.05	6.45	32.74	31.41	42.01	4.04	3.88	5.18	4.37
26-01-08	7	24.00	24.00	24.00	25.3	21.86	3.63	4.94	7.60	18.23	19.92	22.26	2.25	2.46	2.75	2.48
02-02-08	7	24.00	24.00	24.00	2.2	1.90	1.10	1.90	0.00	24.80	24.00	25.90	3.06	2.96	3.20	3.07
09-02-08	7	24.00	24.00	24.00	14.9	12.87	0.00	0.00	0.00	36.87	36.87	36.87	4.55	4.55	4.55	4.55
16-02-08	7	24.00	24.00	24.00	0	0.00	0.00	0.00	0.00	24.00	24.00	24.00	2.96	2.96	2.96	2.96
23-02-08	7	24.00	24.00	24.00	34	29.37	3.00	2.40	3.40	50.37	50.97	49.97	6.22	6.29	6.17	6.23
01-03-08	7	24.00	24.00	24.00	38	32.83	3.00	3.50	3.20	53.83	53.33	53.63	6.64	6.58	6.62	6.61
08-03-08	7	15.00	15.00	15.00	0.5	0.43	4.90	3.90	4.80	19.53	20.53	19.63	2.41	2.53	2.42	2.46
15-03-08	7	22.00	24.00	23.00	34.2	29.55	4.80	4.20	4.40	39.75	40.35	40.15	4.91	4.98	4.95	4.95
22-03-08	7	22.00	24.00	23.00	0	0.00	3.20	3.40	2.40	18.80	20.60	20.60	2.32	2.54	2.54	2.47
29-03-08	7	24.00	21.00	20.00	8.8	7.60	3.40	2.20	1.10	26.20	29.40	29.50	3.23	3.63	3.64	3.50
05-04-08	7	32.00	30.00	29.00	9.7	8.38	2.95	1.87	0.00	29.43	27.51	28.38	3.63	3.40	3.50	3.51
12-04-08	7	24.00	33.00	18.00	1.5	1.30	2.83	1.65	0.50	30.47	29.65	29.80	3.76	3.66	3.68	3.70
19-04-08	7	28.00	24.00	22.00	0	0.00	2.54	2.00	0.80	21.46	31.00	17.20	2.65	3.83	2.12	2.87
26-04-08	7	28.00	24.00	22.00	0	0.00	0.00	0.00	0.00	28.00	24.00	22.00	3.46	2.96	2.72	3.04
03-05-08	7	28.00	24.00	22.00	0	0.00	0.30	0.00	0.50	27.70	24.00	21.50	3.42	2.96	2.65	3.01
10-05-08	7	28.00	24.00	22.00	0	0.00	0.40	0.00	0.00	27.60	24.00	22.00	3.41	2.96	2.72	3.03
17-05-08	7	28.00	24.00	22.00	0	0.00	0.80	0.00	0.40	27.20	24.00	21.60	3.36	2.96	2.67	2.99
24-05-08	7	28.00	24.00	22.00	0	0.00	0.80	1.00	0.40	27.20	23.00	21.60	3.36	2.84	2.67	2.95
31-05-08	7	28.00	24.00	22.00	0	0.00	1.00	0.80	0.60	27.00	23.20	21.40	3.33	2.86	2.64	2.95
07-06-08	7	28.00	24.00	22.00	0	0.00	0.80	0.00	0.00	27.20	24.00	22.00	3.36	2.96	2.72	3.01
14-06-08	7	28.00	24.00	22.00	0	0.00	0.00	0.00	0.00	28.00	24.00	22.00	3.46	2.96	2.72	3.04
21-06-08	7	28.00	24.00	22.00	0	0.00	0.00	0.00	0.00	28.00	24.00	22.00	3.46	2.96	2.72	3.04
28-06-08	7	28.00	24.00	22.00	0	0.00	0.40	0.00	0.00	27.60	24.00	22.00	3.41	2.96	2.72	3.03
