

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO**  
**ESCUELA DE POSGRADO**  
**PROGRAMA DE MAESTRÍA**  
**MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA**  
**AGRÍCOLA**



**TESIS**

**EVAPOTRANSPIRACIÓN DE LOS CULTIVOS PAPA, QUÍNUA Y  
ALFALFA ESTIMADOS MEDIANTE MÉTODOS EMPÍRICOS APLICADOS  
A LA CUENCA DEL LAGO TITICACA PERUANO**

**PRESENTADA POR:**

**ABDON CHARAJA VILLALTA**

**PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE:**

**MAGISTER SCIENTIAE EN INGENIERÍA DE RECURSOS HÍDRICOS**

**PUNO, PERÚ**

**2017**

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO  
ESCUELA DE POSGRADO  
PROGRAMA DE MAESTRÍA  
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA AGRÍCOLA  
TESIS



EVAPOTRANSPIRACIÓN DE LOS CULTIVOS PAPA, QUINUA Y  
ALFALFA ESTIMADOS MEDIANTE MÉTODOS EMPÍRICOS EN LA  
CUENCA DEL LAGO TITICACA PERUANO

PRESENTADA POR:

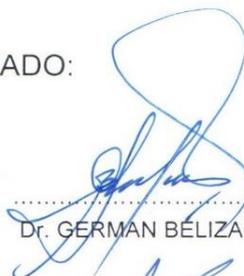
ABDON CHARAJA VILLALTA

PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE:

MAGISTER SCIENTIAE EN INGENIERÍA DE RECURSOS HÍDRICOS

APROBADA POR EL SIGUIENTE JURADO:

PRESIDENTE



.....  
Dr. GERMAN BELIZARIO QUISPE

PRIMER MIEMBRO



.....  
Dr. ALI WILLIAM CANAZA CAYO

SEGUNDO MIEMBRO



.....  
Dr. FLAVIO ORTIZ CALCINA

ASESOR DE TESIS



.....  
M.Sc. OSCAR RAUL MAMANI LUQUE

Puno, 15 de diciembre del 2017.

**ÁREA:** Eficiencia del uso del agua.

**TEMA:** Evotranspiración de los cultivos de papa, quinua y alfalfa.

**LÍNEA:** Determinación de los usos consuntivos de los cultivos (Kc).

## DEDICATORIA

Con mucho cariño a mis queridos padres Santiago y Julia, que desde el cielo me guiaron para culminar mi anhelo.

Con mucho aprecio a mi esposa Marina Julia y a mis queridos hijos Carlos, Liz por su inmenso apoyo de fuerza moral permanente.

Con mil agradecimientos al M.Sc Óscar Mamani Luque por su valioso apoyo en la culminación de este trabajo.

## AGRADECIMIENTOS

- A nuestra Alma Mater la Universidad Nacional del Altiplano de Puno, Escuela de Posgrado, por darme la oportunidad de formarme como especialista en ingeniería de Recursos Hídricos.
- A los miembros del jurado calificador: Presidente Dr. German Belizario Quispe, Primer miembro Dr. Ali William Canaza Cayo, Segundo miembro, Dr. Flavio Ortiz Calcina y mi Asesor M.Sc. Oscar Raúl Mamani Luque, por su aporte y colaboración en la culminación de la presente investigación.
- Al personal administrativo de la Escuela de Posgrado de la Maestría en Ciencias de la Ingeniería Agrícola, por su apoyo.

**ÍNDICE GENERAL**

	<b>Pág.</b>
DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTOS	ii
ÍNDICE GENERAL	iii
ÍNDICE DE CUADROS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE ANEXOS	xiii
RELACIÓN DE ACRÓNIMOS	xiv
RESUMEN	xv
ABSTRACT	xvi
INTRODUCCIÓN	1

**CAPÍTULO I****PROBLEMÁTICA DE INVESTIGACIÓN**

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	3
1.1.1 Interrogante general	4
1.1.2 Interrogantes específicos	4
1.2 JUSTIFICACIÓN	4
1.3 OBJETIVOS	7
1.3.1 Objetivo general	7
1.3.2 Objetivos específicos	7
1.4 HIPÓTESIS	8
1.4.1 Hipótesis general	8
1.4.2 Hipótesis específicos	8

**CAPÍTULO II****MARCO TEÓRICO**

2.1 ANTECEDENTES	9
2.2 MARCO REFERENCIAL	11
2.2.1 Descripción de los cultivos	11
2.2.1.1 Cultivo papa	11
2.2.1.2 Cultivo quinua	13
2.2.1.3 Cultivo Alfalfa	15
2.2.2 Estimación de la evapotranspiración de referencia	17
2.3 MARCO CONCEPTUAL	24
2.3.1 Evaporación	24
2.3.2 Transpiración	25
2.3.2 Evapotranspiración	26
2.3.3 Evapotranspiración de referencia	27
2.3.4 Evapotranspiración del cultivo	27
2.3.5 Necesidades hídricas de los cultivos	28
2.3.6 Parámetros meteorológicos	29
2.4 ZONAS AGROECOLÓGICAS EN EL PERU	30
2.5 CUENCA HIDROGRÁFICA	34

**CAPÍTULO III****METODOLOGÍA**

3.1 UBICACIÓN DE LA ZONA EN ESTUDIO	36
3.2 INFORMACIÓN METEOROLÓGICA	39
3.3 MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA	41

3.3.1	Métodos directos	41
3.3.2	Métodos indirectos	42
3.4	COEFICIENTE DE CULTIVO	44
3.5	ESTIMACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DE CULTIVO	47
3.6	. ANÁLISIS ESTADÍSTICO	49
<b>CAPÍTULO IV</b>		
<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>		
4.1	DE LA INFORMATION METEOROLÓGICA	51
4.2	DE LA ESTIMACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA (ET <sub>o</sub> )	58
4.2.1	Método Penman Monteith	58
4.2.2	Método tanque evaporímetro clase A	61
4.3	DE LA ESTIMACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DE CULTIVO	66
4.3.1	De la estimación del coeficiente de cultivo K <sub>c</sub>	66
	CONCLUSIONES	87
	RECOMENDACIONES	89
	BIBLIOGRAFÍA	90
	ANEXOS	97

## ÍNDICE DE CUADROS

	Pág.
1. Coeficiente de tanque evaporímetro clase A.....	21
2. Ubicación Política y geográfica de las estaciones meteorológicas. ....	40
3. Información meteorológica promedio anual en el ámbito del estudio. ....	53
4. Evaporación (mm) promedio mensual en tanque clase A .....	57
5 Evapotranspiración de referencia (mm) –Método Penman-Monteith. ....	60
6. Coeficiente de tanque clase A (Kb). ....	61
7. Evapotranspiración de referencia (mm) –método tanque clase A .....	63
8. Resultados de la prueba estadística T de Student. ....	65
9. Cédula de cultivo y periodo vegetativo.....	68
10. Coeficiente de cultivo Kc.....	69
11. Evapotranspiración mensual (mm) del cultivo de papa-Penman-Monteith. 72	
12. Evapotranspiración mensual (mm) del cultivo de papa –Tanque clase A...73	
13. Evapotranspiración ETc. mensual (mm) del cultivo de quinua – Penman Monteith.....	77
14 Evapotranspiración mensual (mm) del cultivo de quinua – Tanque clase A.78	
15. Evapotranspiración mensual (mm) del cultivo de alfalfa – Penman Monteith. .....	82
16. Evapotranspiración ETc. mensual (mm) del cultivo de alfalfa – Tanque clase A.....	83
17. Información meteorológica promedio mensual - estación Ananea .....	98
18. Información meteorológica promedio mensual - estación Arapa .....	98
19. Información meteorológica promedio mensual - estación Azángaro. ....	99



20. Información meteorológica promedio mensual - estación Cabanillas. ....	99
21. Información meteorológica promedio mensual - estación Capachica. ....	100
22. Información meteorológica promedio mensual - estación Capazo. ....	100
23. Información meteorológica promedio mensual- estación Chuquibambilla.	101
24. Información meteorológica promedio mensual - estación Cojata. ....	101
25. Información meteorológica promedio mensual - estación Crucero. ....	102
26. Información meteorológica promedio mensual - estación Desaguadero. .	102
27. Información meteorológica promedio mensual - estación Huancané.....	103
28. Información meteorológica promedio mensual - estación Huaraya Moho.	103
29. Información meteorológica promedio mensual - estación Llave. ....	104
30. Información meteorológica promedio mensual - estación Juli. ....	104
31. Información meteorológica promedio mensual - estación Lampa. ....	105
32. Información meteorológica promedio mensual - estación Llalli.....	105
33. Información meteorológica promedio mensual - estación Macusani.....	106
34. Información meteorológica promedio mensual - estación Mañazo. ....	106
35. Información meteorológica promedio mensual - estación Mazocruz. ....	107
36. Información meteorológica promedio mensual - estación Muñani. ....	107
37. Información meteorológica promedio mensual - estación Pampahuta.....	108
38. Información meteorológica promedio mensual - estación Pizacoma. ....	108
39. Información meteorológica promedio mensual - estación Progreso. ....	109
40. Información meteorológica promedio mensual - estación Pucara. ....	109
41. Información meteorológica promedio mensual - estación Puno. ....	110
42. Información meteorológica promedio mensual - estación Putina.....	110
43. Información meteorológica promedio mensual - estación Santa Lucia. ....	111
44. Información meteorológica promedio mensual - estación Santa Rosa. ....	111

45. Información meteorológica promedio mensual - estación Taraco.....	112
46. Información meteorológica promedio mensual - estación Yunguyo.....	112
47. Calculo de ETo método Penman-Monteith, estación Ananea.....	113
48. Calculo de ETo método Penman-Monteith, estación Arapa. ....	113

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
1. Esquema del Tanque evaporímetro clase A.....	19
2. Dos casos de localización del tanque de evaporación clase A.....	20
3. Representación esquemática de la Transpiración.....	26
4. Esquema de la evapotranspiración de referencia.....	27
5. Esquema de la Evapotranspiración del cultivo en condiciones .....	28
6. Mapa altitudinal y de zonas agroecológicas del Perú.....	33
7. Mapa de ubicación de estaciones meteorológicas. ....	38
8. Curva generalizada del coeficiente del cultivo (Kc). ....	45
9. Variación de la temperatura máxima y mínima mensual promedio (°C). ....	54
10. Variación de la humedad relativa mensual (%) promedio.....	54
11. Variación de la velocidad del viento (m/s) promedio .....	55
12. Variación de la insolación (hr.) promedio diario.....	56
13. Variación de la evaporación en tanque clase A (mm/mes) promedio. ....	58
14. Curva Kc para el cultivo de papa. ....	69
15. Curva Kc para el cultivo de quinua.....	69
16. Curva Kc para el cultivo de alfalfa (primer corte).....	70
17. Variación mensual de la evapotranspiración del cultivo de papa (mm)– Penman Monteith.....	74
18. Variación mensual de la evapotranspiración del cultivo de papa (mm) – Tanque clase A.....	75
19. Variación mensual de la evapotranspiración del cultivo de quinua (mm) – Penman Monteith.....	79

20. Variación mensual de la evapotranspiración del cultivo de quinua (mm) – Tanque clase A.....	80
21. Variación mensual de la evapotranspiración del cultivo de alfalfa (mm) – Penman Monteith.....	85
22. Variación mensual de la evapotranspiración del cultivo de alfalfa (mm) – Tanque clase A.....	86
23. Variación mensual de la evapotranspiración de referencia (mm) -Estación Ananea .....	114
24. Variación mensual de la evapotranspiración de referencia (mm) Estación Arapa.....	114
25. Variación mensual de la evapotranspiración de referencia (mm) Estación Azángaro .....	115
26. Variación mensual de la evapotranspiración de referencia (mm) Estación Cabanillas.....	115
27. Variación mensual de la evapotranspiración de referencia (mm) Estación Capachica.....	116
28. Variación mensual de la evapotranspiración de referencia (mm) Estación Capazo.....	116
29. Variación mensual de la evapotranspiración de referencia (mm) Estación Chuquibambilla .....	117
30. Variación mensual de la evapotranspiración de referencia (mm) Estación Cojata .....	117
31. Variación mensual de la evapotranspiración de referencia (mm) Estación Crucero.....	118

32. Variación mensual de la evapotranspiración de referencia (mm) Estación Desaguadero. ....	118
33. Variación mensual de la evapotranspiración de referencia (mm) Estación Huancane .....	119
34. Variación mensual de la evapotranspiración de referencia (mm) Estación Huaraya Moho. ....	119
35. Variación mensual de la evapotranspiración de referencia (mm) Estación Ilave. ....	120
36. Variación mensual de la evapotranspiración de referencia (mm) Estación Juli .....	120
37. Variación mensual de la evapotranspiración de referencia (mm) Estación Lampa. ....	121
38. Variación mensual de la evapotranspiración de referencia (mm) Estación Llalli. ....	121
39. Variación mensual de la evapotranspiración de referencia (mm) Estación Macusani .....	122
40. Variación mensual de la evapotranspiración de referencia (mm) Estación Mañazo. ....	122
41. Variación mensual de la evapotranspiración de referencia (mm) Estación Mazo cruz .....	123
42. Variación mensual de la evapotranspiración de referencia (mm) Estación Muñani. ....	123
43. Variación mensual de la evapotranspiración de referencia (mm) Estación Pampahuta. ....	124

44. Variación mensual de la evapotranspiración de referencia (mm) Estación Pizacoma. ....	124
45. Variación mensual de la evapotranspiración de referencia (mm) Estación Progreso. ....	125
46. Variación mensual de la evapotranspiración de referencia (mm) Estación Pucara. ....	125
47. Variación mensual de la evapotranspiración de referencia (mm) Estación Puno. ....	126
48. Variación mensual de la evapotranspiración de referencia (mm) Estación Putina. ....	126
49. Variación mensual de la evapotranspiración de referencia (mm) Estación Santa Lucía.....	127
50. Variación mensual de la evapotranspiración de referencia (mm) Estación Santa Rosa.....	127
51. Variación mensual de la evapotranspiración de referencia (mm) Estación Taraco .....	128
52. Variación mensual de la evapotranspiración de referencia (mm) Estación Yunguyo. ....	128

## ÍNDICE DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
1. Información meteorológica de las estaciones estudiadas.	98
2. Cálculo de la evapotranspiración de referencia.	113
3. Gráficos de la variación de la evapotranspiración de referencia estimados mediante tanque clase a y Penman-Monteith.	114

**RELACIÓN DE ACRÓNIMOS**

ET <sub>c</sub>	: Evapotranspiración del cultivo.
ET <sub>o</sub>	: Evapotranspiración de referencia.
K <sub>c</sub>	: Coeficiente de cultivo.
FAO	: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
OMS	: Organización Mundial de la Salud.
SENAMHI	: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología.

## RESUMEN

El trabajo de investigación tuvo como problemática conocer la variación de la evapotranspiración de los cultivos papa, quinua y alfalfa durante su periodo vegetativo en la cuenca del lago Titicaca peruano; los objetivos específicos son: a) Determinar la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) mediante los métodos indirectos Penman Monteith y tanque clase A y b) Determinar la evapotranspiración real (ET<sub>c</sub>) de los cultivos papa, quinua y alfalfa considerando los coeficientes de cultivo y la evapotranspiración de referencia; la metodología utilizado es: a) información meteorológica de temperatura máxima, temperatura mínima, humedad relativa, velocidad del viento, insolación y evaporación, b) determinación de la evapotranspiración de referencia mediante los métodos de Penman Monteith y tanque evaporímetro clase A, c) Determinación de los coeficientes de los cultivos papa, quinua y alfalfa siguiendo la metodología de la FAO y d) Determinación de la evapotranspiración real de los cultivos papa, quinua y alfalfa. Los resultados de ET<sub>o</sub> por el método Penman Monteith son: 105.05, 94.78, 101.50, 98.37, 96.70, 87.10, 92.82, 104.73, 113.99, 126.02, 124.54, 117.26 y por método tanque evaporímetro clase A es: 101.99, 91.50, 97.41, 94.96, 95.69, 88.46, 93.20, 105.03, 113.77, 124.98, 124.41, 115.56 para los meses de enero a diciembre de ambos métodos. La evapotranspiración del cultivo de papa para un periodo vegetativo de 150 días, varía de 351.1 a 599.6 mm mediante el método de Penman Monteith y mediante el método tanque clase A varia de 270.7 a 542.1 mm; la evapotranspiración mensual del cultivo de quinua, para un periodo vegetativo de 150 días, varía de 311.0 a 547.6 mm estimado mediante el método de Penman-Monteith y mediante el método tanque clase A varia de 242.5 a 501.1 mm; la evapotranspiración del cultivo de alfalfa estimado mediante el método de Penman-Monteith, para un periodo vegetativo de 180 días, varía de 473.80 a 784.30 mm, y mediante el método tanque clase A varia de 364.2 a 691.3 mm.

**Palabras Clave:** alfalfa, evapotranspiración, papa, Penman-Monteith y quinua.

## ABSTRACT

The research work had as problems to know the variation of the evapotranspiration of the crops of potato, quinoa and Lucerne during its vegetative period in the Peruvian Titicaca basin. The specific objectives are: a) Determine the evapotranspiration of reference  $E_{To}$ . Using the indirect methods Penman Monteith and Tank class A, b) determine the evapotranspiration of the  $E_{Tc}$ . potato, quinoa and lucerne considering the crop coefficients and the reference evapotranspiration; the methodology used is: a) meteorological information of maximum temperature, minimum temperature, relative humidity, wind speed, insolation and evaporation, b) determination of the reference evapotranspiration by means of Penman Monteith's methods and class A evaporimeter tank, c) Determination of the coefficients of the potato, quinoa and lucerne crops following the methodology of FAO and d) determination of the actual evapotranspiration of the potato, quinoa and lucerne crops. The results of  $E_{To}$  by the Penman Monteith method are: 105.05, 94.78, 101.50, 98.37, 96.70, 87.10, 92.82, 104.73, 113.99, 126.02, 124.54, 117.26 and by class A evaporimeter method is: 101.99, 91.50, 97.41, 94.96, 95.69, 88.46, 93.20, 105.03, 113.77, 124.98, 124.41, 115.56 for the months of January to December of both methods. The evapotranspiration of the potato crop for a vegetative period of 150 days, varies from 353.1 to 599.6 mm by the method of Penman Monteith and through the tank method class A varies from 270.7 to 542.1 mm; the monthly evapotranspiration of the quinoa crop, for a vegetative period of 150 days, varies from 311.0 to 547.6 mm estimated by the Penman-Monteith method and by the class A tank method it varies from 242.5 to 501.1 mm; The evapotranspiration of the lucerne crop estimated by the Penman-Monteith method, for a vegetative period of 180 days, varies from 473.80 to 784.30 mm, and by the tank method class A varies from 364.2 to 691.3 mm.

**Keywords:** Lucerne, evapotranspiration, potato Penman-Monteith, quinoa.

## INTRODUCCIÓN

En la agricultura, la evapotranspiración real o uso consuntivo es una de las variables elementales para promover un uso más eficiente del agua, por esto la necesidad de tener estimaciones precisas. Sin embargo, debido a la complejidad que representa la estimación de la evapotranspiración se han desarrollado una gran cantidad de métodos los cuales se pueden clasificar en dos grandes grupos: por una parte se encuentran los métodos directos que miden la evapotranspiración mediante dispositivos, en cualquier cultivo para las condiciones de suelo, clima y disponibilidad de agua en la zona de estudio, generalmente se obtienen buenos resultados, el problema es que usualmente son costosos ya que requieren una instalación y mantenimiento de los dispositivos, además requieren de bastante tiempo para llegar a resultados; por otra parte, se encuentran los métodos indirectos, estos métodos teóricos y empíricos son muy utilizados actualmente, por lo general se basan en el balance de energía, otros utilizan la información meteorológica y como principales limitaciones se ha encontrado que fueron desarrollados para unas condiciones específicas (Jensen *et al.*, 1990).

La evapotranspiración (ET) ocurre debido a dos fenómenos que se da en la relación cultivo-suelo, la transpiración del cultivo y la evaporación del suelo, la misma constituye la pérdida fundamental de agua, a partir de la cual se calcula la necesidad de agua de los cultivos. La ET es un parámetro de interés común en estudios climatológicos, hidrológicos, agrícolas y forestales (Melesse *et al.*, 2007).

La papa y la quinua constituyen la base de la alimentación del poblador especialmente de la sierra; así mismo a los productores de la región andina que les genera mayores ingresos económicos; por otro lado la actividad pecuaria requiere de disponibilidad de forraje, siendo la alfalfa un cultivo importante para la producción ganadera en la región Puno.

Esta investigación busca determinar las necesidades hídricas o evapotranspiración real de los cultivos papa, quinua y alfalfa, en el ámbito de la cuenca del lago Titicaca peruano, a través de la determinación de los coeficientes de cultivo ( $K_c$ ) y la evapotranspiración potencial o de referencia ( $ETo$ ), mediante los métodos indirectos Penman-Monteith y tanque evaporímetro clase A, considerando como principales variables meteorológicas a la temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, insolación y evaporación.

## CAPÍTULO I

### PROBLEMÁTICA DE INVESTIGACIÓN

#### 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

La producción de alimentos y el uso de agua están relacionados de forma inseparable; el agua siempre ha sido el principal factor que limita la producción agrícola en gran parte del mundo, donde la precipitación no es suficiente para satisfacer la demanda de los cultivos. Por estas consideraciones es necesario plantear la base de datos que sirva de punto de partida para el análisis del uso eficiente del agua en la cuenca del Titicaca, para atender la creciente demanda de productos agrícolas, esta necesidad nunca antes ha sido tan apremiante para mejorar la producción y productividad de los cultivos, a fin de garantizar la seguridad alimentaria en el futuro y enfrentar las incertidumbres asociadas con el cambio climático.

Con el fin de analizar las alternativas para incrementar la productividad de los cultivos y el uso del agua, es necesario conocer las necesidades hídricas de los cultivos y dotarlos en cantidad y calidad necesaria en forma oportuna.

Las interrogantes a responder en la investigación son las siguientes:

### 1.1.1 Interrogante general

¿Cómo es la evapotranspiración referencia de los cultivos papa, quinua y alfalfa mediante métodos empíricos en la cuenca del lago Titicaca peruano.

### 1.1.2 Interrogantes específicos

- ¿Cómo es la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) mediante los métodos empíricos Penman-Monteith y tanque clase A, en la cuenca del lago Titicaca, peruano?
- ¿Cómo se determina la evapotranspiración de los cultivos (ET<sub>c</sub>) papa, quinua y alfalfa considerando los coeficientes de cultivo y la y la evapotranspiración de referencia de la cuenca del lago Titicaca peruano?

## 1.2 JUSTIFICACIÓN

La región Puno produce una diversidad de cultivos alimenticios y forrajeros, porque existe presencia de lluvias durante los meses de diciembre a abril con una altura de precipitación anual que varía en promedio de 600 a 700 mm, esto hace que las ríos y manantiales se recarguen constantemente por lo que la disponibilidad de agua es considerable, además la agricultura es una actividad principal en la región Puno y se desarrolla de forma exitosa ya que se cuenta con el recurso agua necesario, a diferencia de la costa en donde la precipitación es mínima y cada vez más escasa por el clima árido.

Según el Ministerio de Agricultura (2012), la papa (*Solanum tuberosum* L.) es considerada como uno de los principales cultivos del Perú, por las amplias hectáreas instaladas, su disponibilidad como producto alimenticio en todo el año

y su diversidad en la gastronomía peruana. La papa se cultiva en 19 departamentos del Perú, desde el nivel del mar hasta los 4,100 metros de altura y constituye la base de la alimentación del poblador especialmente de la sierra. Este cultivo genera al productor andino mayores ingresos económicos que cualquier otro cultivo.

La quinua produce semillas nutritivas con un alto contenido proteico (de 12 hasta 20 %), en comparación con el maíz, arroz e incluso el trigo. Una composición equilibrada de aminoácidos hace que la calidad de la proteína sea comparable a la de la leche, convirtiéndola en sustituto eficaz de la carne y la leche; además, la quinua no contiene gluten, lo cual es una ventaja en la producción comercial de alimentos para consumo de celíacos (Álvarez *et al.*, 2009).

Según la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), así como la Organización Mundial de la Salud (OMS), han calificado a la quinua como un alimento único, por su altísimo valor nutricional que permite sustituir las proteínas de origen animal, y por su contenido balanceado en proteínas y nutrientes. El altiplano peruano es el centro de origen y domesticación de este producto, el tamaño, color y sabor se diferencia según la variedad. El cultivo de la quinua se caracteriza por el predominio de pequeños productores con unidades agropecuarias menores a 3.0 ha, una alta variabilidad climática y uso de tecnología media o tradicional que se traduce en actividades agrícolas altamente diversificadas como condición de eficiencia económica que les permite disminuir el riesgo climático, de plagas y enfermedades (FAO, 2012); así mismo, el Ministerio de Agricultura y Riego (2013) menciona que las condiciones naturales de las zonas alto andinas, favorecen la producción de quinua, siendo las principales regiones productoras: Puno, Cusco, Junín,

Apurímac y Ayacucho. La región Puno sigue concentrando el 80% de la producción de quinua a nivel nacional.

Argote (2004) afirma que la alfalfa es una planta forrajera con alto contenido proteico, carbohidratos, minerales y vitaminas, muy apetecida por el ganado, no es tóxica, de alto rendimiento y larga vida (10 años); además, menciona que es una planta conocida como la reina de las forrajeras; sin embargo, requiere especial cuidado en el manejo.

Las principales actividades productivas de la región Puno, son la agrícola y pecuaria; la poca disponibilidad del recurso forrajero se debe a las malas prácticas de manejo (sobrepastoreo), a la poca disponibilidad de pastos cultivados y también a la baja calidad nutritiva de las pasturas naturales, lo cual ocasiona la baja productividad del ganado. Para responder al problema de escasez de pastos, se debe implementar la producción de forraje cultivado, entre ellas la alfalfa y avena (Argote, 2004).

La distribución del agua y el uso de los suelos son actividades básicas para el manejo racional de los cultivos alimenticios y forrajeros, así como el manejo de las pasturas naturales, lo que nos traerá como consecuencia una posibilidad de aumentar la calidad de vida de los habitantes de la cuenca del lago Titicaca peruano. Las características fundamentales del altiplano peruano son: la mayor parte de sus tierras tienen aptitud agrícola y pastizales, las lluvias se presentan durante los meses de diciembre, enero, febrero, marzo y abril, los meses de mayo a noviembre son secos (Argote, 2004).

Considerando que los cultivos papa y quinua son cultivos alimenticios indispensables y la alfalfa como un cultivo forrajero necesario para la actividad

pecuaria en la región Puno, existe la necesidad de realizar un estudio sobre la determinación de las necesidades hídricas o evapotranspiración real de los cultivos papa, quinua y alfalfa.

Los resultados de la investigación serán aplicados por:

- Profesionales formuladores de proyectos de riego superficial y riego presurizado.
- Funcionarios de las agencias agrarias de la región Puno, para realizar su planificación de las actividades agrícolas.
- Los operadores de sistemas de riego, para formular su plan de distribución de agua en coordinación con los usuarios de agua.
- El Ministerio de Agricultura y Riego para planificar la ampliación la frontera agrícola bajo riego en la región Puno.

### 1.3 OBJETIVOS

#### 1.3.1 Objetivo general

Determinar la evapotranspiración real de los cultivos papa, quinua y alfalfa mediante métodos indirectos en la cuenca del lago Titicaca peruano.

#### 1.3.2 Objetivos específicos

- Determinar la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) mediante los métodos indirectos Penman-Monteith y tanque clase A, en la cuenca del lago Titicaca, peruano.
- Determinar la evapotranspiración de los cultivos (ET<sub>c</sub>) papa, quinua y alfalfa considerando los coeficientes de cultivo y la evapotranspiración de referencia, en el ámbito de la cuenca del lago Titicaca, peruano.

## 1.4 HIPÓTESIS

### 1.4.1 Hipótesis general

La evapotranspiración real de los cultivos determinados mediante los métodos indirectos Penman-Monteith y tanque clase A, son confiables para el ámbito de la cuenca del lago Titicaca.

### 1.4.2 Hipótesis específicos

- La evapotranspiración de referencia ( $E_{To}$ ) de los cultivos se determina mediante los métodos indirectos Penman-Monteith y tanque de evaporación clase A, en la cuenca del lago Titicaca, peruano.
- La evapotranspiración de los cultivo papa, quinua y alfalfa se determina con el coeficiente de cultivo y la evapotranspiración de referencia en el ámbito de la cuenca del lago Titicaca peruano

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1 ANTECEDENTES

Sáez (2016) menciona que se determinó la evapotranspiración de referencia por el método del tanque evaporímetro tipo A, para la validación y se comparó el valor resultante con el método Penman-Monteith propuesto por la FAO; se observó un comportamiento similar entre los resultados de ambos procedimientos, además de una concordancia con la información fenológica del cultivo de papa. Se concluye que la metodología empleada describe adecuadamente el fenómeno de evapotranspiración del cultivo de papa en Riobamba, Ecuador.

Mallma (2015) menciona que en las condiciones de la sierra de la región Junín, durante todo el ciclo del cultivo de quinua, el requerimiento de agua mínimo varía entre 300 a 500 mm y máximo entre 600 a 800 mm de lámina de agua, para el cultivo se debe definir la fecha correcta de la siembra (la siembra coincida con épocas de lluvia y la cosecha con épocas de estiaje). El cultivo de papa tiene un sistema de producción en secano, el mejor rendimiento de este cultivo se da

cuando reciben por lo menos 600 mm de precipitación. Los resultados de la investigación en relación a la evapotranspiración del cultivo de papa es de 470.6 mm, para un periodo vegetativo de 5 meses y del cultivo de quinua es de 758 mm, para un periodo vegetativo de 6 meses.

Canllahui (2013) estudio a la evapotranspiración y coeficiente de cultivo (Kc) en la producción de papa (*Solanum tuberosum* L. Var. Silver) en el CIP-ILLPA-Puno y llegó a las siguientes resultados: la evapotranspiración del cultivo de papa mediante el método de lisímetro es de 610.76 mm, 588.87 mm mediante el método de Hargreaves en base a temperatura, 429.81 mm mediante Hargreaves en base a radiación solar y 579.42 mm mediante el método Serruto. El coeficiente de cultivo (Kc) para el cultivo de papa obtenido por el método del lisímetro fue: 0.46 en la fase de emergencia, 0.96 para la formación de estolones, 1.27 a inicios de la tuberización, 1.41 a inicios de floración, 1.80 en la fase final de floración, 1.35 en la fase final de tuberización y 0.96 en la fase de madurez fisiológica; estos resultados son similares frente a los valores asumidos a partir de la propuesta de FAO.

Flores (2013) realizo el estudio de la evapotranspiración en función de factores y elementos del clima en el altiplano peruano, se utilizó 42 estaciones meteorológicas; se determinó la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) en 09 estaciones con datos completos utilizando los métodos Penman-Monteith, Hargreaves-Samani y tanque clase "A". Se obtuvo un coeficiente de correlación que varía de 0.70 a 0.88 en la mayoría de estaciones entre el método Hargreaves-Samani y Penman-Monteith.

Marín (2010) menciona que las fórmulas estudiadas tienden a sobrestimar los valores de evapotranspiración potencial con respecto a los de evaporación real medidos en el tanque clase A. Las ecuaciones que involucran la mayor cantidad de variables climatológicas tales como radiación solar, insolación, temperatura, velocidad del viento y humedad relativa generalmente presentan un mejor comportamiento según lo demuestran las fórmulas de Hargreaves, Christiansen y Penman-Monteith, son las fórmulas de mejor comportamiento en Colombia.

En la zona semiárida de Quíbor del estado de Lara, en la región centro occidental de Venezuela, se estimaron los valores de evapotranspiración del cultivo de referencia (ET<sub>o</sub>) mediante los métodos de Penman-Monteith y la tina de evaporación. Las estimaciones con ambos métodos se realizó en dos períodos (abril-julio y julio-noviembre, 2001) fueron comparadas y presentaron una correlación mayor a 75 y 80 %, en cada caso respectivo. Los valores de ET<sub>o</sub> fueron muy similares para ambos métodos en el primer período, mientras que en el segundo los resultados de ET<sub>o</sub> fueron mayores para el método de la tina de evaporación. (Lopez y Dennet, 2005).

## 2.2 MARCO REFERENCIAL

### 2.2.1 Descripción de los cultivos

#### 2.2.1.1 Cultivo papa

##### a. Nombre científico.

*Solanum tuberosum* L.

Según Ochoa (1990), existen nueve especies diferentes de papas: *S. goniocalyx*, *S. phureja*, *S. stenotomum*, *S. tuberosum*,

*S. ajanhuiri*, *S. chaucha*, *S. juzepczukii*, *S. curtilobum* y *S. tuberosum* ssp. *andigenum*

**b. Nombres comunes.**

Papa en quechua y español, ch'oqe y kea en aymara.

**c. Distribución geográfica y requerimientos climáticos.**

Cada una de las nueve especies descritas por Ochoa (1990), tiene sus propias características morfológicas, así como adaptaciones altitudinales de hasta 4 300 msnm. En este sentido es posiblemente el cultivo de mayor versatilidad climática y ecológica.

**d. Época de siembra.**

Según el Ministerio de Agricultura (2006) la época de siembras de la papa se realiza durante el periodo de octubre a diciembre, con mayor énfasis en el mes de noviembre.

**e. Periodo vegetativo.**

140 a 180 días.

**f. Descripción botánica.**

Según Tapia y Fries (2007) la descripción botánica del cultivar es el siguiente:

- La planta de papa es de tipo herbáceo cuyo tamaño varía de 0,30 a 1 m de alto, según las variedades, con un crecimiento erecto o semierecto.
- Los tubérculos son tallos modificados y constituyen los órganos de reserva de la planta; varían en tamaño, forma y color de la piel y pulpa.

- Las yemas u ojos del tubérculo maduro permanecen latentes (dormancia) hasta que desarrollan un estolón de donde se origina una nueva planta. Los almacenes de luz difusa ayudan a que los estolones no se desarrollen antes de la siembra. Las hojas son compuestas.
- La flor es bisexual, es decir que tiene estambres (masculino) y pistilos (femenino). El fruto maduro es una baya generalmente de color verde oscuro y contiene las semillas, denominadas semillas botánicas, para diferenciarlas de la semilla tubérculo.

#### 2.2.1.2 Cultivo quinua

a. **Nombre científico:**

*Chenopodium quinoa* Willd. Familia: quenopodiáceas.

b. **Nombres comunes:**

Quinoa, quinua; kiwna (quechua); jiura, (aymara).

c. **Distribución geográfica:**

La quinua es un grano alimenticio que se cultiva ampliamente en la región andina, desde Colombia hasta el norte de Argentina en las condiciones de montañas de altura.

d. **Época de siembra:**

Según el Ministerio de Agricultura (2013), la época de siembra de la quinua se realiza durante el periodo de setiembre a diciembre, con mayor énfasis en el mes de octubre.

e. **Periodo vegetativo:**

150 a 180 días.

**f. Descripción botánica:**

Según Tapia y Fries (2007) la descripción botánica del cultivar es el siguiente:

- La raíz es muy fibrosa y sostiene bien a la planta, solo cuando hay un exceso de humedad puede ocurrir un vuelco por efecto de vientos fuertes. Cuando la raíz está totalmente desarrollada puede alcanzar hasta 1,50 m de profundidad según los tipos de suelos.
- El tallo es cilíndrico y a la madurez se vuelve anguloso, la parte interna o médula es blanda en las plantas jóvenes y a la madurez es esponjosa y hueca, generalmente de color crema. En el altiplano sur puede alcanzar 1,80 m de alto. Las hojas son de carácter polimorfo en una sola planta; las de la base son romboides, mientras que las hojas superiores, ubicadas alrededor de la inflorescencia, son lanceoladas.
- La inflorescencia de la quinua es racimosa y por la disposición de las flores se la denomina panoja. Existen dos tipos básicos de panoja: la glomerulada que es más densa y la amarantiforme cuando el eje glomerular nace directamente del eje principal. La inflorescencia tanto de tipo glomerulada, considerada la forma primitiva, como la amarantiforme, puede ser laxa o compacta; este carácter y la longitud de la panoja están muy relacionados al rendimiento del cultivo. Las inflorescencias densas y de mayor tamaño (70 cm) pueden llegar a un rendimiento de 220 gr. por planta.

- Las flores de la quinua son incompletas, es decir sin pétalos y pueden ser pistoladas o flores femeninas o hermafroditas, masculinas y femeninas a la vez.
- El fruto es un aquenio, mal llamado grano o pseudo cereal, con un perigonio que se desprende fácilmente y dos capas internas: episperma exterior y polispermo interior que difícilmente se separan del grano o fruto.

### 2.2.1.3 Cultivo Alfalfa

#### a. Nombre científico.

*Medicago sativa*.

#### b. Época de siembra

Se deberá sembrar con el inicio de las lluvias, puede ser desde noviembre. Si dispone de agua de riego, puede sembrar a partir de agosto.

#### c. Periodo vegetativo:

Primera cosecha o corte de 75 a 90 días, dependiendo de la temperatura.

#### d. Descripción botánica.

Según Argote (2004) la alfalfa pertenece a la familia de las leguminosas, se trata de una planta perenne, vivaz, de porte erecto, que tiene las siguientes características.

- La raíz principal es profunda, robusta y muy desarrollada, con numerosas raíces secundarias, posee una corona de donde nacen brotes que dan lugar a los tallos.

- Los tallos son delgados y erectos, soportan el peso de las hojas que se mantienen muy compactas.
- Las hojas son trifoliadas con márgenes lisos y bordes superiores ligeramente dentadas.

Las ventajas de cultivo son:

- Por su raíz profunda es muy resistente a las sequías.
- Produce más de 5 veces la cantidad de pasto nativo y de calidad 2 o 3 veces mayor.
- Está bien adaptada al pastoreo directo con ovinos, vacunos y alpacas.
- Posee alto contenido proteico (más de 18%).
- El tiempo de producción en promedio es de 10 años.
- Produce abundante heno de alta calidad.

Las desventajas de cultivo son:

- El costo de la semilla de alfalfa es mayor que otros forrajes.
- Debido a mal manejo, puede ocasionar el timpanismo en los animales.
- En Puno la alfalfa no florece ni da semilla.
- El factor limitante en el cultivo de alfalfa es la acidez y salinidad del suelo.

## 2.2.2 Estimación de la evapotranspiración de referencia

### a. Método de Penman-Monteit

La estimación de la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>), mediante este método se realiza considerando información climatológica mensual de temperatura mínima, temperatura máxima, humedad relativa, velocidad del viento e insolación. Según Allen et al (2006), la ecuación matemática es la siguiente

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(Rn - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} \mu_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34\mu_2)}$$

Donde:

ET<sub>o</sub> : Evapotranspiración de referencia (mm día<sup>-1</sup>)

Δ : Pendiente de la curva de presión de vapor (kPa °C<sup>-1</sup>)

R<sub>n</sub> : Radiación neta en la superficie del cultivo (MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>)

G : Flujo del calor de suelo (MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>)

γ : Constante psicrométrica (kPa °C<sup>-1</sup>)

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<sup>-1</sup>)

e<sub>s</sub> : Presión de vapor de saturación (kPa)

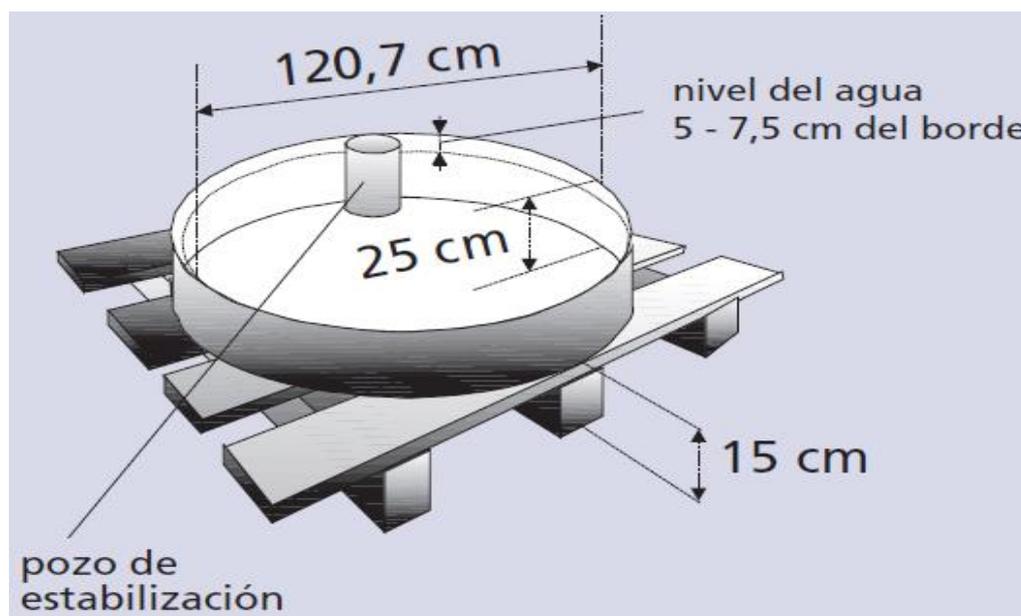
e<sub>a</sub> : Presión real de vapor (kPa)

Este método por su complejidad, requiere de planillas de cálculo o bien del programa llamado CROPWAT, que ha sido elaborado por la Dirección de Fomento de Tierras y Aguas de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación (Allen et al, 2006).