05-07-08	7	28.00	24.00	22.00	0	0.00	0.00	0.22	0.00	28.00	23.78	22.00	3.46	2.93	2.72	3.04
12-07-08	7	28.00	24.00	22.00		0.00	0.00	0.00	0.00	28.00	24.00	22.00	3.46	2.96	2.72	3.04
19-07-08	7	28.00	24.00	22.00		0.00	0.00	0.00	0.00	28.00	24.00	22.00	3.46	2.96	2.72	3.04
26-07-08	7	28.00	24.00	22.00		0.00	0.30	0.20	0.00	27.70	23.80	22.00	3.42	2.94	2.72	3.02
02-08-08	7	28.00	24.00	22.00	0	0.00	0.50	0.00	0.20	27.50	24.00	21.80	3.39	2.96	2.69	3.02
09-08-08	7	28.00	24.00	22.00	6.6	5.70	0.60	0.10	0.20	33.10	29.60	27.50	4.09	3.65	3.39	3.71
16-08-08	7	33.00	35.00	30.00	0	0.00	0.00	0.30	0.40	28.00	23.70	21.60	3.46	2.93	2.67	3.02
23-08-08	7	32.00	33.00	28.00	0	0.00	0.00	0.40	0.95	33.00	34.60	29.05	4.07	4.27	3.59	3.98
13-09-08	7	36.00	36.00	36.00	0	0.00	0.10	0.50	0.20	35.90	35.50	35.80	4.43	4.38	4.42	4.41
20-09-08	7	36.00	36.00	36.00	0	0.00	0.10	0.00	0.00	35.90	36.00	36.00	4.43	4.44	4.44	4.44
27-09-08	7	36.00	36.00	36.00	0	0.00	0.00	0.00	0.00	36.00	36.00	36.00	4.44	4.44	4.44	4.44
04-10-08	7	35.00	39.00	39.00	0	0.00	0.00	0.00	0.00	36.00	36.00	36.00	4.44	4.44	4.44	4.44
11-10-08	7	35.00	39.00	39.00	0	0.00	0.00	0.00	0.00	35.00	39.00	39.00	4.32	4.81	4.81	4.65
18-10-08	7	35.00	39.00	39.00	0	0.00	0.00	0.00	0.00	35.00	39.00	39.00	4.32	4.81	4.81	4.65
25-10-08	7	35.00	39.00	39.00	0	0.00	0.00	0.00	0.00	35.00	39.00	39.00	4.32	4.81	4.81	4.65
01-11-08	7	42.00	41.00	40.00	0	0.00	0.00	0.00	0.00	35.00	39.00	39.00	4.32	4.81	4.81	4.65
08-11-08	7	44.00	43.00	41.00	0	0.00	0.00	0.00	0.00	42.00	41.00	40.00	5.18	5.06	4.94	5.06
15-11-08	7	41.00	41.00	41.00	0	0.00	0.00	0.00	0.00	44.00	43.00	41.00	5.43	5.31	5.06	5.27
22-11-08	7	41.00	41.00	41.00	0	0.00	0.00	0.00	0.00	41.00	41.00	41.00	5.06	5.06	5.06	5.06
29-11-08	7	41.00	41.00	41.00	0	0.00	0.00	0.00	0.00	41.00	41.00	41.00	5.06	5.06	5.06	5.06
06-12-08	7	36.00	36.00	36.00	0.6	0.52	0.00	0.00	0.00	41.52	41.52	41.52	5.12	5.12	5.12	5.12
13-12-08	7	29.00	24.00	24.00	11.3	9.76	1.40	0.80	0.90	44.36	44.96	44.86	5.48	5.55	5.54	5.52
20-12-08	7	24.00	22.00	24.00	25.3	21.86	1.20	1.10	0.85	49.66	44.76	45.01	6.13	5.52	5.55	5.74
27-12-08	7	24.00	22.00	22.00	22.8	19.70	1.60	1.10	0.95	42.10	40.60	42.75	5.20	5.01	5.28	5.16