**b. Método de Tanque Evaporímetro Clase A**

El tanque evaporímetro clase A es circular de 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 (Allen et al., 2006).

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 (Allen *et al.*, 2006).



**Figura 1.** Esquema del Tanque evaporímetro clase A.

Fuente: Allen *et al.* (2006).

Según Allen *et al.* (2006), la ecuación que utiliza este método es el siguiente:

$$ET_o = K_p \times E_{pan}$$

Donde:

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

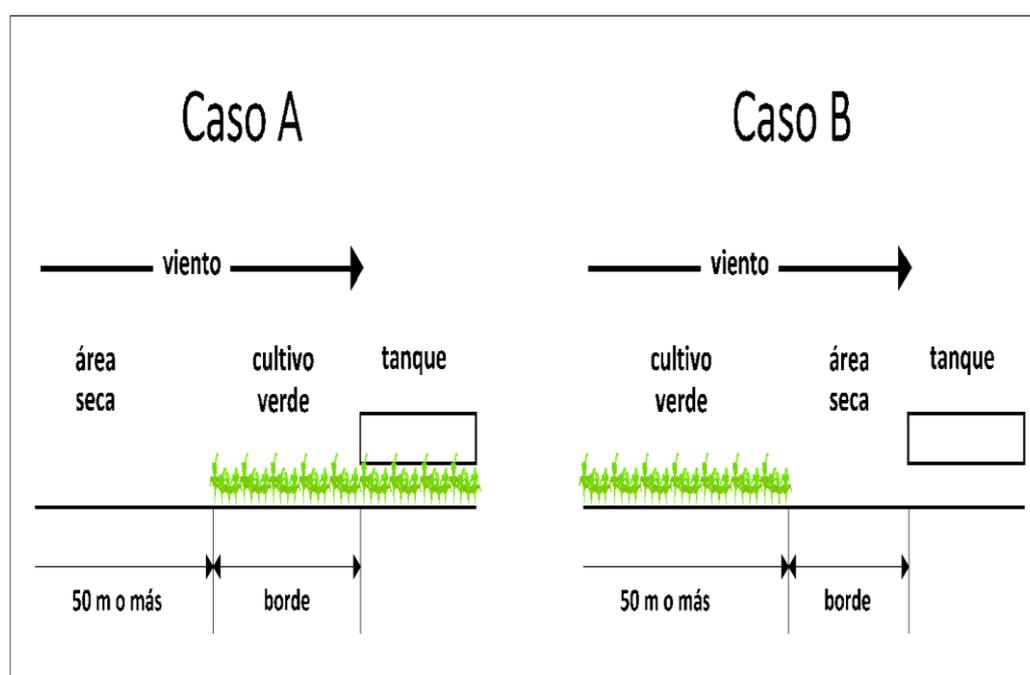
$K_p$  : coeficiente del tanque evaporímetro.

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

Para seleccionar el coeficiente  $K_p$  apropiado para un tanque evaporímetro dado, se debe considerar no solamente el tipo del tanque, sino también 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, dos casos se consideran comúnmente (Allen *et al.*, 2006).

- Caso A en que el tanque evaporímetro se localiza en una zona de pasto corto verde y está rodeado por un suelo en barbecho.
- Caso B en que el tanque evaporímetro se localiza sobre un suelo en barbecho y está rodeado por un cultivo verde, tal como se muestra en la siguiente figura.



**Figura 2.** Dos casos de localización del tanque de evaporación clase A. Fuente: Allen *et al.* (2006).

Los coeficientes ( $K_p$ ) del tanque evaporímetro clase A para diversas localizaciones y ambientes se presenta los valores de velocidad media de viento y de humedad relativa, en la tabla 1 (Allen *et al.*, 2006).

**Cuadro 1.** Coeficiente de tanque evaporímetro clase A.

Viento (Km/d)	Radio de cultivo (m)	CASO A: Tanque situado sobre pasto o cultivo			Radio de suelo desnudos (m)	CASO A: Tanque situado sobre pasto o cultivo		
		Humedad relativa media (%)				Humedad relativa media (%)		
		Bajo < 40	Medio 40-70	Alto > 70		Bajo < 40	Medio 40-70	Alto > 70
Ligero <175 Km/d < 2 m/s	0	0.55	0.65	0.75	0	0.7	0.8	0.85
	10	0.65	0.75	0.85	10	0.6	0.7	0.8
	100	0.7	0.8	0.85	100	0.55	0.65	0.75
	1000	0.75	0.85	0.85	1000	0.5	0.6	0.7
Moderado 175 - 425 Km/d (2 - 5 m/s)	0	0.5	0.6	0.65	0	0.65	0.75	0.8
	10	0.6	0.7	0.75	10	0.55	0.65	0.7
	100	0.65	0.75	0.8	100	0.5	0.6	0.65
	1000	0.7	0.8	0.8	1000	0.45	0.55	0.6
Fuerte 425- 700 Km/d (5- 8) m/s	0	0.45	0.5	0.6	0	0.6	0.65	0.7
	10	0.55	0.6	0.65	10	0.5	0.55	0.65
	100	0.6	0.65	0.7	100	0.45	0.5	0.65
	1000	0.65	0.7	0.75	1000	0.45	0.45	0.55
Muy fuerte >700 Km/d >8 m/s	0	0.4	0.45	0.5	0	0.5	0.6	0.65
	10	0.45	0.55	0.6	10	0.45	0.5	0.55
	100	0.5	0.6	0.65	100	0.4	0.45	0.5
	1000	0.55	0.6	0.65	1000	0.35	0.4	0.45

Fuente: Allen *et al.* (2006)

**c. Método de Hargreaves en base a radiación solar**

Vásquez *et al.*, (2017) indican que para calcular la evapotranspiración potencial o de referencia se emplea la siguiente ecuación:

$$ETP = 0.0075 * RSM * TMF$$

$$RMS = 0.075 * RMM * S^{0.5}$$

$$RMM = Ra * DM$$

$$S = ( n/N ) * 100$$

$$TMF = (5/9) * ^\circ C + 32$$

Donde:

ETP : Evapotranspiración potencial en (mm/mes)

RSM : Radiación solar equivalente en (mm/mes)

RMM : Radiación extra-terrestre equivalente en (mm/mes)

Ra : Radiación extra-terrestre equivalente en mm/día.

DM : Número de días del mes.

S : Porcentaje de horas de sol:

n : Horas de sol promedio del lugar.

N : Horas del sol posible según la latitud..

TMF : Temperatura media mensual en °F

#### d. Método de Hargreaves en base a la temperatura

La ecuación matemática según Vásquez *et al.*, (2017) es el siguiente:

$$ETP = MF * TMF * CH * CE$$

$$TMF = (5/9) * ^\circ C + 32$$

$$CH = 0.166 * (100 - Hr)^{1/2}; \text{ para } Hr > 64\%$$

$$CH = 1 ; \text{ para } Hr < 64\%$$

$$CE = 1.00 + \frac{0.04 * E}{2000}$$

Donde:

ETP : Evapotranspiración potencial (mm/mes).

MF : Factor mensual de latitud

TMF : Temperatura media mensual (°F).

CH : Factor de corrección por la humedad relativa.

Hr : Humedad relativa media mensual (%).

CE : Coeficiente de corrección para la elevación del lugar.

E : Altitud de la zona en estudio (m.s.n.m.).

#### e. **Método de Hargreaves modificado**

La ecuación a utilizar es el siguiente (Vásquez et al., 2017):

$$ETP = 0.0065 * RSM * °F * FA$$

$$RSM = 0.075 * RMM * S^{1/2}$$

$$RMM = RMD * DM$$

$$S = (SM / DLM) * 100$$

$$°F = (5/9) * °C + 32$$

$$FA = 1 + 0.06 * Alt.$$

Donde:

ETP : Evapotranspiración potencial (mm/mes).

RSM : Radiación incidente mensual.

RMM : Radiación mensual extraterrestre.

RMD : Radiación diaria extraterrestre.

DM : Número de días de cada mes.

- S : Porcentaje de horas de sol mensual (%).
- SM : Número medio de horas mensual.
- DLM : Número de horas de sol máxima media mensual.
- DL : N° de horas de sol máxima media diaria.
- °F : Temperatura mensual en grados Fahrenheit.
- °C : Temperatura mensual en grados Centígrados.
- FA : Factor de corrección para la altitud
- Alt : Altitud en km.

#### f. Método de Serruto

Según Flores (2013) la ecuación matemática para calcular la evapotranspiración potencial mediante este método es el siguiente:

$$ETP = 0.003(RS)^{2.5} + 0.16(T)^{0.88}$$

Donde:

ETP : Evapotranspiración potencial, expresada en mm/día

RS : Radiación Solar extra-terrestre expresada en equivalente de evaporación en mm/día

T : Temperatura media mensual, expresada en °C..

## 2.3 MARCO CONCEPTUAL

### 2.3.1 Evaporación

La evaporación, es el proceso por el cual el agua líquida se convierte en vapor de agua (vaporización) y se retira de la superficie evaporante (remoción de vapor). El agua se evapora de una variedad de superficies,

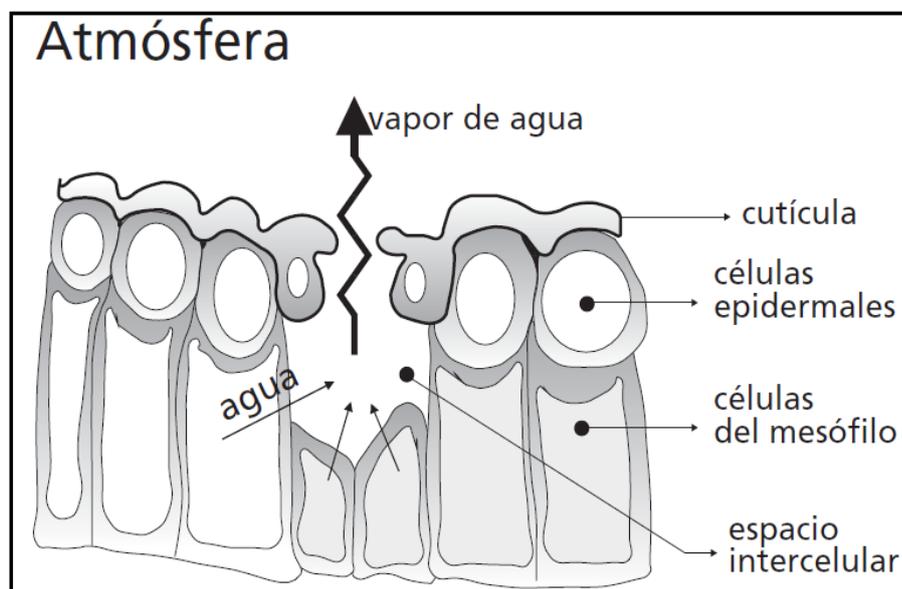
tales como lagos, ríos, caminos, suelos y la vegetación mojada. Para cambiar el estado de las moléculas del agua de líquido a vapor se requiere energía. La radiación solar directa y, en menor grado, la temperatura ambiente del aire, proporcionan esta energía. La fuerza impulsora para retirar el vapor de agua de una superficie evaporante es la diferencia entre la presión del vapor de agua en la superficie evaporante y la presión de vapor de agua de la atmósfera circundante (Allen *et al.* 2006).

Cuando la superficie evaporante es la superficie del suelo, el grado de cobertura del suelo por parte del cultivo y la cantidad de agua disponibles en la superficie evaporante son otros factores que afectan el proceso de la evaporación. Lluvias frecuentes, el riego y el ascenso capilar en un suelo con manto freático poco profundo, mantienen mojada la superficie del suelo. En zonas en las que el suelo es capaz de proveer agua con velocidad suficiente para satisfacer la demanda de la evaporación del suelo, este proceso está determinado solamente por las condiciones meteorológicas (Allen *et al.*, 2006).

### **2.3.2 Transpiración**

La transpiración, consiste en la vaporización del agua líquida contenida en los tejidos de la planta y su posterior remoción hacia la atmósfera. Los cultivos pierden agua predominantemente a través de las estomas. Estos son pequeñas aberturas en la hoja de la planta a través de las cuales atraviesan los gases y el vapor de agua de la planta hacia la atmósfera. El agua, junto con algunos nutrientes, es absorbida por las raíces y transportada a través de la planta. La vaporización ocurre dentro de la hoja, en los espacios intercelulares, y el intercambio del vapor con

la atmósfera es controlado por la abertura estomática. Casi toda el agua absorbida del suelo se pierde por transpiración y solamente una pequeña fracción se convierte en parte de los tejidos vegetales (Allen *et al.*, 2006).



**Figura 3.** Representación esquemática de la Transpiración  
Fuente: Allen *et al.* (2006).

### 2.3.2 Evapotranspiración

Sánchez y Carvacho (2011) afirman que la evapotranspiración (ET) en sus diferentes acepciones es un parámetro clave en el balance de energía del sistema tierra-atmósfera, en la detección de estrés hídrico vegetal, en la predicción del rendimiento de los cultivos, en el cálculo del balance hídrico y en la caracterización climática de las distintas zonas, por nombrar algunos aspectos. Por ello es de interés para múltiples disciplinas. Sin embargo, dada la complejidad del proceso y la diversidad de factores de los que depende, la magnitud e intensidad del fenómeno es difícil de determinar. Ello está demostrado en la profusión y diversidad de los métodos o modelos que se han elaborado, y siguen elaborando aún en la actualidad, para su determinación.

### 2.3.3 Evapotranspiración de referencia

La evapotranspiración potencial o de referencia (ET<sub>o</sub>) se define como la tasa de evapotranspiración de una superficie de referencia, que ocurre sin restricciones de agua. La superficie de referencia corresponde a un cultivo hipotético de pasto con características específicas, las cuales son: una altura asumida de 0,12 m, una resistencia superficial fija de 70 s/m y un albedo de 0,23. También es necesario mencionar que los únicos factores que afectan ET<sub>o</sub> son los parámetros climáticos. Por lo tanto, ET<sub>o</sub> es también un parámetro climático que puede ser calculado a partir de datos meteorológicos. Se obtiene utilizando el método Penman-Monteith o con la evaporación del tanque evaporímetro Clase A (Allen *et al.*, 2006).

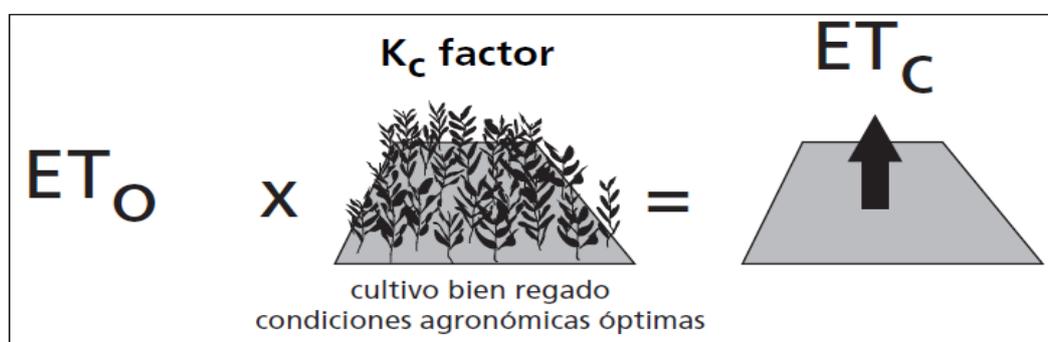


**Figura 4.** Esquema de la evapotranspiración de referencia  
Fuente: Allen *et al.* (2006).

### 2.3.4 Evapotranspiración del cultivo

Se refiere a la evapotranspiración de cualquier cultivo cuando se encuentra exento de enfermedades, con buena fertilización y que se desarrolla en parcelas amplias, bajo óptimas condiciones de suelo y agua, y que alcanza la máxima producción de acuerdo a las condiciones climáticas reinantes. La cantidad de agua requerida para compensar la

pérdida por evapotranspiración del cultivo se define como necesidades de agua del cultivo, por tanto, la necesidad de riego básicamente representa la diferencia entre la necesidad de agua del cultivo y la precipitación efectiva. Las diferencias en la anatomía de las hojas, características de las estomas, las propiedades aerodinámicas, e incluso el albedo, ocasionan que la evapotranspiración del cultivo ( $ET_c$ ) difiera de la evapotranspiración del cultivo de referencia bajo las mismas condiciones climáticas (Allen *et al.*, 2006).



**Figura 5.** Esquema de la Evapotranspiración del cultivo en condiciones óptimas  
Fuente: Allen *et al.* (2006).

### 2.3.5 Necesidades hídricas de los cultivos

Calera *et al.* (2016) mencionan que la disponibilidad de agua en el suelo suele ser el factor limitante en el desarrollo de la cubierta vegetal en condiciones semiáridas típicas del clima mediterráneo. Cuando el contenido en agua de la capa de suelo explorada por las raíces cae por debajo de un cierto valor umbral, la planta no puede extraer agua al ritmo que demanda el sistema planta-atmósfera, y entra en estrés hídrico. La aparición de estrés hídrico causa diferentes efectos sobre el desarrollo de las plantas: valores bajos de estrés causan disminución del crecimiento vegetativo, lo que se traduce en un menor crecimiento

y desarrollo de las hojas. Grados de estrés más elevado causan cierre estomático y si el grado de estrés crece, las hojas pueden morir.

De Santa Olalla *et al.*, (2005) mencionan que la agricultura, a nivel mundial, es la mayor consumidora de agua entre los diferentes usos que el hombre da a este recurso. Como promedio consume cerca del 70%, existiendo, sin embargo, notable diferencia entre continentes para los usos agrícolas, industriales y urbanos.

Chávez (1978) denomina a las necesidades hídricas de los cultivos a la cantidad de agua que necesita un cultivo durante todo su periodo vegetativo para producir determinado peso de materia seca. Dentro de este consumo también se agrega el agua que se evapora del suelo.

FAO (2002a) menciona que en la actualidad el riego por goteo es una técnica con la que se puede poner cualquier cantidad de agua y fertilizante en la zona radicular de la planta en los momentos necesarios. Esto implica que en condiciones rigurosamente controlables es un procedimiento de elevada eficiencia potencial en la aplicación del agua y en su utilización por los vegetales; en condiciones adecuadas y para cultivos apropiados ofrece perspectivas de rendimientos mayores que otros sistemas de riego.

### **2.3.6 Parámetros meteorológicos**

Sánchez y Carvacho (2006) mencionan que la evapotranspiración (ET) depende de numerosos factores meteorológicos, entre ellos la radiación solar como la fuente de energía fundamental para el desarrollo del

proceso, la temperatura del aire como consecuencia de la anterior, la humedad relativa como medida de la capacidad evaporativa del ambiente y de la velocidad del viento que remueve constantemente el agua desde la superficie evaporante y transporta, en ocasiones, calor para mantener activo el proceso; pero, además, depende de las características de la vegetación del área, su tipo, densidad y estado de crecimiento, como también del suelo, sus propiedades y su contenido de humedad.

Jaramillo (2006) indica que las tasas de evaporación están controladas por la radiación solar, la temperatura, el déficit de presión de vapor, el intercambio de humedad del aire entre la superficie y la atmosfera, el tipo de cobertura vegetal, las propiedades físicas y químicas de los suelos, la sanidad del cultivo y, por las practicas que alteran el microclima como son la cobertura vegetal, el sembrío, el riego, las barreras rompe vientos y las distancia de siembra.

## **2.4 ZONAS AGROECOLÓGICAS EN EL PERU**

En la guía de campo de los cultivos andinos elaborado por Tapia y Fries (2007) se encuentra una clasificación en zonas agroecológicas que se basa en la nomenclatura utilizada por Pulgar Vidal y complementada con el conocimiento campesino local, la información sobre la estrecha relación entre el clima (temperatura, humedad, altura), la vegetación natural, los cultivos, las variedades y las prácticas de cultivo. La zonificación agroecológica permite explicar mejor porque existen las variaciones en el uso de la tierra, incluso dentro de una misma comunidad y aclarar las diferencias en producción y productividad de los diversos cultivos andinos.

Según Tapia y Fries (2007), las zonas agroecológicas en el Perú son:

- Yunga: marítima y fluvial.
- Quechua: árida, semiárida y semi húmeda.
- Suni: mayormente en laderas altas; además en el altiplano se diferencian en zona circunlacustre y zona A algo húmedo y B más alejada, con mayor número de días con heladas.
- Puna seca y semihúmeda en el sur del Perú y
- Jalca en el norte: es zona límite hasta donde se puede cultivar; Janka: pastizales para ganadería de camélidos.

La zona Yunga puede subdividirse en la Yunga marítima con la exposición de los terrenos hacia el Océano Pacífico y la Yunga fluvial mirando hacia la Amazonia. La Yunga marítima se ubica entre los 500 y 2 500 msnm, se caracteriza por ser la región donde el sol brilla durante casi todo el año y hay escasas lluvias. Tiene dos tipos de paisajes: el de las llanuras o fondo de valles y el de las laderas de quebradas con escasa vegetación y expuestas a problemas de erosión (Tapia y Fries, 2007).

La zona Quechua se define como una zona de clima templado ubicada entre los 2 300 a 3 500 msnm, variando según la latitud, es decir según la distancia hasta la línea ecuatorial por ejemplo, Cajamarca se encuentra muy cerca y el sur de Bolivia está alejado de la línea ecuatorial, lo que influye en la humedad y las temperaturas. Estas últimas pueden fluctuar entre una temperatura media anual de 11 a 16° C, con máximas entre 22 y 29° C y mínimas entre 7 y 4° C durante el invierno (mayo a agosto); los índices de humedad se sitúan entre 500 a 1200 mm de precipitación, aumentando de sur a norte. Estas condiciones permiten diferenciar la zona Quechua en zonas agroecológicas de Quechua árida,

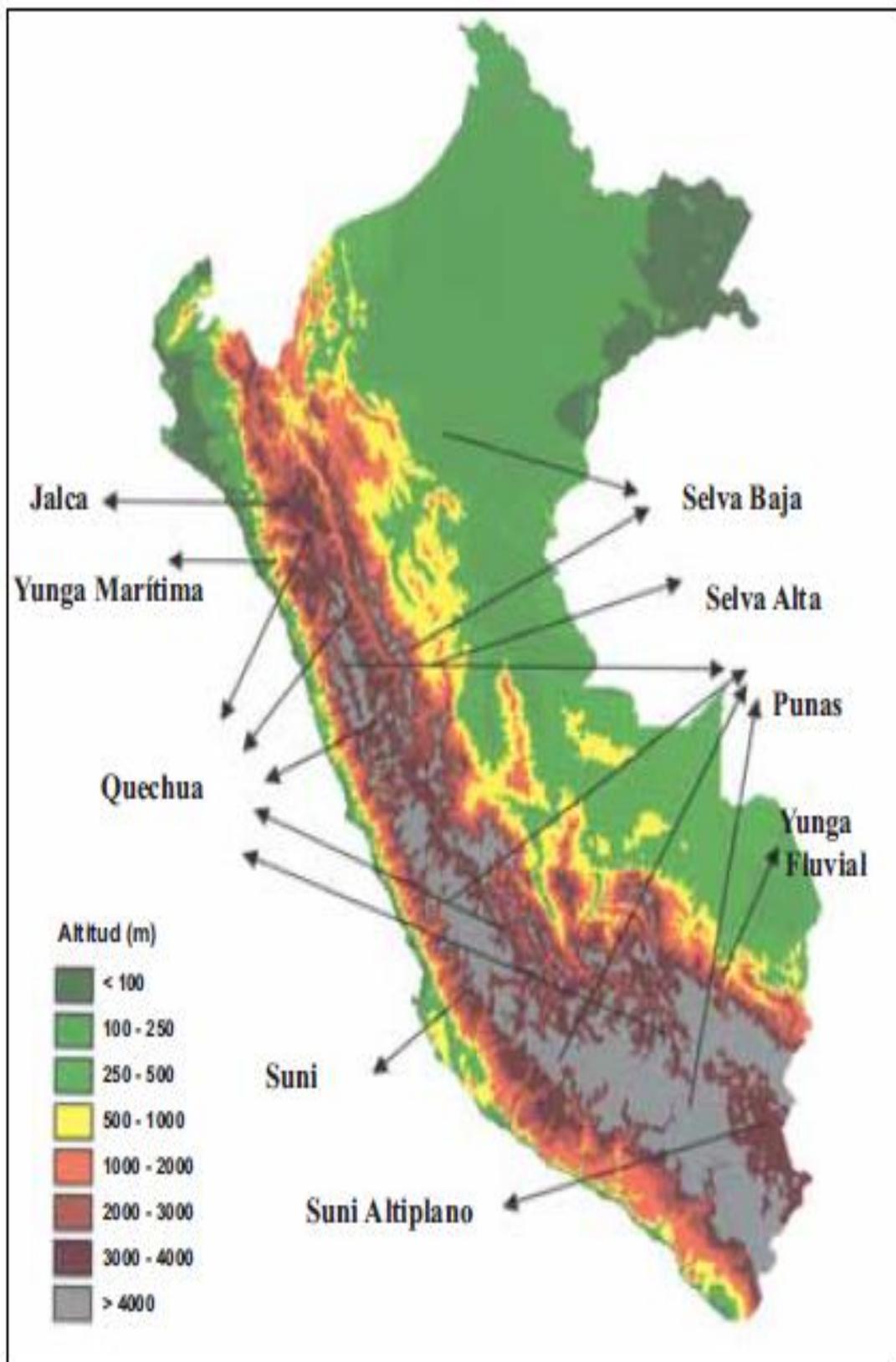
semiárida y semihúmeda, pudiéndose cultivar tanto especies de climas secos como pastos cultivados bajo riego. El cultivo característico de la zona Quechua es el maíz en toda su gran variabilidad, acompañado por las cucurbitáceas (calabazas *Cucurbita moschata*, caihua *Cyclanthera pedata*, zapallo *Cucurbita maxima*), granos (quinua de valle y kiwicha) y la vegetación natural representada por el pajuro (*Erythrina edulis*). Muchas de las parcelas se encuentran en terrazas o andenes, de construcción prehispánica (Tapia y Fries, 2007).

La zona Suni se ubica entre los 3 400 y 3 800 msnm. Suni es palabra quechua que significa “largo, alto”. Se extiende en las laderas (algunas acondicionadas en terrazas) de todos los valles interandinos, encima de la zona Quechua. El clima es más bien frío, con precipitaciones que varían desde 600 hasta más de 1 200 mm según los años. Una zona diferenciada es la Suni altiplano que circunda tanto el lago de Sunin o Junín, como el lago Titicaca en Puno y Bolivia (Tapia y Fries, 2007).

El altiplano alrededor del lago Titicaca puede diferenciarse en:

- Una zona alrededor del mismo lago, denominada zona Suni circunlacustre con un clima algo benigno y
- El altiplano norte más húmedo, diferenciado en una zona Suni A o de relativa influencia del lago y una zona Suni B más alejada, con mayor número de noches con heladas.

Los cultivos típicos de Suni son la papa y los tubérculos andinos, la quinua, el tarwi y especies introducidas como el trigo, la cebada y arveja (Tapia y Fried, 2007).



**Figura 6.** Mapa altitudinal y de zonas agroecológicas del Perú  
Fuente: Tapia y Fries (2007)

## 2.5 CUENCA HIDROGRÁFICA

Faustino (2006) define a la cuenca hidrográfica como un ecosistema en el cual interactúan y se interrelacionan variables biofísicas y socioeconómicas que funcionan como un todo, con entradas y salidas, límites definidos, estructura interna de subsistemas jerarquizados (por ejemplo en el sistema biofísico: los subsistemas biológicos y físicos). En este sistema ocurren entradas como la energía solar, hídrica, eólica y gases como el CO<sub>2</sub>, además ingresan insumos como semillas, alimentos, tecnologías y otros, ambos dan origen a procesos como el flujo de energía, ciclo de nutrientes, ciclo hidrológico, erosión y actividades productivas.

Las cuencas hidrográficas se reconocen como un sistema debido a la existencia de interacciones entre el sistema natural del suelo, el agua y biodiversidad y el sistema socioeconómico, que si bien éste no tiene un límite físico, sí depende de la oferta, calidad y disposición de los recursos (Faustino, 2006).

Villon (2002) menciona que la cuenca de drenaje de una corriente, es el área de terreno donde todas las aguas caídas por precipitación, se unen para formar un solo curso de agua. La delimitación de una cuenca, se hace sobre un plano o mapa a curvas de nivel siguiendo las líneas de divortium acuarum (parteaguas), la cual es una línea imaginaria, que divide a las cuencas adyacentes y distribuye el escurrimiento originado por la precipitación, que en cada sistema de corriente, fluye hacia el punto de salida de la cuenca.

Vásquez (2000) define a la cuenca hidrográfica como el área o unidad de territorio, delimitada por una divisoria topográfica (divortium aquarum), que capta la precipitación y drena el agua de escorrentía hasta un colector común,

denominado río principal. La cuenca hidrográfica es un ámbito geográfico natural donde ocurre el ciclo hidrológico; es el área drenada hacia un río, identificado por su topografía y delimitada por su divisoria de las aguas; en un sentido amplio incluye el agua, suelo, aire, la luz solar, la flora y la fauna.

Aparicio (1992) denomina a la cuenca hidrográfica al área territorial de drenaje natural donde todas las aguas pluviales confluyen hacia un colector común de descarga. Los límites de una cuenca están determinados por la línea de “divortium aquarum” o divisoria de aguas.

## CAPÍTULO III

### METODOLOGÍA

#### 3.1 UBICACIÓN DE LA ZONA EN ESTUDIO

La ubicación política del ámbito en estudio es:

País : Perú

Región : Puno.

Provincias : Azángaro, Carabaya, Chucuto, El Collao, Huancané, Lampa, Melgar, Puno, San Antonio de Putina, San Pedro de Moho, San Román y Yunguyo.

Ubicación geográfica por cuencas hidrográficas son:

Cuenca del río Ramis en coordenadas UTM (WGS84)

- Norte : 8'445,867.41 – 8'289,725.28

- Este : 454,221 – 272,732.8

- Altitud : 3,800 - 5,334 m.s.n.m.

Cuenca del río Huancané en coordenadas UTM (WGS84)

- Norte : 8'301,965 – 8'397,410

- Este : 376,030 – 468,557
- Altitud : 3,806 – 5,100 m.s.n.m

Cuenca del río Coata en coordenadas UTM (WGS84)

- Norte : 8'328,509 – 8'239,696
- Este : 282,907 – 401,525
- Altitud : 3,800 - 5,300 m.s.n.m.

Cuenca del río llave en coordenadas UTM (WGS84)

- Este : 352,353.0 – 452,052.0
- Norte : 8'104,770.0 – 8'248,751.0
- Altitud : 3,805.00 – 5,400.00 m.s.n.m.

La ubicación hidrográfica es:

Sistema : Titicaca-Desaguadero-Poopó-Salar de Coipasa.

Vertiente : Lago Titicaca.

Cuencas : Ríos Ramis, Huancané, Coata e llave.

En la figura 7, se muestra la ubicación del ámbito en estudio, cuenca de la vertiente del lago Titicaca, lado peruano.



### 3.2 INFORMACIÓN METEOROLÓGICA

La variable a estudiar es la evapotranspiración de los cultivos papa, quinua y alfalfa; para su determinación la población a considerar son 30 estaciones meteorológicas ubicadas en el ámbito de la cuenca del lago Titicaca, lado peruano. La muestra a considerar por estación meteorológica es de 30 años de registros históricos.

La información meteorológica es obtenida del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) Puno y del Ministerio de Agricultura, Autoridad Local del Agua. Se emplea información de temperatura máxima, temperatura mínima, humedad relativa, velocidad del viento, insolación y evaporación de las siguientes estaciones meteorológicas: Ananea, Arapa, Azángaro, Cabanillas, Capachica, Capazo, Chuquibambilla, Cojata, Crucero, Desaguadero, Huancané, Huaraya Moho, Ilave, Juli, Lampa, Llalli, Macusani, Mañazo, Mazocruz, Muñani, Pampahuta, Pizacoma, Progreso, Pucara, Puno, Putina, Santa Lucía, Santa Rosa, Taraco y Yunguyo, todas ellas son estaciones de tipo climatológica ordinaria (CO).

La ubicación política y geográfica de las estaciones meteorológicas consideradas, se presenta en la cuadro 2 y en la figura 7.

**Cuadro 2.** Ubicación Política y geográfica de las estaciones meteorológicas.

Estación	Ubicación			Coordenadas		
	Región	Provincia	Distrito	Long.	Lat.	Altitud
Ananea	Puno	San Antonio de Putina	Ananea	14.67844	69.53425	4660
Arapa	Puno	Azángaro	Arapa	15.13625	70.11822	3830
Azangaro	Puno	Azángaro	Azángaro	14.91436	70.19075	3863
Cabanillas	Puno	San Roman	Cabanillas	15.65000	70.36667	3892
Capachica	Puno	Puno	Capachica	15.61556	69.84400	3933
Capazo	Puno	El Collao	Capazo	17.18772	69.73550	4530
Chuquibambilla	Puno	Melgar	Umachiri	14.78478	70.71569	3971
Cojata	Puno	Huancané	Cojata	15.02542	69.36369	4380
Crucero	Puno	Carabaya	Crucero	14.36419	70.02592	4183
Desaguadero	Puno	Chucuito	Desaguadero	16.56335	69.03883	3860
Huancané	Puno	Huancané	Huancané	15.20150	69.75356	3890
Huaraya Moho	Puno	Moho	Moho	15.38828	69.48428	3890
Ilave	Puno	El Collao	Ilave	16.08825	69.64500	3880
Juli	Puno	Chucuito	Juli	16.20378	69.45992	3812
Lampa	Puno	Lampa	Lampa	15.36116	70.37420	3892
Llally	Puno	Melgar	Llally	14.93700	70.88600	3980
Macusani	Puno	Carabaya	Macusani	14.06819	70.42377	4341
Mañazo	Puno	Puno	Mañazo	14.80005	70.06658	3920
Mazocruz	Puno	Chucuito	Mazocruz	16.74011	69.70608	4003
Muñani	Puno	Azángaro	Muñani	14.76694	69.95181	3948
Pampahuta	Puno	Lampa	Paratia	15.48353	70.67578	4400
Pizacoma	Puno	Chucuito	Pizacoma	16.90703	69.36856	4060
Progreso	Puno	Azángaro	Asillo	14.69011	70.35686	3980
Pucara	Puno	Lampa	Pucara	15.04506	70.36664	3900
Puno	Puno	Puno	Puno	15.82625	70.01208	3820
Putina	Puno	Putina	Putina	14.92097	69.86772	3878
Santa Lucia	Puno	Lampa	Santa Lucia	15.70000	70.60000	4050
Santa Rosa	Puno	Melgar	Santa Rosa	14.62375	70.78653	3986
Taraco	Puno	Huancané	Taraco	15.31958	69.96974	3890
Yunguyo	Puno	Yunguyo	Yunguyo	16.30783	69.07472	3820

Fuente. (SENAMHI, 2016)

### 3.3 MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA

#### 3.3.1 Métodos directos

##### **Lisímetros.**

Un lisímetro es un dispositivo introducido en el suelo, relleno con el mismo terreno del lugar y con vegetación. Es utilizado para medir la evapotranspiración del cultivo (ET<sub>c</sub>). También se denomina evapotranspirómetro dependiendo de qué manera se ha hecho el procedimiento de medida (Vásquez *et al.*, 2017).

La medida de la evapotranspiración es determinada por el balance hídrico de los dispositivos. Normalmente hay una balanza en el fondo del lisímetro donde se puede determinar la cantidad de agua que se va evapotranspirando en el sistema. Otro tipo de lisímetro utiliza en lugar de una balanza un sistema de drenaje del agua donde la cantidad drenada de la misma equivale exactamente a la cantidad de agua evapotranspirada que es igual a la capacidad de campo (Guevara y Cartaya, 2004).

Según Guevara y Cartaya (2004), la ecuación del balance hídrico es:

$$P + R = ET_o + D \pm \Delta w$$

Donde:

P : Precipitación.

R : Riego.

D : Masa de suelo.

$\Delta w$  : Variación del contenido de agua.

### 3.3.2 Métodos indirectos

La descripción de cada uno de los métodos y los procedimientos para el cálculo de la evapotranspiración potencial o de referencia, se presentan a continuación:

#### a. Penman-Monteith

Según Allen *et al.* (2006), este método fue estandarizado por investigadores de la FAO para el cálculo de la evapotranspiración de referencia de tal manera de uniformizar los diferentes métodos que existen para determinar la ETo. Fue desarrollado haciendo uso de la definición del cultivo de referencia que es un cultivo hipotético con una altura asumida de 0.12 m, con una resistencia superficial de 70 s/m y un albedo de 0.23, que representa a la evapotranspiración de una superficie extensa de pasto verde de altura uniforme, creciendo activamente y adecuadamente regado.

El cultivo o superficie de referencia fue introducido para obviar la necesidad de definir los parámetros únicos de evaporación para cada cultivo y etapa de crecimiento del mismo. El cultivo de referencia es algún tipo de pasto, como la alfalfa, que es un cultivo muy bien estudiado con respecto a sus características aerodinámicas y superficiales y es aceptado ampliamente como superficie de referencia (Allen *et al.*, 2006).

Según Allen *et al.* (2006), la ecuación de Penman-Monteith para determinar la evapotranspiración de referencia es:

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(Rn - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} \mu_2 (e_e - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34\mu_2)}$$

Donde:

- ET<sub>o</sub> : Evapotranspiración de referencia (mm día<sup>-1</sup>)
- Δ : Pendiente de la curva de presión de vapor (kPa °C<sup>-1</sup>)
- R<sub>n</sub> : Radiación neta en la superficie del cultivo (MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>)
- G : Flujo del calor de suelo (MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>)
- γ : Constante psicrométrica (kPa °C<sup>-1</sup>)
- 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<sup>-1</sup>)
- e<sub>s</sub> : Presión de vapor de saturación (kPa)
- e<sub>a</sub> : Presión real de vapor (kPa)

La ecuación de Penman-Monteith es una representación clara, precisa y simple de los factores físicos - fisiológicos que gobiernan el proceso de la evapotranspiración. La ecuación utiliza datos climáticos de radiación solar, temperatura del aire, humedad y velocidad del viento. Para asegurar la precisión del cálculo, los datos climáticos deben ser medidos o ser convertidos a 2 m de altura, sobre una superficie extensa de pasto verde, cubriendo completamente el suelo y sin limitaciones de agua (Allen *et al.*, 2006).