**BALANCE HÍDRICO EN BOFEDALES DE MACUSANI**

Fecha	Intervalo (días)	Volumen de agua de riego (Litros)			Lluvia acumulada		Volumen de agua drenada (litros)			Balance Hídrico (mm)			Evapotranspiración diaria (mm/día)			
		L-1	L-2	L-3	mm	litros	L-1	L-2	L-3	L-1	L-2	L-3	L-1	L-2	L-3	Media
29-12-07	7	12	12	12	13	11.23	0.80	2.75	0.60	22.43	20.48	22.63	2.77	2.53	2.79	2.70
05-01-08	7	12	12	12	25.2	21.77	0.90	1.00	0.80	32.87	32.77	32.97	4.06	4.04	4.07	4.06
12-01-08	7	12	12	12	35.8	30.93	0.90	1.00	0.80	42.03	41.93	42.13	5.19	5.17	5.20	5.19
19-01-08	7	12	12	12	36	31.10	0.90	1.00	1.10	42.20	42.10	42.00	5.21	5.20	5.18	5.20
26-01-08	7	12	12	12	21.8	18.83	1.20	0.95	1.00	29.63	29.88	29.83	3.66	3.69	3.68	3.68
02-02-08	7	24	24	24	36.1	31.19	1.10	0.90	1.00	42.09	42.29	42.19	5.19	5.22	5.21	5.21
09-02-08	7	24	24	24	3	2.59	1.15	0.90	1.00	25.44	25.69	25.59	3.14	3.17	3.16	3.16
16-02-08	7	12	12	12	3.2	2.76	1.05	1.00	1.10	25.71	25.76	25.66	3.17	3.18	3.17	3.17
23-02-08	7	12	12	12	36	31.10	0.90	0.80	0.90	42.20	42.30	42.20	5.21	5.22	5.21	5.21
01-03-08	7	12	12	12	36.6	31.62	1.00	1.10	0.90	42.62	42.52	42.72	5.26	5.25	5.27	5.26
22-03-08	7	24	24	24	0	0.00	1.10	1.00	1.20	22.90	23.00	22.80	2.83	2.84	2.81	2.83
29-03-08	7	24	24	24	3	2.59	1.20	1.10	1.36	25.39	25.49	25.23	3.13	3.15	3.11	3.13
05-04-08	7	24	24	24	20	17.28	1.30	1.25	1.35	39.98	40.03	39.93	4.93	4.94	4.93	4.93
12-04-08	7	24	24	24	2.8	2.42	1.40	1.30	1.30	25.02	25.12	25.12	3.09	3.10	3.10	3.10
19-04-08	7	12	12	12	10	8.64	1.40	1.20	1.35	31.24	31.44	31.29	3.86	3.88	3.86	3.87
26-04-08	7	12	12	12	9	7.78	1.70	1.10	1.15	18.08	18.68	18.63	2.23	2.30	2.30	2.28
03-05-08	7	12	12	12	4.5	3.89	1.60	1.20	1.25	14.29	14.69	14.64	1.76	1.81	1.81	1.79
10-05-08	7	12	12	12	2.5	2.16	1.70	1.50	1.60	12.46	12.66	12.56	1.54	1.56	1.55	1.55
17-05-08	7	12	12	12	3	2.59	1.6	1.5	1.6	12.99	13.09	12.99	1.60	1.62	1.60	1.61
24-05-08	7	12	12	12	2	1.73	1.5	1.6	1.5	12.23	12.13	12.23	1.51	1.50	1.51	1.51
31-05-08	7	12	12	12	2	1.73	1.7	1.6	1.5	12.03	12.13	12.23	1.48	1.50	1.51	1.50
07-06-08	7	12	12	12	0	0.00	1.20	1.05	1.00	10.80	10.95	11.00	1.33	1.35	1.36	1.35
14-06-08	7	12	12	12	0	0.00	1.10	0.90	1.05	10.90	11.10	10.95	1.35	1.37	1.35	1.36
21-06-08	7	12	12	12	4	3.46	1.00	0.90	1.10	14.46	14.56	14.36	1.78	1.80	1.77	1.78
28-06-08	7	12	12	12	0	0.00	1.20	0.95	1.10	10.80	11.05	10.90	1.33	1.36	1.35	1.35