#### **b. Método del tanque Evaporímetro**

La evaporación de una superficie libre de agua, proporciona un índice del efecto integrado de la radiación, la temperatura del aire, la humedad del aire y del viento en la evapotranspiración. Sin embargo, diferencias entre

la superficie de agua y las superficies cultivadas producen diferencias significativas entre la pérdida de agua de una superficie libre de agua y una superficie cultivada. El tanque ha probado su valor práctico y ha sido utilizado con éxito para estimar la evapotranspiración de referencia observando la pérdida por evaporación de una superficie de agua y aplicando coeficientes empíricos para relacionar la evaporación del tanque con  $E_{To}$  (Allen *et al.*, 2006).

Según Allen *et al.* (2006), la evaporación del tanque está relacionada con la evapotranspiración de referencia por un coeficiente empírico derivado del mismo tanque, cuya ecuación es el siguiente:

$$E_{To} = K_p E_{pan}$$

Donde:

$E_{To}$  : evapotranspiración de referencia (mm/día),

$K_p$  : coeficiente del tanque evaporímetro,

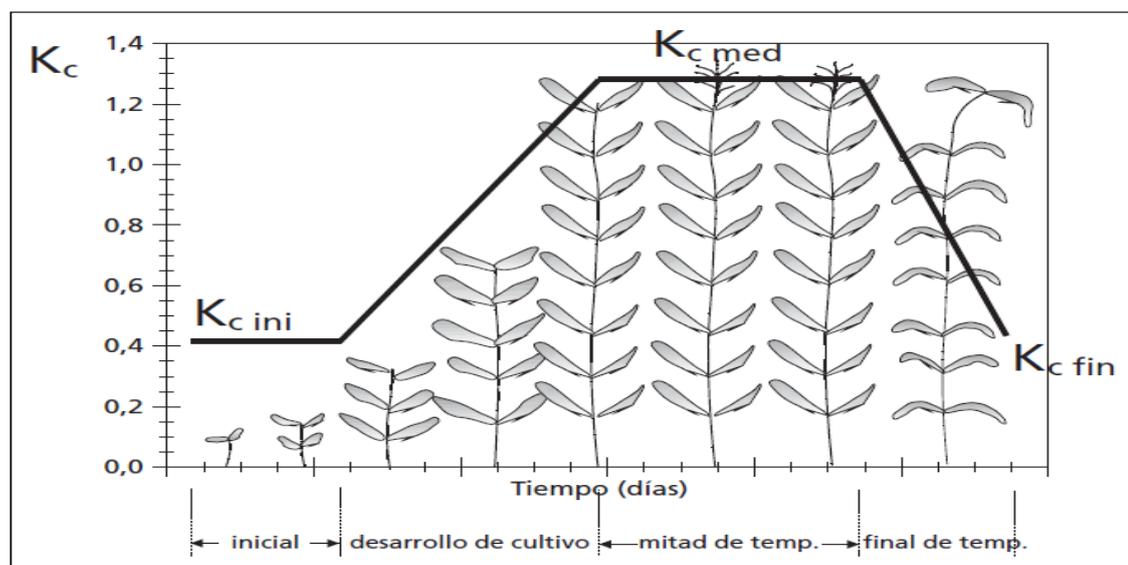
$E_{pan}$  : evaporación del tanque evaporímetro Clase A (mm/día).

### 3.4 COEFICIENTE DE CULTIVO

Se define al coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) como un factor que refleja aspectos biológicos, propios del cada cultivo. Dentro de estos factores se encuentra, la altura de las plantas, el comportamiento estomático, el área foliar, y el sistema de conducción. Estos dos últimos factores se reflejan en el porcentaje de cobertura que produce el cultivo, que es una imagen del grado de intercepción de radiación solar que realiza la planta. Se puede determinar los coeficientes de cultivos ( $K_c$ ) dividiendo la evapotranspiración del cultivo ( $E_{Tc}$ ), proporcionada

por los lisímetros, por la evapotranspiración de referencia ( $ET_o$ ) obtenida del tanque evaporímetro o de la ecuación Penman – Monteith (Requena *et al.*, 2010).

Se trata de un coeficiente que indica el grado de desarrollo o cobertura del suelo por el cultivo del cual se busca evaluar su consumo de agua. Se combinan los efectos de la transpiración del cultivo y de la evaporación del suelo en un coeficiente único  $K_c$ , tal que integre las diferencias en la evaporación en el suelo y en la tasa de transpiración del cultivo, entre el cultivo y la superficie del pasto de referencia. Es una expresión del efecto promedio en el tiempo de la evapotranspiración del cultivo. Los valores de coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) para diferentes cultivos se encuentran tabulados y se presentan en la publicación de la FAO N° 56 (Allen *et al.*, 2006).



**Figura 8.** Curva generalizada del coeficiente del cultivo ( $K_c$ ).

Fuente. Allen *et al.*, 2006.

Doorenbos y Pruitt (1976), mencionan que el coeficiente del cultivo  $K_c$ , es la relación entre la evapotranspiración del cultivo ( $ET_c$ ), y la evapotranspiración del cultivo de referencia ( $ET_o$ ), cuando ambas se dan en grandes campos en condiciones de crecimiento óptimas. El valor del coeficiente de cultivo depende

de las características de la planta, y expresa la variación de su capacidad para extraer el agua del suelo durante su período vegetativo. Esta variación es más evidente en cultivos anuales, que cubren todo su ciclo en un período reducido de tiempo.

Alcántara (1986) reporta que los factores que afectan los valores de  $K_c$  son: la característica del cultivo, como la fecha de siembra, ritmo de desarrollo del cultivo, duración del período vegetativo, condiciones climáticas y la frecuencia de lluvia o riego especialmente durante la primera fase de crecimiento.

Vásquez *et al.*, (2017) mencionan que el coeficiente de cultivo, es un factor que indica el grado de desarrollo o cobertura del suelo por el cultivo del cual se requiere evaluar su consumo de agua. Dentro de los factores que determinan a los valores de  $K_c$  tenemos las características del cultivo, fecha de siembra, ritmo de desarrollo del cultivo, duración del periodo vegetativo, condiciones climáticas y la frecuencia de riego. El coeficiente  $K_c$  de cada cultivo tendrá una variación estacional en función de las fases de desarrollo del cultivo, que son:

**Fase 1, Fase inicial:** Comprende el periodo de germinación y crecimiento inicial cuando la superficie del suelo está cubierta apenas o nada por el cultivo, desde la siembra hasta el 10% de cobertura vegetal.

**Fase 2, Fase de desarrollo del cultivo:** Comprende desde el final de la fase inicial hasta que se llega a una cubierta sombreada efectiva completa del orden de 70 – 80%

**Fase 3, Fase de mediados del periodo (Maduración):** Compreendida desde que se obtiene la cubierta sombreada efectiva completa hasta el momento de iniciarse la maduración que se hace evidente por la decoloración o caída de hojas.

**Fase 4, Fase final del periodo vegetativo (cosecha):** Comprende desde el final de la fase anterior hasta que llega a la plena maduración o cosecha.

Benítez (1998) menciona que el coeficiente de cultivo es un factor que indica el grado de desarrollo de un cultivo y está relacionado con la cobertura del suelo del mismo, que es la que va a influenciar la evapotranspiración. El coeficiente de cultivo está afectado por el tipo de cultivo, fecha de siembra, etapa de crecimiento y duración del ciclo vegetativo.

### 3.5 ESTIMACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DE CULTIVO

Según Allen *et al* (2006), la evapotranspiración del cultivo (ET<sub>c</sub>) se calcula como el producto de la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET<sub>o</sub>) y el coeficiente del cultivo (K<sub>c</sub>):

$$ET_c = K_c \times ET_o$$

Donde:

ET<sub>c</sub> : evapotranspiración del cultivo (mm/mes),

K<sub>c</sub> : coeficiente del cultivo (adimensional),

ET<sub>o</sub> : evapotranspiración del cultivo de referencia (mm/mes).

#### a. Evapotranspiración de referencia

Para la investigación, la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>), se va a considerar las estimaciones mediante los métodos de Penman-Monteith y tanque clase A.

#### b. Coeficiente de cultivo K<sub>c</sub>.

Los valores de coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) para los cultivos de papa, quinua y alfalfa, se encuentran tabulados y se presentan en la publicación de la FAO N° 56 (Allen *et al.*, 2006).

Según Allen *et al.* (2006), el procedimiento para la determinación del factor  $K_c$  del cultivo es el siguiente:

- Se define el cultivo a establecer.
- Se determina el período vegetativo y la duración de cada etapa de desarrollo del cultivo: inicial, desarrollo, maduración y cosecha.
- Se determina el valor de  $K_c$  para la etapa inicial del cultivo, mediante el gráfico que relaciona frecuencia de riego y evapotranspiración potencial (ETP). Para ello, se asume una frecuencia de riego práctica de acuerdo al cultivo y zona donde se trabaja.
- Se determina el valor de  $K_c$  para las etapas de maduración y cosecha en base a los cuadros que relacionan el valor de  $K_c$  con los valores de humedad relativa y velocidad del viento.
- Se construye la curva  $K_c$ , relacionando los valores de  $K_c$  y las etapas de desarrollo del cultivo. El ploteo se efectúa de la siguiente manera:
  - El valor de  $K_c$  para la etapa inicial, corresponderá para la parte final de dicha etapa.
  - El valor de  $K_c$  para la etapa de maduración, corresponderá a toda la etapa.
  - El valor de  $K_c$  para la etapa de cosecha, corresponderá a la parte final de dicha etapa.

- Unir mediante líneas rectas los valores de Kc, de la parte final de la etapa inicial con el inicio de la etapa de maduración y la parte final de la etapa de maduración con la parte final la de la etapa de cosecha.
- Trazar la curva suavizada y representativa. La curva trazada constituirá la curva Kc del cultivo que se analiza.

### 3.6 . ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Según Villón (2002), con la finalidad de comparar los resultados de la estimación de la evapotranspiración de referencia mediante los métodos de Penman-Monteith y tanque clase A, se va a realizar la prueba estadística T de Student, cuyo procedimiento es el siguiente:

- a. Establecer la hipótesis planteada y la alterna y nivel de significancia:

$$H_p: \mu_1 = \mu_2 \quad (\text{media poblacional})$$

$$H_a: \mu_1 \neq \mu_2$$

$$\alpha = 0.05$$

- b. Desviación estándar de las diferencias de promedio ( $S_d$ ):

$$S_d = S_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}$$

- c. Desviación estándar ponderada ( $S_p$ ):

$$S_p = \sqrt{\frac{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2}}$$

- a. Cálculo del Tc según la siguiente ecuación:

$$T_c = \frac{(\bar{X}_1 - \bar{X}_2) - (\mu_1 - \mu_2)}{S_d}$$

b. Hallar el valor de  $T_t$  en las tablas; ingresar con:

$$\alpha = 0.05 \text{ y}$$

$$\text{G.L.} = n_1 + n_2 - 2$$

Donde:

G.L.: Grados de libertad

$\alpha$  : Nivel de significación-<sup>o</sup>

c. Conclusiones

Si  $|T_c| \leq T_t$  (95%)  $\rightarrow$  No hay diferencias.

Si  $|T_c| > T_t$  (95%)  $\rightarrow$  Hay diferencias significativas.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1 DE LA INFORMACIÓN METEOROLÓGICA

La información mensual de temperatura máxima, temperatura mínima, humedad relativa, velocidad del viento e insolación de las estaciones meteorológicas: Ananea, Arapa, Azangaro, Cabanillas, Capachica, Capazo, Chuquibambilla, Cojata, Crucero, Desaguadero, Huancané, Huaraya Moho, llave, Juli, Lampa, Llalli, Macusani, Mañazo, Mazocruz, Muñani, Pampahuta, Pizacoma, Progreso, Pucara, Puno, Putina, Santa Lucia, Santa Rosa, Taraco y Yunguyo, se presenta en las tablas del 1 al 30 del Anexo A y la información meteorológica promedio de la temperatura mínima, humedad relativa, velocidad del viento e insolación de las 30 estaciones estudiadas, se presenta en la tabla 3, y su respectiva gráfica en la figura 9 en ella se puede apreciar que las estaciones en riesgo de producción para los cultivos papa y quinua son Ananea, Capazo, Cojata, Crucero, Macusani Pampahuta, Santa Lucia en dichas estaciones las temperaturas mínimas es igual o menor a  $-2.5^{\circ}\text{C}$  que afectan el nivel foliar y los rendimientos en el cultivo de la papa Pino, M.T., Chen, T.H.,

(2016), en las estaciones Chuquibambilla Lampa, Llalli, Pizacoma Pucará, y Taraco los riesgos del cultivo de papa es menor porque las temperaturas mínimas promedios de los meses de junio, julio agosto son bastante bajas; concentradas en los meses indicados, mientras que en las estaciones de Arapa, Azangaro, Cabanilla, Cpachica, Desaguadero, Huancane, Moho, llave, Juli, Mañazo, Muñi, Progreso, Puno, Putina, Sta Rosa, y Yunguyo son zonas recomendadas para el cultivo de la papa por que las temperaturas mínimas promedias son soportables para este cultivo.

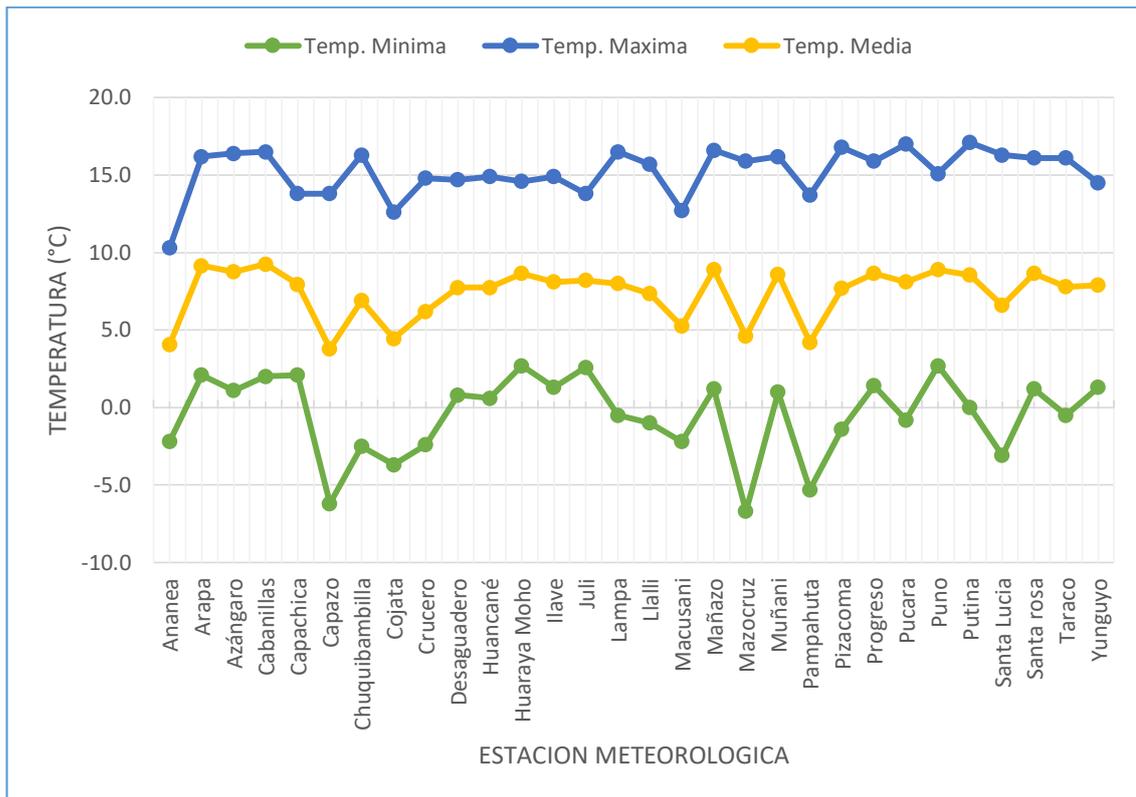
El cultivo de la quinua puede soportar como temperatura mínima límite de  $-5^{\circ}\text{C}$  Tacon, Vacher y Eldin, (1991), es posible sembrar en la mayor parte de la cuenca del lago Titicaca, menos en Capazo, Mazocruz y Pampahuta donde la temperaturas son menores del límite mencionado

La variación de la humedad relativa en el ámbito en estudio es de 44 a 82 %, que corresponden a las estaciones Pizacoma y Ananea, respectivamente y la humedad relativa promedio es de 61.1 %. En la figura 10, se aprecia la variación mensual de la humedad relativa en el ámbito en estudio., la humedad relativa moderada es de 60 a 70 % es un factor de éxito para el cultivo de la papa Amagua, J.M. (2013), lo que indica que las áreas recomendadas para este cultivo se encuentran en este rango de porcentaje de humedad relativa y la quinua crece sin mayores inconvenientes desde el 40% en el altiplano, en la costa hasta el 100 % de humedad relativa Mujica, Canahua y Saravia, (2001)

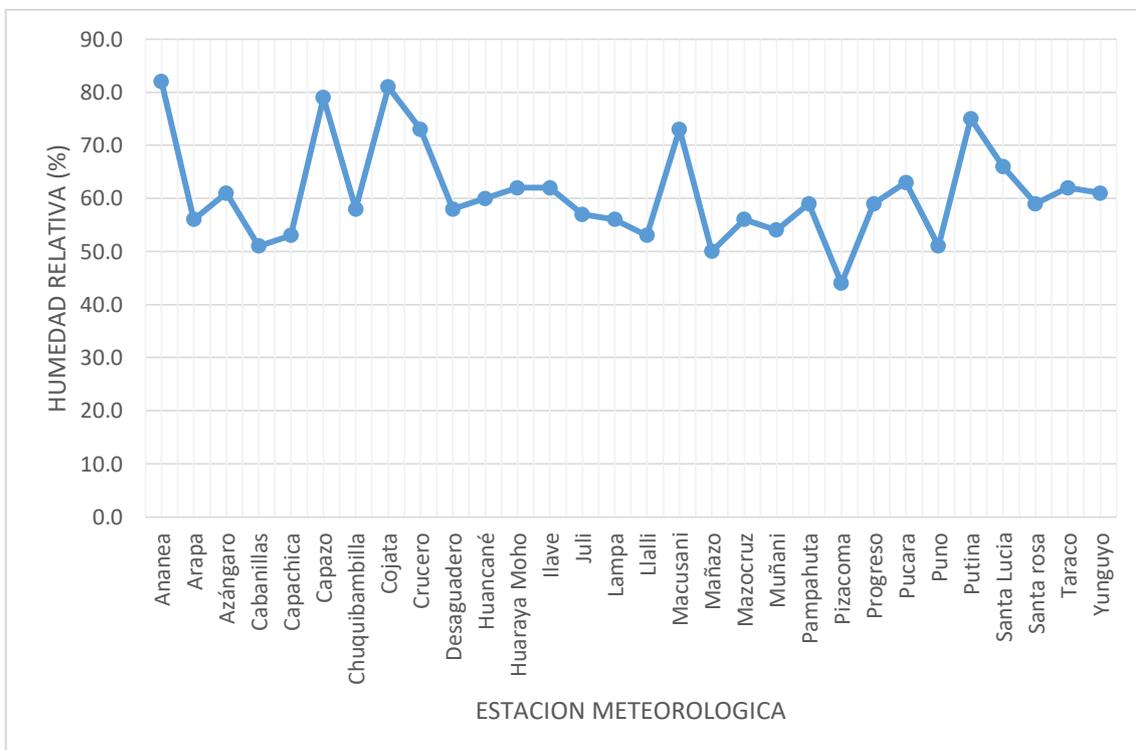
**Cuadro 3.** Información meteorológica promedio anual en el ámbito del estudio.