05-07-08	7	12	12	12	0	0.00	1.2	0.9	1	10.80	11.10	11.00	1.33	1.37	1.36	1.35
12-07-08	7	12	12	12	0	0.00	1.2	0.9	0.9	10.80	11.10	11.10	1.33	1.37	1.37	1.36
19-07-08	7	12	12	12	0	0.00	1.10	0.70	0.80	10.90	11.30	11.20	1.35	1.39	1.38	1.37
26-07-08	7	12	12	12	0	0.00	1.00	0.70	0.80	11.00	11.30	11.20	1.36	1.39	1.38	1.38
02-08-08	7	12	12	12	0	0.00	1.00	0.60	0.70	11.00	11.40	11.30	1.36	1.41	1.39	1.39
09-08-08	7	12	12	12	6	5.18	1.00	0.80	0.90	16.18	16.38	16.28	2.00	2.02	2.01	2.01
16-08-08	7	12	12	12	0	0.00	1.20	0.80	1.00	10.80	11.20	11.00	1.33	1.38	1.36	1.36
23-08-08	7	12	12	12	0	0.00	1.10	0.90	1.00	10.90	11.10	11.00	1.35	1.37	1.36	1.36
30-08-08	7	12	12	12	0	0.00	1.20	0.80	0.90	10.80	11.20	11.10	1.33	1.38	1.37	1.36
06-09-08	7	24	24	24	2	1.73	1.10	0.80	0.70	12.63	12.93	13.03	1.56	1.60	1.61	1.59
13-09-08	7	24	24	24	6	5.18	1.00	0.70	0.60	28.18	28.48	28.58	3.48	3.52	3.53	3.51
20-09-08	7	24	24	24	2	1.73	0.90	0.80	0.70	24.83	24.93	25.03	3.06	3.08	3.09	3.08
27-09-08	7	24	24	24	0	0.00	1.00	0.70	0.50	23.00	23.30	23.50	2.84	2.88	2.90	2.87
04-10-08	7	18	18	18	4.7	4.06	1.00	0.80	0.60	27.06	27.26	27.46	3.34	3.36	3.39	3.36
11-10-08	7	18	18	18	11	9.50	1.10	0.85	0.90	26.40	26.65	26.60	3.26	3.29	3.28	3.28
18-10-08	7	18	18	18	13.5	11.66	1.05	0.80	0.80	28.61	28.86	28.86	3.53	3.56	3.56	3.55
25-10-08	7	24	24	24	20.5	17.71	1.50	1.10	1.00	34.21	34.61	34.71	4.22	4.27	4.28	4.26
01-11-08	7	30	30	30	16	13.82	1.15	1.00	0.90	36.67	36.82	36.92	4.53	4.54	4.56	4.54
08-11-08	7	30	30	30	1.5	1.30	0.90	0.70	0.80	30.40	30.60	30.50	3.75	3.78	3.76	3.76
15-11-08	7	24	24	24	0	0.00	0.80	0.70	0.70	29.20	29.30	29.30	3.60	3.62	3.62	3.61
22-11-08	7	30	30	30	21	18.14	1.35	1.05	1.10	40.79	41.09	41.04	5.03	5.07	5.07	5.06
29-11-08	7	24	24	24	5.5	4.75	1.20	1.15	1.10	33.55	33.60	33.65	4.14	4.15	4.15	4.15
06-12-08	7	24	24	24	4.2	3.63	1.05	0.90	1.05	26.58	26.73	26.58	3.28	3.30	3.28	3.29
13-12-08	7	12	12	12	28.9	24.97	1.15	1.00	1.10	47.82	47.97	47.87	5.90	5.92	5.91	5.91
20-12-08	7	12	12	12	32.5	28.08	1.30	1.10	1.20	38.78	38.98	38.88	4.79	4.81	4.80	4.80

Anexo 20: Cálculo de ET<sub>b</sub>, K<sub>c</sub>, ET<sub>c</sub>-ajus, K<sub>c</sub>-ajus en bofedales de puna seca y húmeda.

$$ET_{c-aj} = K_s * K_c * ET_c$$

K<sub>s</sub> : Coeficiente de estrés hídrico en la transpiración del cultivo y no a la evaporación del suelo.

K<sub>s</sub> < 1 : Cuando se producen limitaciones debido a la disponibilidad de agua en el suelo.

K<sub>s</sub>=1 : Cuando no existan condiciones de estrés por falta de humedad del suelo.

**Agua disponible total (ADT):**

$$ADT = 1000(\theta_{FC} - \theta_{WP})Z_r$$

**Agua fácilmente aprovechable (AFA):**

$$AFA = p \cdot ADT$$

$$p = P_{Cuadro 22} + 0.04(5 - ET_c)$$

**Para D<sub>r</sub> > AFA:**

$$K_s = \frac{ADT - D_r}{ADT - AFA}$$

Donde:

ADT : Total de agua disponible en la zona radicular del suelo (mm).

θ<sub>FC</sub> : Contenido de Humedad a Capacidad de Campo (m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>).

θ<sub>WP</sub> : Contenido de Humedad en el punto de marchites permanente (m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>).

Z<sub>r</sub> : Profundidad de las raíces (m).

AFA : Agua fácilmente aprovechable (extraíble) de la zona radicular del suelo (mm).

p : Fracción promedio del agua disponible total en el suelo (ADT) que puede ser agotada de la zona radicular antes de presentar estrés hídrico (reducción de la ET) (0-1).

K<sub>s</sub> : Es un factor adimensional de reducción de transpiración que dependen de la cantidad de agua disponible en el suelo (0-1).

D<sub>r</sub> : Agotamiento de humedad en la zona radicular (mm).

Nota: Cuando el agotamiento en la zona radicular sea menor que AFA, K<sub>s</sub> = 1.

**Características del tipo de suelo.**

Bofedal	Arena (%)	Arcilla (%)	Limo (%)	Textura	Cc	Pm	p	Pr (cm)
Capaso	38.0	13.0	49.0	F	17.7	9.5	0.2	0.2
Mazocruz	38.0	9.0	53.0	FL	16.4	8.7	0.2	0.2
Santa Rosa	46.0	9.0	45.0	F	15.3	8.0	0.2	0.2
Macusani	52.0	5.0	43.0	Fa	13.2	6.7	0.2	0.2