ESTACION	Temp. mín	Temp. max	Temp. media	Humedad relativa	Velocidad viento	Insolación
	°C	°C	°C	%	m/s	hr/d
Mazocruz	-6.7	15.9	4.6	56.0	2.0	7.9
Capazo	-6.2	13.8	3.8	79.0	2.3	7.0
Pampahuta	-5.3	13.7	4.2	59.0	2.5	8.2
Cojata	-3.7	12.6	4.5	81.0	2.9	7.8
Santa Lucia	-3.1	16.3	6.6	66.0	3.0	8.2
Chuquibambilla	-2.5	16.3	6.9	58.0	2.0	7.2
Crucero	-2.4	14.8	6.2	73.0	1.5	6.4
Ananea	-2.2	10.3	4.1	82.0	2.1	6.4
Macusani	-2.2	12.7	5.3	73.0	3.1	6.4
Pizacoma	-1.4	16.8	7.7	44.0	3.6	7.8
Llalli	-1.0	15.7	7.4	53.0	2.0	8.1
Pucara	-0.8	17.0	8.1	63.0	2.4	7.1
Lampa	-0.5	16.5	8.0	56.0	2.2	8.2
Taraco	-0.5	16.1	7.8	62.0	2.8	7.7
Putina	0.0	17.1	8.6	75.0	2.7	7.1
Huancané	0.6	14.9	7.8	60.0	2.9	7.8
Desaguadero	0.8	14.7	7.8	58.0	4.4	8.0
Muñani	1.0	16.2	8.6	54.0	3.0	7.1
Azángaro	1.1	16.4	8.8	61.0	2.4	7.1
Mañazo	1.2	16.6	8.9	50.0	1.7	8.2
Santa rosa	1.2	16.1	8.7	59.0	2.8	7.2
Ilave	1.3	14.9	8.1	62.0	3.1	8.2
Yunguyo	1.3	14.5	7.9	61.0	1.9	8.0
Progreso	1.4	15.9	8.7	59.0	2.6	7.1
Cabanillas	2.0	16.5	9.3	51.0	1.9	7.9
Arapa	2.1	16.2	9.2	56.0	3.1	7.8
Capachica	2.1	13.8	8.0	53.0	3.5	8.2
Juli	2.6	13.8	8.2	57.0	2.7	8.5
Huaraya Moho	2.7	14.6	8.7	62.0	1.9	7.8
Puno	2.7	15.1	8.9	51.0	2.8	8.2
<b>Promedio</b>	<b>-0.5</b>	<b>15.2</b>	<b>7.4</b>	<b>61.1</b>	<b>2.6</b>	<b>7.6</b>
Mínimo	-6.7	10.3	3.8	44.0	1.5	6.4
Máximo	2.7	17.1	9.3	82.0	4.4	8.5

Fuente: SENAMHI-PUNO.

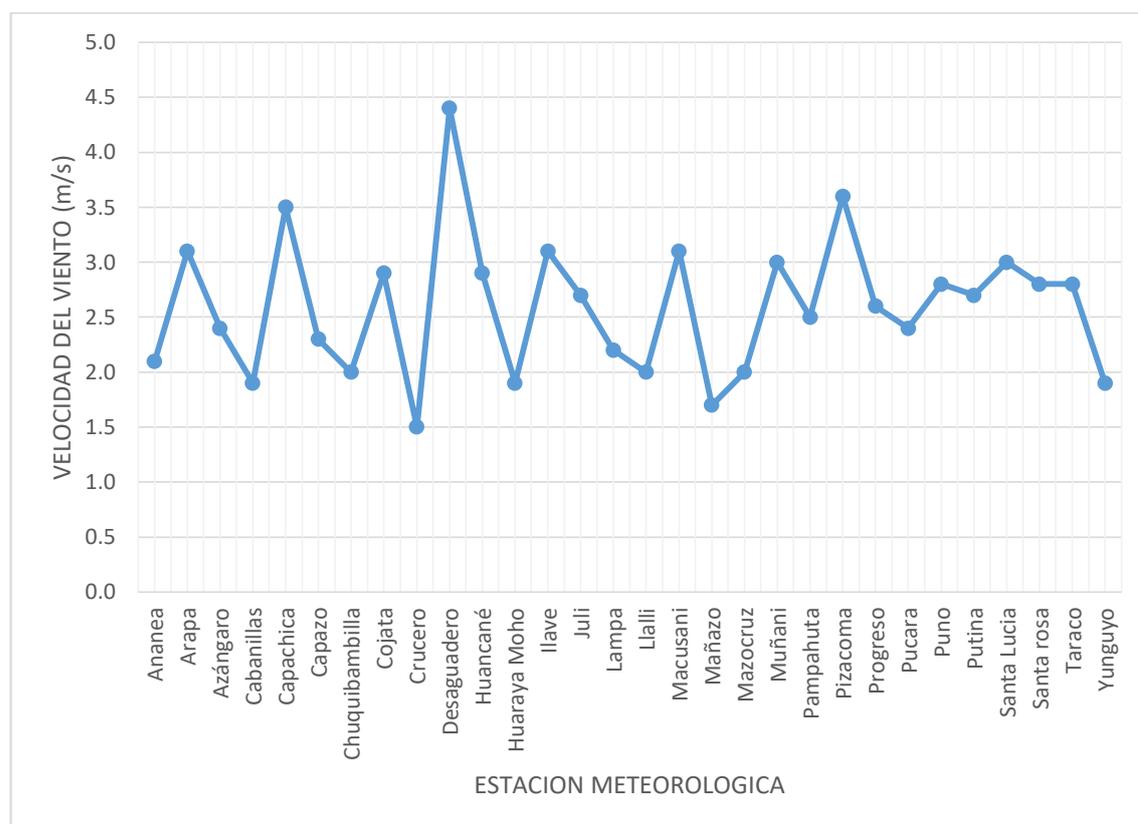


**Figura 9.** Variación de la temperatura máxima y mínima mensual promedio (°C). Las temperaturas mínimas extremas se manifiestan en Capazo, Masocruz y Pampahuta



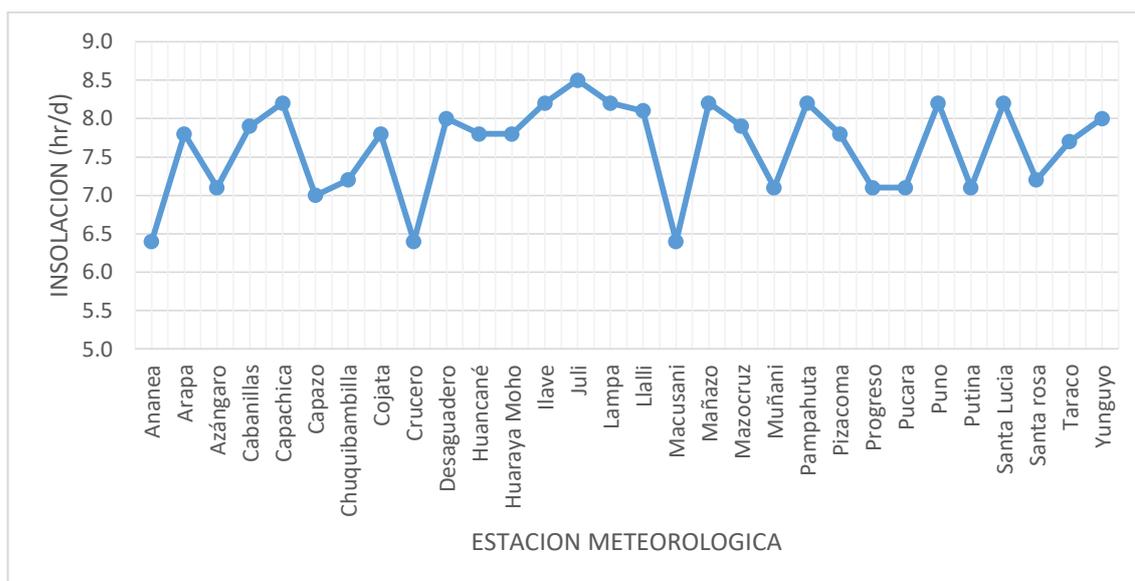
**Figura 10.** Variación de la humedad relativa mensual promedio (%)

La velocidad del viento en el ámbito en estudio varía de 1.5 a 4.4 m/s, que corresponden a las estaciones Crucero y Desaguadero, respectivamente y la velocidad del viento promedio es de 2.6 m/s. En la figura 11, se aprecia la variación mensual de la velocidad del viento en m/s en el ámbito en estudio. Según la clasificación en La escala de Beaufort se consideran vientos ventolinas que se caracterizan donde el humo indica la dirección del viento



**Figura 11.** Variación de la velocidad del viento (m/s) promedio

En el cuadro 3 se presenta los datos de la insolación en el ámbito en estudio, varía de 6.4 a 8.5 hr/d, que corresponden a las estaciones Crucero y Juli, respectivamente y la Insolación promedio es de 7.6 horas por día; en la figura 12 se muestra gráficamente la variación de la insolación. Los cultivos andinos requieren de 6 a 7 horas de sol/día para su desarrollo (Bolivar, 2013), por estas condiciones los cultivos andinos se han establecido muy bien en el altiplano



**Figura 12.** Variación de la insolación (hr.) promedio diario

En el cuadro 4 y figura 13 se presenta la información de evaporación (mm) mensual en Tanque clase A, de las estaciones meteorológicas Ananea, Arapa, Azangaro, Cabanillas, Capachica, Capazo, Chuquibambilla, Cojata, Crucero, Desaguadero, Huancané, Huaraya Moho, Ilave, Juli, Lampa, Llalli, Macusani, Mañazo, Mazocruz, Muñani, Pampahuta, Pizacoma, Progreso, Pucara, Puno, Putina, Santa Lucía, Santa Rosa, Taraco y Yunguyo. En ella se puede apreciar que la evaporación promedio mensual varía de 76.2 a 154.5 mm y la evaporación mensual promedio en todo el ámbito en estudio es de 135.3 mm. En la figura 13, se puede observar la variación mensual de la evaporación en el ámbito en estudio, las menores evaporaciones se presentan en las estaciones de Crucero, Muñani, Santa Lucía, Pizacoma, Pampahuta y las mayores evaporaciones se encuentran en las estaciones de Progreso, Arapa, e Ilave el resto de las estaciones tienen una evaporación de promedio.

**Cuadro 4.** Evaporación (mm) promedio mensual en tanque clase A

ESTACION	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
Ananea	119.5	107.1	114.5	118.1	123.4	122.1	121.1	137.7	140.2	153.2	146.8	134.9
Arapa	155.1	122.5	127.4	137.5	130.1	122.9	130.7	151.9	176.2	171.9	199.7	178.4
Azángaro	127.0	112.0	119.0	122.0	123.0	115.0	122.0	137.0	146.0	148.0	151.0	142.0
Cabanillas	139.6	125.6	133.7	127.0	126.4	114.3	125.6	141.4	158.5	179.1	178.9	160.6
Capachica	149.1	129.9	141.1	130.3	123.4	117.4	128.7	147.1	161.6	182.6	180.5	162.5
Capazo	141.4	137.2	130.9	119.9	123.3	116.0	115.2	110.9	154.4	185.2	205.0	170.9
Chuquibambilla	137.0	130.2	140.2	131.0	132.3	127.9	140.0	152.7	163.1	176.1	165.2	153.3
Cojata	127.8	115.1	123.5	122.3	126.0	122.3	126.4	142.1	148.8	161.3	156.2	143.2
Crucero	72.7	71.5	66.4	79.5	67.9	62.5	69.9	86.2	94.0	82.5	85.0	75.8
Desaguadero	154.0	137.0	143.9	135.2	132.8	122.8	127.9	137.2	153.5	172.3	172.9	172.1
Huancané	125.8	109.9	112.8	106.9	111.7	99.3	111.8	137.0	156.0	171.7	164.1	144.1
Huaraya Moho	123.0	109.9	116.8	115.5	115.9	102.5	113.0	131.1	144.1	153.2	149.5	135.7
Ilave	152.0	134.4	140.8	134.7	140.0	120.8	126.9	141.6	159.1	180.0	182.1	178.1
Juli	142.4	121.3	126.7	121.2	122.7	106.5	112.8	134.6	154.9	178.8	170.4	159.1
Lampa	139.6	125.6	133.7	127.0	126.4	114.3	125.6	141.4	158.5	179.1	178.9	160.6
Llalli	137.1	123.3	131.3	125.8	126.0	115.1	125.1	141.0	156.5	176.1	175.1	157.5
Macusani	129.0	116.2	124.7	122.8	126.3	122.3	127.1	142.7	149.9	162.5	157.5	144.3
Mañazo	141.8	127.9	133.8	124.7	126.6	112.1	118.7	139.6	158.0	186.9	178.1	167.2
Mazocruz	144.7	138.3	143.9	131.2	134.9	119.7	121.2	128.2	144.4	180.5	172.7	162.5
Muñani	118.0	105.0	112.0	114.0	117.0	109.0	116.0	129.0	137.0	138.0	141.0	131.0
Pampahuta	116.1	105.4	108.6	107.6	110.7	101.8	110.6	127.6	143.8	154.5	153.2	139.1
Pizacoma	118.4	100.7	128.2	120.2	98.8	91.5	93.5	118.0	120.4	163.6	164.3	157.7
Progreso	142.3	133.7	147.4	145.1	152.7	147.8	155.2	162.3	169.7	169.9	168.4	159.6
Pucara	139.4	125.4	133.5	126.9	126.4	114.4	125.6	141.4	158.3	178.8	178.6	160.4
Puno	148.0	133.7	142.5	135.4	129.8	116.9	123.5	145.7	159.1	185.0	185.1	172.0
Putina	126.0	111.0	118.0	121.0	123.0	114.0	122.0	136.0	145.0	147.0	151.0	141.0
Santa Lucia	119.2	112.4	124.0	119.0	119.0	109.1	108.0	118.1	123.7	141.0	149.8	130.2
Santa rosa	138.8	125.7	136.2	125.8	126.5	123.3	131.0	140.3	147.2	155.0	164.8	154.3
Taraco	121.0	106.7	122.1	137.5	147.4	140.6	140.3	147.7	134.3	129.9	140.0	143.1
Yunguyo	133.4	120.3	123.4	122.2	129.6	124.1	127.7	130.3	130.9	132.0	132.7	139.7

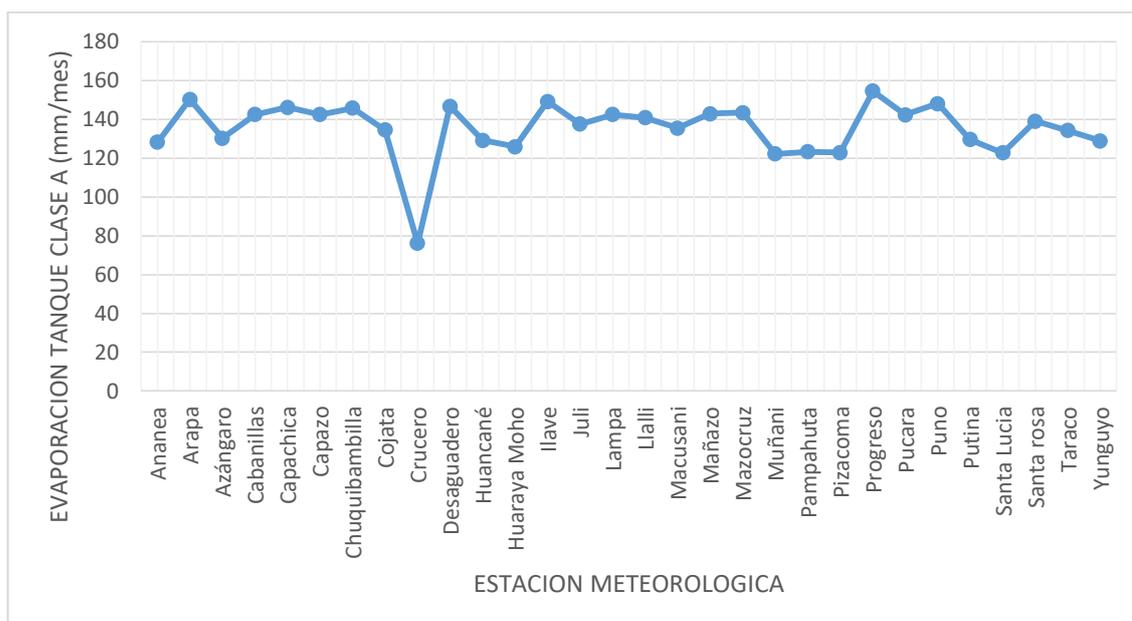


Figura 13. Variación de la evaporación en tanque clase A (mm/mes) promedio.

## 4.2 DE LA ESTIMACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA (ETo)

### 4.2.1 Método Penman Monteith

En el cuadro 5, se presentan los resultados de la estimación de la Evapotranspiración de referencia (ETo.) mediante el método de Penman Monteith, para las estaciones meteorológicas Ananea, Arapa, Azángaro, Cabanillas, Capachica, Capazo, Chuquibambilla, Cojata, Crucero, Desaguadero, Huancané, Huaraya Moho, Ilave, Juli, Lampa, Llalli, Macusani, Mañazo, Mazocruz, Muñani, Pampahuta, Pizacoma, Progreso, Pucara, Puno, Putina, Santa Lucia, Santa Rosa, Taraco y Yunguyo. En ella se puede apreciar que la evapotranspiración de referencia mínima varía de 67.3 a 86.2 mm que corresponden a los meses de junio y octubre, respectivamente; mientras que la evapotranspiración de referencia máxima varía de 107.2 a 155.2 mm que corresponden a los meses de junio y octubre, respectivamente y la evapotranspiración de referencia promedio

mensual varia de 87.1 a 126.0 mm. Arocutipa (2010) para la provincia de Puno, Huapaya (2013) para la zona circunlacustre del lago Titicaca, Choque (2005) para la provincia de Chucuito, Quispe (2003) en la subcuenca Chila Callo (2003) para la provincia de Ayaviri, en sus trabajos de investigación motivo de tesis obtuvieron similares valores de evapotranspiración potencial.