Calculo de ETb en condiciones de estrés hídrico y Kc ajustado

Bof	Mes	ET bofedal (mm/día)	ETo (mm/día)	Kc de bofedal		Características del suelo				Humedad del bofedal	Estrés Hídrico - Ks					ETb-aj (mm/día)	Kc bajo estrés hídrico	
				Kc Media mensual	Kc media anual	Cc	Pm	Pr	p		p - aj	Dr	ADT	AFA	Ks		Kc-aj estrés hídrico	Kc-aj del bofedal media anual
CAPASO	E	5.48	3.29	1.66	0.98	0.18	0.10	0.20	0.20	14.00	0.20	7.40	16.40	3.28	0.69	3.76	1.14	0.73
	F	4.93	3.44	1.43		0.18	0.10	0.20	0.20	14.00	0.20	7.40	16.40	3.33	0.69	3.39	0.99	
	M	3.90	2.98	1.31		0.18	0.10	0.20	0.20	14.00	0.24	7.40	16.40	4.00	0.73	2.83	0.95	
	A	2.03	2.97	0.68		0.18	0.10	0.20	0.20	14.00	0.32	7.40	16.40	5.23	0.81	1.64	0.55	
	M	1.97	2.79	0.71		0.18	0.10	0.20	0.20	14.00	0.32	7.40	16.40	5.27	0.81	1.59	0.57	
	J	1.88	2.27	0.83		0.18	0.10	0.20	0.20	14.00	0.32	7.40	16.40	5.33	0.81	1.53	0.67	
	J	1.86	2.52	0.74		0.18	0.10	0.20	0.20	14.00	0.33	7.40	16.40	5.34	0.81	1.51	0.60	
	A	2.09	2.91	0.72		0.18	0.10	0.20	0.20	14.00	0.32	7.40	16.40	5.19	0.80	1.68	0.58	
	S	2.14	3.61	0.59		0.18	0.10	0.20	0.20	14.00	0.31	7.40	16.40	5.16	0.80	1.71	0.47	
	O	3.40	4.20	0.81		0.18	0.10	0.20	0.20	14.00	0.26	7.40	16.40	4.33	0.75	2.53	0.60	
	N	3.72	3.90	0.95		0.18	0.10	0.20	0.20	14.00	0.25	7.40	16.40	4.12	0.73	2.73	0.70	
	D	4.97	3.66	1.36		0.18	0.10	0.20	0.20	14.00	0.20	7.40	16.40	3.30	0.69	3.42	0.93	
MAZOCRUZ	E	4.15	3.38	1.23	1.25	0.16	0.09	0.20	0.20	12.50	0.23	7.80	15.40	3.60	0.64	2.67	0.79	0.81
	F	4.45	3.40	1.31		0.16	0.09	0.20	0.20	12.50	0.22	7.80	15.40	3.42	0.63	2.82	0.83	
	M	3.43	2.96	1.16		0.16	0.09	0.20	0.20	12.50	0.26	7.80	15.40	4.05	0.67	2.29	0.77	
	A	3.23	2.80	1.15		0.16	0.09	0.20	0.20	12.50	0.27	7.80	15.40	4.17	0.68	2.19	0.78	
	M	2.98	2.84	1.05		0.16	0.09	0.20	0.20	12.50	0.28	7.80	15.40	4.32	0.69	2.05	0.72	
	J	3.03	2.37	1.28		0.16	0.09	0.20	0.20	12.50	0.28	7.80	15.40	4.29	0.68	2.07	0.87	
	J	3.03	2.49	1.22		0.16	0.09	0.20	0.20	12.50	0.28	7.80	15.40	4.29	0.68	2.08	0.83	
	A	3.60	3.13	1.15		0.16	0.09	0.20	0.20	12.50	0.26	7.80	15.40	3.94	0.66	2.39	0.76	
	S	4.36	3.52	1.24		0.16	0.09	0.20	0.20	12.50	0.23	7.80	15.40	3.47	0.64	2.78	0.79	
	O	5.10	4.13	1.23		0.16	0.09	0.20	0.20	12.50	0.20	7.80	15.40	3.08	0.62	3.14	0.76	
	N	5.10	3.57	1.43		0.16	0.09	0.20	0.20	12.50	0.20	7.80	15.40	3.08	0.62	3.14	0.88	
	D	5.57	3.63	1.53		0.16	0.09	0.20	0.20	12.50	0.20	7.80	15.40	3.08	0.62	3.43	0.95	
SANTA ROSA	E	6.26	3.44	1.82	1.42	0.15	0.08	0.20	0.20	11.00	0.20	8.60	14.60	2.92	0.51	3.21	0.93	0.74
	F	5.41	3.56	1.52		0.15	0.08	0.20	0.20	11.00	0.20	8.60	14.60	2.92	0.51	2.78	0.78	