En el cuadro 5 también se puede apreciar que las estaciones de la parte norte de la región de Puno tienen menor evapotranspiración de referencia, desde Ananea hasta Muñani y las estaciones del sur Arapa, Puno, Desaguadero y Pizacoma tienen mayor evapotranspiración

**Cuadro 5** Evapotranspiración de referencia (mm) –Método Penman-Monteith.

ESTACION	ENE.	FEB.	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Ananea	76.8	71.1	76.3	73.4	75.2	69.3	71.6	81.7	83.1	86.2	84.5	78.9
Arapa	112.3	99.8	109.3	107.1	107.0	97.2	103.1	115.4	127.7	138.4	135.2	127.0
Azangaro	101.6	91.9	100.9	98.2	97.3	89.9	96.4	108.0	116.5	124.1	120.7	112.2
Cabanillas	111.9	101.5	104.4	99.5	103.3	91.7	97.7	111.3	121.3	133.1	135.4	130.3
Capachica	111.6	99.9	108.2	106.0	103.3	94.7	100.4	112.7	119.7	136.7	134.1	125.2
Capazo	94.4	83.7	88.1	82.8	75.8	67.3	70.2	83.4	95.6	112.9	113.6	109.9
Chuquibambilla	103.4	94.8	101.4	97.7	95.5	86.0	92.6	105.4	114.8	125.3	122.2	115.2
Cojata	86.0	78.0	86.5	84.4	81.6	71.4	79.4	88.5	93.0	102.6	100.6	93.4
Crucero	89.7	83.2	88.9	85.3	83.5	76.0	79.9	91.7	97.4	100.6	100.0	92.7
Desaguadero	120.8	109.2	117.1	108.7	102.1	90.5	92.9	104.2	117.3	136.2	139.2	134.2
Huancane	106.3	96.5	102.7	99.2	96.4	84.3	89.8	105.7	116.8	128.9	127.3	118.6
Huaraya Moho	103.4	94.5	102.6	96.1	89.6	77.7	84.8	99.8	112.4	124.2	122.1	113.1
Ilave	109.2	98.0	102.5	99.8	99.5	85.5	91.0	103.0	114.0	132.2	132.5	125.5
Juli	110.1	99.9	104.7	100.4	96.6	87.2	91.6	103.2	114.3	129.4	129.4	123.8
Lampa	112.5	100.1	106.7	103.7	98.5	87.9	97.6	111.5	121.5	133.9	136.4	127.1
Llally	112.2	100.9	106.0	100.1	96.3	85.5	92.5	106.1	120.5	133.3	131.7	124.7
Macusani	87.1	78.9	85.5	84.3	84.8	81.0	82.6	92.3	92.8	98.6	96.1	91.0
Mañazo	112.8	100.3	104.7	101.5	103.7	88.6	97.9	110.4	122.7	142.0	136.9	126.2
Mazocruz	111.7	98.9	105.1	99.9	95.2	84.7	89.0	101.1	112.9	129.8	130.3	125.0
Muñani	104.8	96.4	106.2	106.4	109.2	100.5	108.4	121.3	126.5	132.1	125.3	117.2
Pampahuta	102.2	92.6	98.9	96.5	95.7	85.2	92.3	103.7	113.9	124.9	123.5	115.7
Pizacoma	127.4	111.4	120.7	121.7	120.2	107.2	113.8	125.1	137.1	155.2	153.8	148.1
Progreso	100.8	93.5	102.6	101.2	100.9	93.9	101.2	113.3	119.8	126.5	121.7	111.4
Pucara	102.5	93.9	101.3	99.6	99.5	92.4	97.9	108.6	116.4	121.2	119.8	112.1
Puno	117.6	104.8	110.5	106.4	102.1	91.9	97.5	110.9	122.7	140.1	138.6	131.7
Putina	91.5	87.0	96.0	95.7	94.9	88.0	93.6	100.9	110.2	118.5	113.2	102.5
Santa Lucia	110.1	98.8	104.8	102.9	102.6	92.2	92.9	107.1	115.2	131.6	132.6	123.0
Santa Rosa	105.3	95.5	99.7	98.2	99.5	92.9	101.2	112.5	120.8	131.3	130.3	121.2
Taraco	103.2	89.9	99.3	99.9	102.5	95.4	103.7	110.1	117.6	129.0	125.2	118.1
Yunguyo	112.3	98.6	103.3	94.4	88.7	77.1	81.0	93.1	105.1	121.9	124.1	122.7
<b>Promedio</b>	<b>105.1</b>	<b>94.8</b>	<b>101.5</b>	<b>98.4</b>	<b>96.7</b>	<b>87.1</b>	<b>92.8</b>	<b>104.7</b>	<b>114.0</b>	<b>126.0</b>	<b>124.5</b>	<b>117.3</b>
Mínimo	76.8	71.1	76.3	73.4	75.2	67.3	70.2	81.7	83.1	86.2	84.5	78.9
Máximo	127.4	111.4	120.7	121.7	120.2	107.2	113.8	125.1	137.1	155.2	153.8	148.1

#### 4.2.2 Método tanque evaporímetro clase A

En la cuadro 6, se presentan los resultados de la determinación de los coeficientes del tanque evaporímetro clase A, los mismos que están en función de la situación del tanque, humedad relativa y velocidad del viento; en ella se puede apreciar que para las estaciones Ananea, Capachica, Desaguadero, Huancané, Huaraya Moho, Ilave, Juli, Lampa, Mazo cruz, Muñani, Pampahuta, Progreso, Pucara, Puno, Santa Lucia, Santa Rosa y Taraco se tiene un coeficiente de tanque de 0.75; mientras que para las estaciones Arapa, Azángaro, Cabanillas, Capazo, Chuquibambilla, Cojata, Crucero, Llalli, Macusani, Mañazo, Pizacoma y Yunguyo se tiene un coeficiente de tanque de 0.8.

**Cuadro 6.** Coeficiente de tanque clase A (Kb).

Estación	Coeficiente kb	Estación	Coeficiente kb
Ananea	0.75	Llalli	0.80
Arapa	0.80	Macusani	0.80
Azángaro	0.80	Mañazo	0.80
Cabanillas	0.80	Mazocruz	0.75
Capachica	0.75	Muñani	0.75
Capazo	0.80	Pampahuta	0.75
Chuquibambilla	0.80	Pizacoma	0.80
Cojata	0.80	Progreso	0.75
Crucero	0.80	Pucara	0.75
Desaguadero	0.75	Puno	0.75
Huancané	0.75	Putina	0.80
Huaraya Moho	0.75	Santa Lucia	0.75
Ilave	0.75	Santa Rosa	0.75
Juli	0.75	Taraco	0.75
Lampa	0.75	Yunguyo	0.80

En el cuadro 7, se presentan los resultados de la estimación de la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) mediante el método Tanque evaporímetro clase A, para las estaciones meteorológicas Ananea, Arapa, Azangaro, Cabanillas, Capachica, Capazo, Chuquibambilla, Cojata, Crucero, Desaguadero, Huancané, Huaraya Moho, Ilave, Juli, Lampa, Llalli, Macusani, Mañazo, Mazocruz, Muñani, Pampahuta, Pizacoma, Progreso, Pucara, Puno, Putina, Santa Lucia, Santa Rosa, Taraco y Yunguyo. En ella se puede apreciar que la evapotranspiración de referencia mínima varía de 50.0 a 69.0 mm que corresponden a los meses de junio y agosto, respectivamente; mientras que la evapotranspiración de referencia máxima varía de 110.9 a 149.5 mm que corresponden a los meses de junio y octubre, respectivamente y la evapotranspiración de referencia promedio mensual varía de 88.5 a 125.0 mm, que corresponden a los meses de junio y octubre, respectivamente.

En las figuras 1 al 30 del Anexo 3 se muestra la variación mensual de la evapotranspiración de referencia estimados mediante los métodos Penman-Monteith y tanque evaporímetro clase A, para las estaciones meteorológicas Ananea, Arapa, Azangaro, Cabanillas, Capachica, Capazo, Chuquibambilla, Cojata, Crucero, Desaguadero, Huancané, Huaraya Moho, Ilave, Juli, Lampa, Llalli, Macusani, Mañazo, Mazocruz, Muñani, Pampahuta, Pizacoma, Progreso, Pucara, Puno, Putina, Santa Lucia, Santa Rosa, Taraco y Yunguyo.

**Cuadro 7.** Evapotranspiración de referencia (mm) –método tanque clase A

ESTACION	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
Ananea	89.6	80.3	85.9	88.6	92.6	91.6	90.8	103.3	105.2	114.9	110.1	101.2
Arapa	106.9	93.4	100.7	102.7	108.8	96.9	103.1	116.4	125.2	132.0	136.1	124.9
Azángaro	101.6	89.6	95.2	97.6	98.4	92.0	97.6	109.6	116.8	118.4	120.8	113.6
Cabanillas	111.7	100.5	107.0	101.6	101.1	91.4	100.5	113.1	126.8	143.3	143.1	128.5
Capachica	111.8	97.4	105.8	97.7	92.6	88.1	96.5	110.3	121.2	137.0	135.4	121.9
Capazo	121.2	102.1	97.4	92.6	96.5	88.5	80.1	99.5	122.0	142.5	140.8	126.5
Chuquibambilla	109.6	104.2	112.2	104.8	105.8	102.3	112.0	122.2	130.5	140.9	132.2	122.6
Cojata	102.2	92.1	98.8	97.8	100.8	97.8	101.1	113.7	119.0	129.0	125.0	114.6
Crucero	58.2	57.2	53.1	63.6	54.3	50.0	55.9	69.0	75.2	66.0	68.0	60.6
Desaguadero	115.5	102.8	107.9	101.4	99.6	92.1	95.9	102.9	115.1	129.2	129.7	129.1
Huancané	94.4	82.4	84.6	80.2	83.8	74.5	83.9	102.8	117.0	128.8	123.1	108.1
Huaraya Moho	92.3	82.4	87.6	86.6	86.9	76.9	84.8	98.3	108.1	114.9	112.1	101.8
Ilave	114.0	100.8	105.6	101.0	105.0	90.6	95.2	106.2	119.3	135.0	136.6	133.6
Juli	106.8	91.0	95.0	90.9	92.0	79.9	84.6	101.0	116.2	134.1	127.8	119.3
Lampa	104.7	94.2	100.3	95.3	94.8	85.7	94.2	106.1	118.9	134.3	134.2	120.5
Llalli	109.7	98.6	105.0	100.6	100.8	92.1	100.1	112.8	125.2	140.9	140.1	126.0
Macusani	103.2	93.0	99.8	98.2	101.0	97.8	101.7	114.2	119.9	130.0	126.0	115.4
Mañazo	113.4	102.3	107.0	99.8	101.3	89.7	95.0	111.7	126.4	149.5	142.5	133.8
Mazocruz	108.5	103.7	107.9	98.4	101.2	89.8	90.9	96.2	108.3	135.4	129.5	121.9
Muñani	88.5	78.8	84.0	85.5	87.8	81.8	87.0	96.8	102.8	103.5	105.8	98.3
Pampahuta	87.1	79.1	81.5	80.7	83.0	76.4	83.0	95.7	107.9	115.9	114.9	104.3
Pizacoma	94.7	80.6	102.6	96.2	79.0	73.2	74.8	94.4	96.3	130.9	131.4	126.2
Progreso	106.7	100.3	110.6	108.8	114.5	110.9	116.4	121.7	127.3	127.4	126.3	119.7
Pucara	104.6	94.1	100.1	95.2	94.8	85.8	94.2	106.1	118.7	134.1	134.0	120.3
Puno	111.0	100.3	106.9	101.6	97.3	87.7	92.6	109.3	119.3	138.7	138.8	129.0
Putina	100.8	88.8	94.4	96.8	98.4	91.2	97.6	108.8	116.0	117.6	120.8	112.8
Santa Lucia	89.4	84.3	93.0	89.2	89.3	81.9	81.0	88.6	92.8	105.8	112.3	97.6
Santa Rosa	104.1	94.3	102.2	94.4	94.9	92.5	98.3	105.2	110.4	116.3	123.6	115.7
Taraco	90.8	80.0	91.6	103.1	110.6	105.5	105.2	110.8	100.7	97.4	105.0	107.3
Yunguyo	106.7	96.3	98.7	97.8	103.7	99.3	102.1	104.2	104.7	105.6	106.2	111.8
<b>Promedio</b>	<b>102.0</b>	<b>91.5</b>	<b>97.4</b>	<b>95.0</b>	<b>95.7</b>	<b>88.5</b>	<b>93.2</b>	<b>105.0</b>	<b>113.8</b>	<b>125.0</b>	<b>124.4</b>	<b>115.6</b>
Minimo	58.2	57.2	53.1	63.6	54.3	50.0	55.9	69.0	75.2	66.0	68.0	60.6
Maximo	121.2	104.2	112.2	108.8	114.5	110.9	116.4	122.2	130.5	149.5	143.1	133.8

En el cuadro 8 se presentan los resultados de la prueba estadística T de Student, en ella se puede apreciar que para las estaciones Arapa, Azangaro, Cabanillas, Capachica, Desaguadero, Huancane, Huaraya Moho, Ilave, Juli, Lampa, Llalli, Mañazo, Mazo cruz, Pampahuta, Pucara, Puno, Putina, Santa Rosa, Taraco y Yunguyo, los valores de T calculado son menores que los valores de T tabular; en consecuencia se puede concluir que no existe diferencia significativa entre los valores promedios de evapotranspiración de referencia estimados mediante los métodos Penman-Monteith y tanque clase A; mientras que para las estaciones Ananea, Capazo, Chuquibambilla, Cojata, Crucero, Macusani, Muñani, Pizacoma, Progreso y Santa Lucia, los resultados de la prueba estadística T de Student indica que los valores de T calculado son mayores que los valores de T tabular; en consecuencia se puede concluir que existe una diferencia entre el promedio de los valores de evapotranspiración de referencia estimados mediante los métodos Penman-Monteth y tanque clase A.

**Cuadro 8.** Resultados de la prueba estadística T de Student.

Estación	T calculado	T tabular	Conclusión
Ananea	5.47	2.07	Existen diferencias significativas
Arapa	0.47	2.07	No existen diferencias
Azángaro	0.12	2.07	No existen diferencias
Cabanillas	0.34	2.07	No existen diferencias
Capachica	0.50	2.07	No existen diferencias
Capazo	2.57	2.07	Existen diferencias significativas
Chuquibambilla	2.35	2.07	Existen diferencias significativas
Cojata	4.69	2.07	Existen diferencias significativas
Crucero	8.97	2.07	Existen diferencias significativas
Desaguadero	0.70	2.07	No existen diferencias
Huancané	1.35	2.07	No existen diferencias
Huaraya Moho	1.33	2.07	No existen diferencias
Ilave	0.65	2.07	No existen diferencias
Juli	0.67	2.07	No existen diferencias
Lampa	0.70	2.07	No existen diferencias
Llalli	0.54	2.07	No existen diferencias
Macusani	5.17	2.07	Existen diferencias significativas
Mañazo	0.28	2.07	No existen diferencias
Mazocruz	0.11	2.07	No existen diferencias
Muñani	5.01	2.07	Existen diferencias significativas
Pampahuta	2.01	2.07	No existen diferencias
Pizacoma	3.91	2.07	Existen diferencias significativas
Progreso	2.13	2.07	Existen diferencias significativas
Pucara	0.25	2.07	No existen diferencias
Puno	0.52	2.07	No existen diferencias
Putina	1.01	2.07	No existen diferencias
Santa Lucia	3.65	2.07	Existen diferencias significativas
Santa Rosa	0.95	2.07	No existen diferencias
Taraco	1.62	2.07	No existen diferencias
Yunguyo	0.26	2.07	No existen diferencias

### 4.3 DE LA ESTIMACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DE CULTIVO

En la Cuadro 5, se presenta los resultados de la estimación de la evapotranspiración de referencia mediante el método de Penman Monteith y en la tabla 7 mediante el método de tanque evaporímetro clase A, los mismos se consideran para la estimación de la evapotranspiración de los cultivos papa, quinua y alfalfa.

#### 4.3.1 De la estimación del coeficiente de cultivo Kc

##### a. Cedula de cultivo y periodo vegetativo

Considerando lo mencionado por los investigadores e Instituciones, la FAO (2012a), menciona que la duración del período de crecimiento y la producción total de tubérculos dependen de la variedad, la temperatura y la duración del día. La formación de los tubérculos sucede antes de la floración y la floración no es necesaria para producir tubérculos.

El calendario de siembras y cosechas de los principales cultivos en el departamento de Puno, se realiza de acuerdo al comportamiento de los cultivos y de acuerdo a las características ecológicas y agroclimáticas. En el sector agrario, se ha determinado que la campaña agrícola está comprendida entre los meses de agosto de un año y el mes de julio del año próximo, este periodo obedece a los factores de desarrollo vegetativo y disponibilidad de los recursos hídricos. Condori *et al.*, (2010).

En el altiplano, la fecha de siembra varía entre inicios de septiembre y finales de noviembre, de acuerdo con la duración del ciclo de cultivo de las diferentes variedades y el clima local, especialmente cuando el

suelo está lo suficientemente húmedo para la germinación. El desarrollo fenológico es muy cambiante entre las variedades. Además, la fenología es muy flexible en respuesta al estrés hídrico, con diferencias en el tiempo hasta la maduración de hasta 30 días para la misma variedad Geerts *et al.*, (2008).

Para la investigación se ha considerado la cedula de cultivo que está conformada por los cultivos papa dulce, quinua blanca y alfalfa.

El periodo vegetativo del cultivo de papa dulce se ha considerado de 150 días, tal como menciona Tapia (1985), Cahuana y Arcos (1993), y el Ministerio de Agricultura (2012); para el cultivo de quinua blanca se ha considerado un periodo de 150 días tal como mencionan los investigadores Mujica *et al.* (2001), Argote (2004), Condori *et al.*, (2010). Tapia y Fried (2007), FAO (2012a), FAO (2016) y el Ministerio de Agricultura (2013) y para el cultivo de alfalfa, se ha considerado un periodo vegetativo de 180 días, 80 días para el primer corte y 90 días para el segundo corte; para los tres cultivos se ha considerado una agricultura en seco.

La época de siembra del cultivo de papa varía de octubre a diciembre, para la investigación se ha considerado el mes de octubre, tal como recomienda Franco (1983), Tapia y Fried (2007), FAO (2016) y Ministerio de Agricultura (2013); para el cultivo de quinua el periodo de siembra varía de setiembre a noviembre, para el estudio se ha considerado el mes de octubre, y para el cultivo de alfalfa el periodo vegetativo varía de noviembre a enero, para la investigación la siembra se ha considerado el

mes de diciembre, dado que este cultivo requiere buena humedad para la germinación, tal como recomienda Choque (2005).

En el cuadro 9 se presenta la cedula de cultivos considerado en la investigación y el calendario del periodo vegetativo de los cultivos papa, quinua y alfalfa.

**Cuadro 9.** Cédula de cultivo y periodo vegetativo.

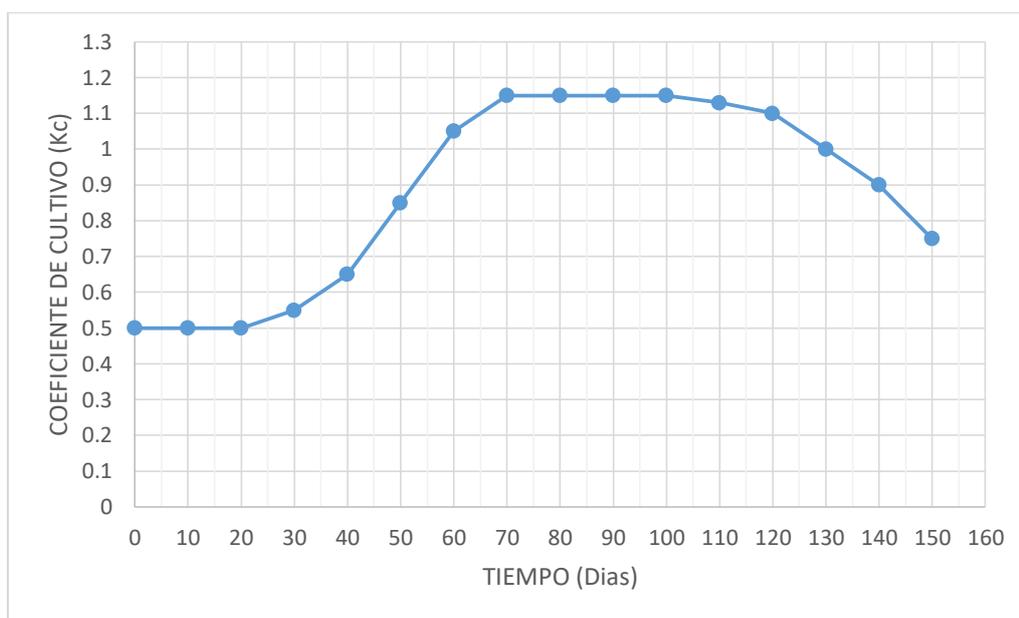
Cultivo	Periodo vegetativo (días)	Meses											
		Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul
Papa	150				x	x	x	x	x				
Quinua	150			x	x	x	x	x					
Alfalfa	180					x	x	x	x	x	x		

**b. Coeficiente de cultivo Kc**

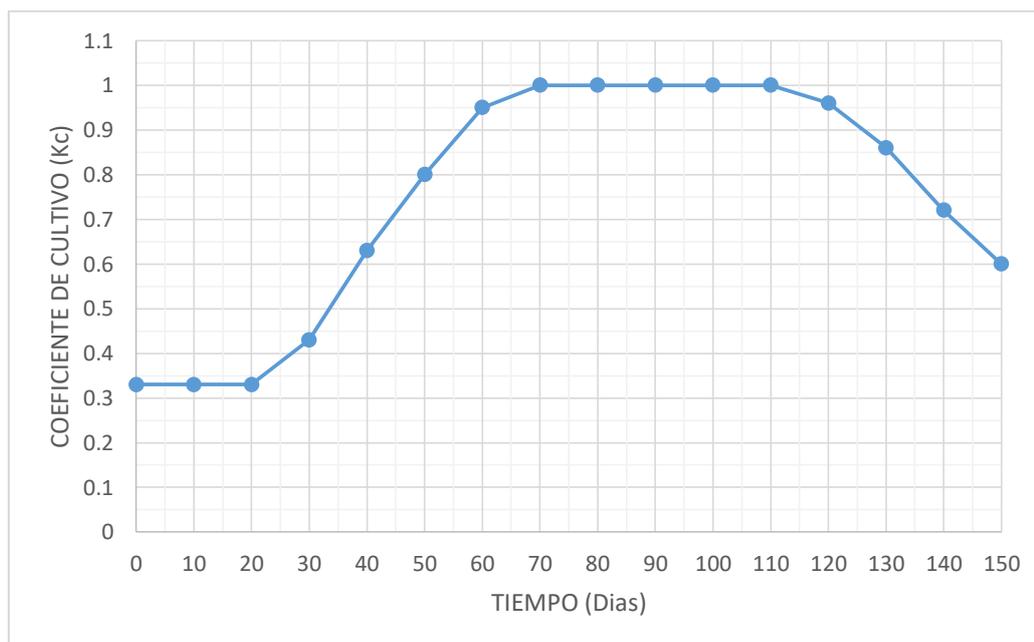
Los valores de coeficiente de cultivo (Kc) para los cultivos de papa, quinua y alfalfa se presentan en el cuadro 10, los mismos fueron estimados siguiendo la metodología propuesto por la FAO N° 56, y en las figuras 14, 15 y 16 se presentan gráficamente la variación mensual de los coeficientes de cultivos papa, quinua y alfalfa, respectivamente.