	M	4.75	3.11	1.53		0.15	0.08	0.20	0.20	11.00	0.21	8.60	14.60	3.07	0.52	2.47	0.79	
	A	4.56	3.25	1.40		0.15	0.08	0.20	0.20	11.00	0.22	8.60	14.60	3.18	0.53	2.39	0.74	
	M	4.18	3.17	1.32		0.15	0.08	0.20	0.20	11.00	0.23	8.60	14.60	3.40	0.54	2.24	0.71	
	J	3.82	3.04	1.25		0.15	0.08	0.20	0.20	11.00	0.25	8.60	14.60	3.61	0.55	2.09	0.69	
	J	3.64	3.23	1.13		0.15	0.08	0.20	0.20	11.00	0.25	8.60	14.60	3.72	0.55	2.00	0.62	
	A	4.44	3.72	1.19		0.15	0.08	0.20	0.20	11.00	0.22	8.60	14.60	3.25	0.53	2.35	0.63	
	S	5.12	4.38	1.17		0.15	0.08	0.20	0.20	11.00	0.20	8.60	14.60	2.92	0.51	2.63	0.60	
	O	6.28	4.70	1.34		0.15	0.08	0.20	0.20	11.00	0.20	8.60	14.60	2.92	0.51	3.23	0.69	
	N	6.55	4.09	1.60		0.15	0.08	0.20	0.20	11.00	0.20	8.60	14.60	2.92	0.51	3.37	0.82	
	D	6.49	3.76	1.73		0.15	0.08	0.20	0.20	11.00	0.20	8.60	14.60	2.92	0.51	3.34	0.89	
MACUSANI	E	4.67	2.98	1.57	0.99	0.13	0.07	0.20	0.20	10.00	0.21	6.40	13.20	2.81	0.65	3.06	1.03	0.69
	F	4.23	3.14	1.35		0.13	0.07	0.20	0.20	10.00	0.23	6.40	13.20	3.04	0.67	2.83	0.90	
	M	3.73	2.79	1.34		0.13	0.07	0.20	0.20	10.00	0.25	6.40	13.20	3.31	0.69	2.56	0.92	
	A	3.07	2.81	1.09		0.13	0.07	0.20	0.20	10.00	0.28	6.40	13.20	3.66	0.71	2.19	0.78	
	M	1.65	2.89	0.57		0.13	0.07	0.20	0.20	10.00	0.33	6.40	13.20	4.41	0.77	1.27	0.44	
	J	1.46	2.76	0.53		0.13	0.07	0.20	0.20	10.00	0.34	6.40	13.20	4.51	0.78	1.14	0.41	
	J	1.37	2.88	0.48		0.13	0.07	0.20	0.20	10.00	0.35	6.40	13.20	4.56	0.79	1.08	0.37	
	A	1.73	3.32	0.52		0.13	0.07	0.20	0.20	10.00	0.33	6.40	13.20	4.37	0.77	1.33	0.40	
	S	3.06	3.61	0.85		0.13	0.07	0.20	0.20	10.00	0.28	6.40	13.20	3.66	0.71	2.18	0.60	
	O	3.82	3.91	0.98		0.13	0.07	0.20	0.20	10.00	0.25	6.40	13.20	3.26	0.68	2.61	0.67	
	N	4.13	3.47	1.19		0.13	0.07	0.20	0.20	10.00	0.23	6.40	13.20	3.10	0.67	2.78	0.80	
	D	4.76	3.29	1.45		0.13	0.07	0.20	0.20	10.00	0.21	6.40	13.20	2.76	0.65	3.10	0.94	

Anexo 21: Relación de fotos



Foto 01: Excavación, instalación y nivelación de lisímetros y el tanque de lectura.



Foto 02: Vista en el proceso de instalación de Lisímetros y tanque de lectura.



Foto 03: Conexión de tubos PVC Ø 1 Pulg. al tanque de control de lectura.



Foto 04: Vista zanja excavada para el Lisímetro.



Foto 05: Vista de las Válvulas de drenaje de los Lisímetros L1, L2 y L3.



Foto 06: Vista de los Lisímetros L1, L2 y L3 y el tanque de control de lecturas.



Foto 07: Comportamiento de bofedal en el Lisímetro.



Foto 08: Comportamiento del Lisímetro en el bofedal de Capaso.



Foto 09: Jaula protector para los cuadrantes de muestreo de forraje verde.



Foto 10: Lectura de temperatura en cuadrante de 0.20 x 0.20m.