**Cuadro 10.** Coeficiente de cultivo Kc.

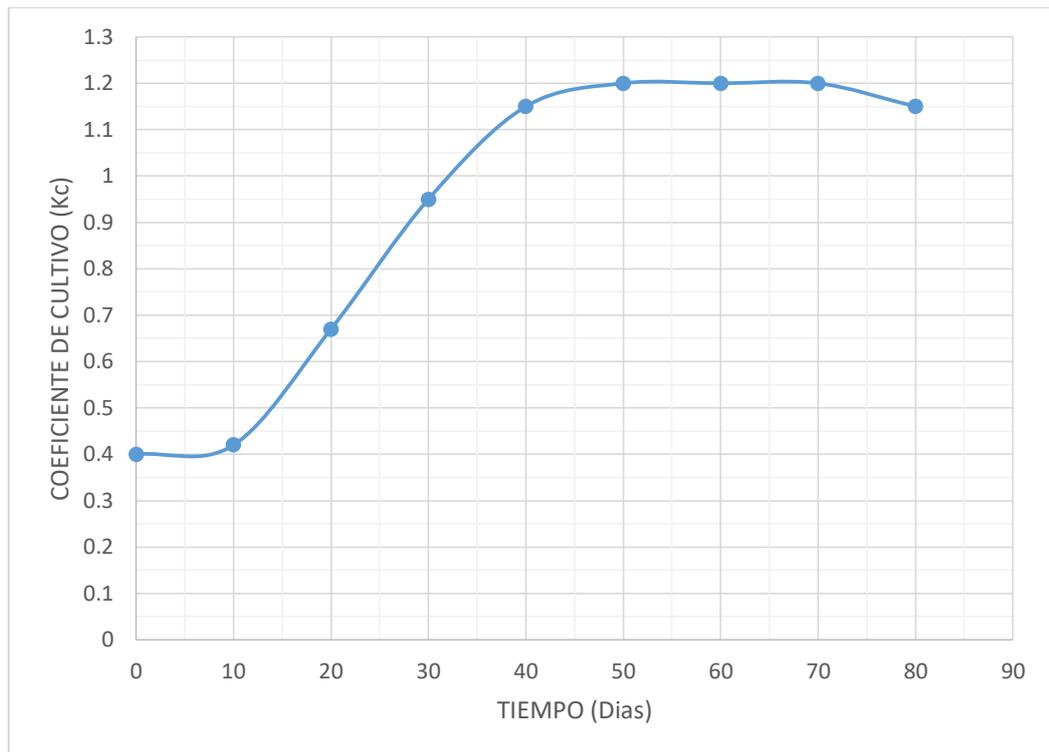
Cultivo	Meses											
	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul
Papa				0.50	1.05	1.15	1.10	0.75				
Quinua			0.42	0.95	1.00	0.95	0.6					
Alfalfa					0.95	1.20	1.15	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00



**Figura 14.** Curva Kc para el cultivo de papa.



**Figura 15.** Curva Kc para el cultivo de quinua



**Figura 16.** Curva Kc para el cultivo de alfalfa (primer corte).

#### a. Evapotranspiración del cultivo de papa

En el cuadro 11 se presentan los resultados de la evapotranspiración mensual del cultivo de papa estimado mediante el método de Penman-Monteith, en ella se puede apreciar que en el ámbito en estudio la evapotranspiración de cultivo de papa, para un periodo vegetativo de 150 días, varía de 353.1 a 599.6 mm, que corresponden a las estaciones Ananea y Pizacoma, respectivamente. En promedio para toda la región es de 492.8 mm.

En la Cuadro 12, se presentan los resultados de la evapotranspiración del cultivo de papa estimado mediante el método tanque clase A, en ella se puede apreciar que en el ámbito en de la cuenca del lago Titicaca

peruano, la evapotranspiración de cultivo de papa para un periodo vegetativo de 150 días, varía de 270.7 a 542.1 mm, que corresponden a las estaciones Crucero y Mañazo, respectivamente. En promedio para toda la región es de 480.7 mm.

Las estimaciones de la evapotranspiración de cultivo de papa, comparando ambos métodos presentan una correlación de 86.58 %.

Sood y Singh (2003) mencionan que en condiciones de campo, los requerimientos hídricos del cultivo papa varían de 350 a 650 mm, Mallma (2015) obtiene 470.6 mm, para un periodo vegetativo de 5 meses; Canllahui (2013) mediante el método de lisímetro, Hargreaves y Serruto, obtiene valores de 588.87, 429.81 y 579.42 mm, respectivamente; Lopez y Dennet (2005) obtiene un coeficiente de correlación de 75 a 80%.

En ambos Cuadros hay una tendencia de evapotranspiración mayor en las estaciones de la parte sur de la región de Puno, una tendencia de menor evapotranspiración en las estaciones de la parte norte de la región de Puno.

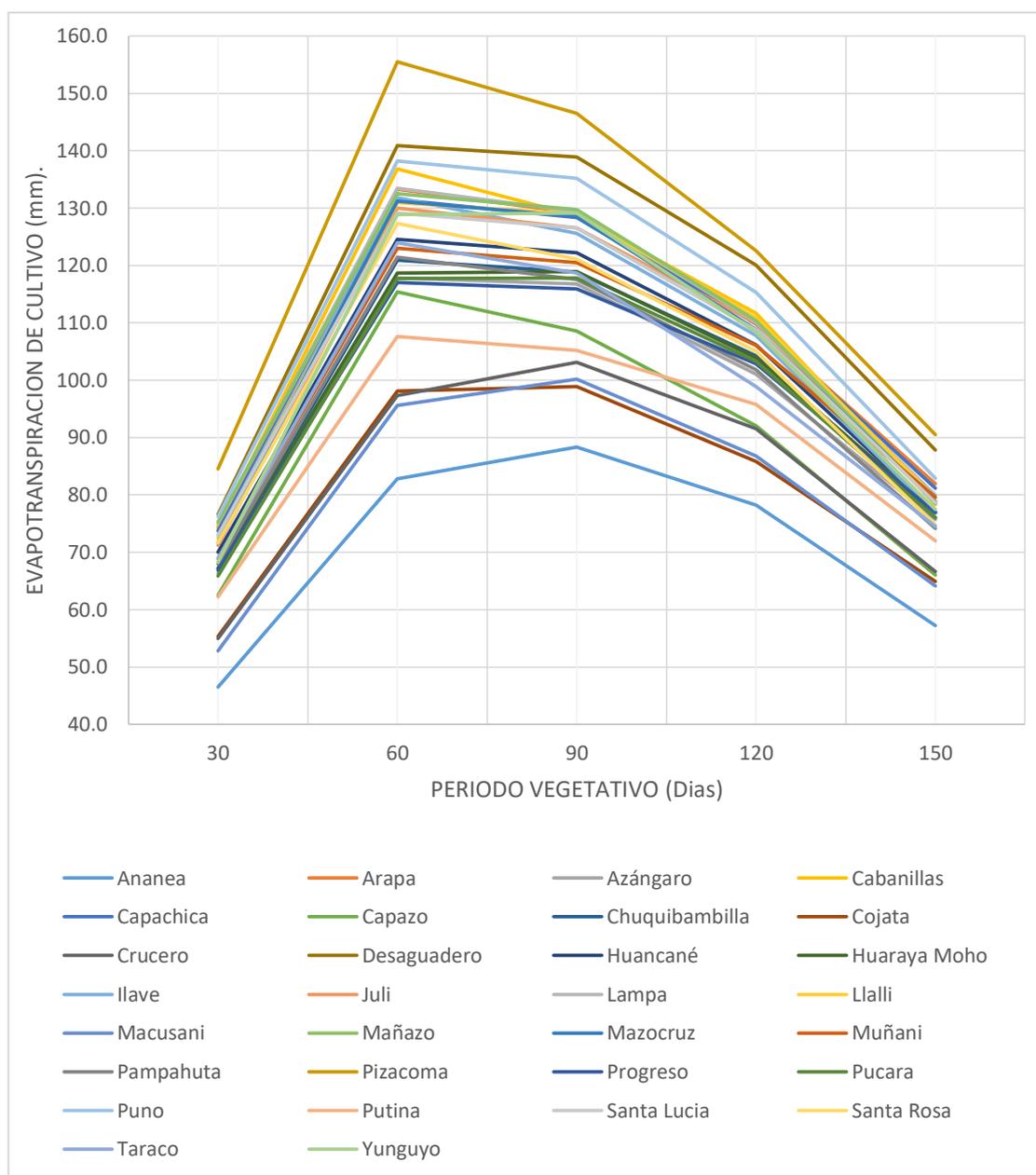
**Cuadro 11.** Evapotranspiración mensual (mm) del cultivo de papa-Penman-Monteith.

ESTACION	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	TOTAL
Pizacoma	84.6	155.5	146.5	122.6	90.5	599.60
Desaguadero	76.5	140.9	138.9	120.1	87.8	564.20
Puno	76.2	138.2	135.2	115.3	82.9	547.80
Cabanillas	74.5	136.9	128.7	111.7	78.3	530.00
Arapa	74.4	133.3	129.1	109.8	81.9	528.50
Lampa	75	133.4	129.4	110.1	80	528.00
Mañazo	75.3	132.5	129.7	110.3	78.5	526.40
Capachica	73.7	131.4	128.3	109.9	81.1	524.50
Llalli	72.4	130.9	129	110.9	79.5	522.70
Mazocruz	71.6	131.2	128.5	108.8	78.8	518.90
Juli	71.2	130	126.6	109.9	78.5	516.20
Santa Lucia	72.9	129.1	126.6	108.7	78.6	516.00
Ilave	72.9	131.8	125.6	107.8	76.9	514.90
Yunguyo	68.2	128.9	129.2	108.4	77.5	512.20
Huancané	70	124.5	122.3	106.1	77	499.90
Santa Rosa	71.7	127.3	121.1	105	74.7	499.80
Muñani	68.9	123	120.5	106.1	79.6	498.10
Chuquibambilla	67.2	120.9	118.9	104.3	76.1	487.30
Huaraya Moho	67.2	118.7	118.9	103.9	76.9	485.60
Taraco	68.9	124	118.7	98.9	74.5	484.90
Pampahuta	67.9	121.5	117.6	101.8	74.2	482.90
Pucara	65.9	117.7	117.8	103.3	76	480.70
Progreso	66.9	117	115.9	102.9	77	479.70
Azángaro	66.4	117.9	116.8	101	75.7	477.80
Capazo	62.5	115.4	108.6	92	66.1	444.50
Putina	62.3	107.6	105.2	95.7	72	442.80
Crucero	55	97.3	103.1	91.6	66.6	413.60
Cojata	55.3	98.1	98.9	85.8	64.9	403.00
Macusani	52.8	95.6	100.2	86.8	64.1	399.50
Ananea	46.5	82.8	88.4	78.2	57.2	353.10
<b>Promedio</b>	<b>68.5</b>	<b>123.1</b>	<b>120.8</b>	<b>104.3</b>	<b>76.1</b>	<b>492.8</b>

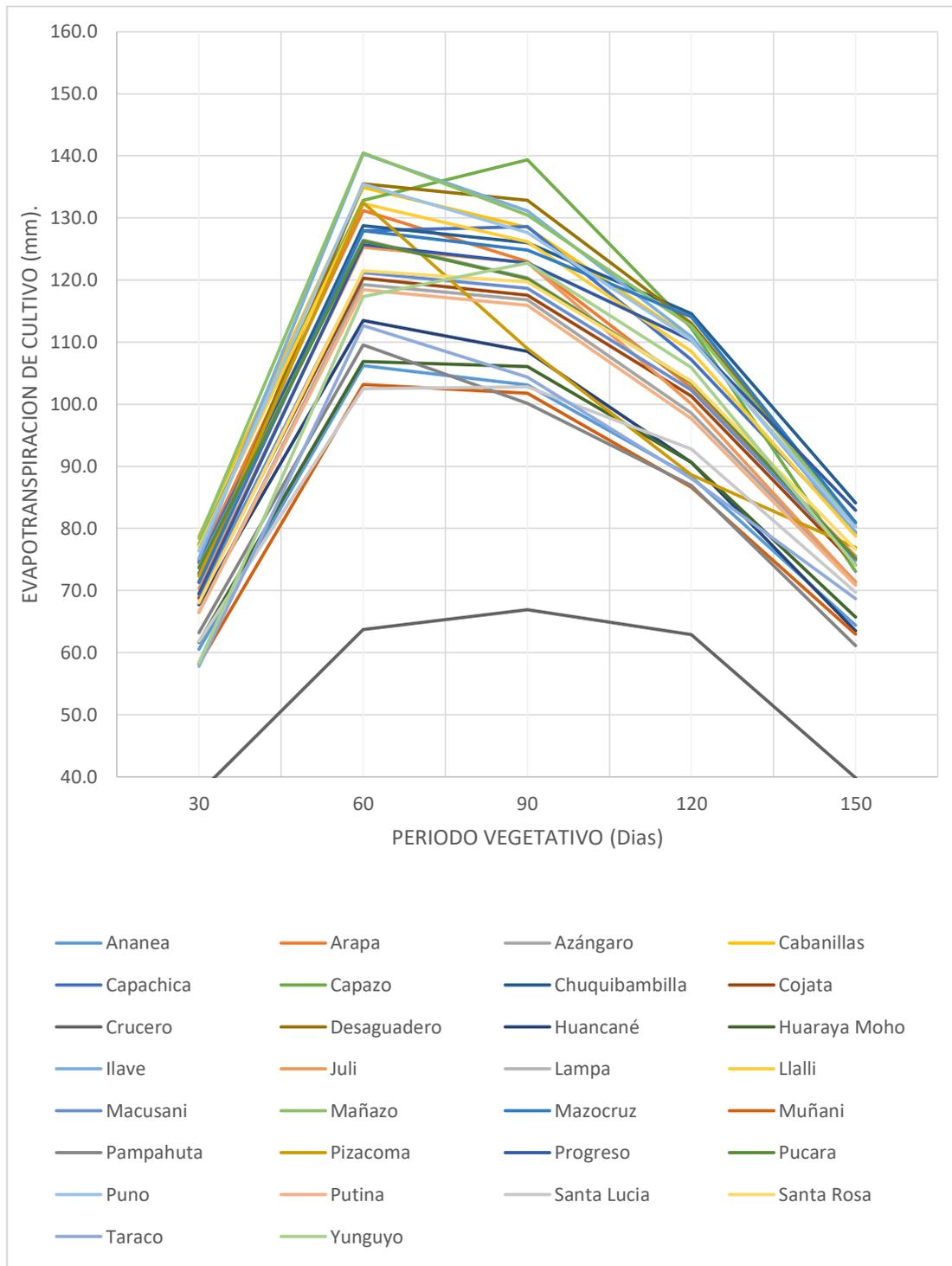
**Cuadro 12.** Evapotranspiración mensual (mm) del cultivo de papa –Tanque clase A.

ESTACION	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	TOTAL
Mañazo	78.4	140.4	130.5	112.6	80.3	542.10
Ilave	75.1	140.3	131.1	110.9	79.2	536.60
Capazo	77.5	132.8	139.3	112.3	73.1	535.00
Desaguadero	71.3	135.5	132.8	113	80.9	533.60
Cabanillas	78.7	134.9	128.4	110.5	80.2	532.80
Puno	76.3	135.5	127.7	110.3	80.2	530.00
Chuquibambilla	72.7	128.8	126	114.6	84.1	526.20
Llalli	77	132.3	126.1	108.5	78.8	522.80
Mazocruz	71.2	128	124.8	114.1	80.9	519.10
Capachica	74.5	128	128.6	107.2	79.4	517.60
Progreso	69.5	125.7	122.7	110.3	82.9	511.10
Arapa	74.8	131.2	122.9	102.7	75.5	507.10
Lampa	73.8	126.5	120.4	103.6	75.2	499.50
Pucara	73.7	126.3	120.2	103.5	75.1	498.80
Juli	70.3	125.3	122.8	100.1	71.3	489.70
Santa Rosa	68	121.5	119.7	103.7	76.6	489.50
Macusani	69.3	121.2	118.7	102.3	74.8	486.30
Cojata	68.7	120.3	117.6	101.3	74.1	482.00
Pizacoma	72.3	132.5	108.9	88.6	76.9	479.20
Yunguyo	58.4	117.3	122.7	105.9	74.1	478.40
Azángaro	66.4	119.3	116.8	98.6	71.4	472.50
Putina	66.4	118.4	115.9	97.7	70.8	469.30
Huancané	67.7	113.5	108.5	90.7	63.5	443.80
Taraco	57.8	112.7	104.4	88	68.7	431.50
Huaraya Moho	61.7	106.9	106.1	90.7	65.7	431.00
Santa Lucia	61.8	102.5	102.8	92.8	69.8	429.60
Ananea	60.6	106.2	103.1	88.4	64.4	422.60
Pampahuta	63.2	109.5	100.1	87	61.1	420.90
Muñani	58.2	103.2	101.8	86.6	63	412.70
Crucero	37.4	63.7	66.9	62.9	39.8	270.70
Promedio	<b>68.4</b>	<b>121.3</b>	<b>117.3</b>	<b>100.6</b>	<b>73.1</b>	<b>480.7</b>

En los cuadros 17 y 18 se muestran la variación mensual de la evapotranspiración del cultivo de papa (mm) para un periodo vegetativo de 150 días estimados mediante los métodos Penman- Monteith y tanque clase A, respectivamente, en ambos casos las estaciones de la parte norte de la región de Puno se presentan con menor evapotranspiración



**Figura 17.** Variación mensual de la evapotranspiración del cultivo de papa (mm)– Penman Monteith.



**Figura 18.** Variación mensual de la evapotranspiración del cultivo de papa (mm) – Tanque clase A.

En esta figura resalta nítidamente la menor evapotranspiración en la estación de Crucero

**b. Evapotranspiración Etc. del cultivo de quinua**

En el cuadro 13 se presentan los resultados de la evapotranspiración mensual del cultivo de quinua estimado mediante el método Penman-Monteith, en ella se puede apreciar que en el ámbito en estudio, la Evapotranspiración de cultivo de quinua para un periodo vegetativo de 150 días, varía de 311.0 a 547.6 mm, que corresponden a las estaciones Ananea y Pizacoma, respectivamente. En promedio para toda la región es de 445.1 mm.

En el Cuadro 14 se presentan los resultados de la evapotranspiración mensual del cultivo de quinua considerando la evapotranspiración de referencia estimado mediante el método de tanque clase A, en ella se puede apreciar que en el ámbito en estudio, la evapotranspiración de cultivo de quinua para un periodo vegetativo de 150 días del cultivar, varía de 242.5 a 501.1 mm, que corresponden a las estaciones Ananea y Yunguyo, respectivamente. En promedio para toda la región es de 440.30 mm.

Las estimaciones de la evapotranspiración de cultivo de quinua, con ambos métodos fueron comparadas y presentaron una correlación de 89.41 %.

La FAO (2012 a) para la quinua con un periodo de 150 a 170 días obtiene una evapotranspiración del cultivo de quinua de 500 mm; Mallma (2015) para la región Junín, obtiene valores de evapotranspiración del cultivo de quinua que varía entre 300 a 800 mm; los resultados de ambos métodos se encuentran en el rango de los resultados existente

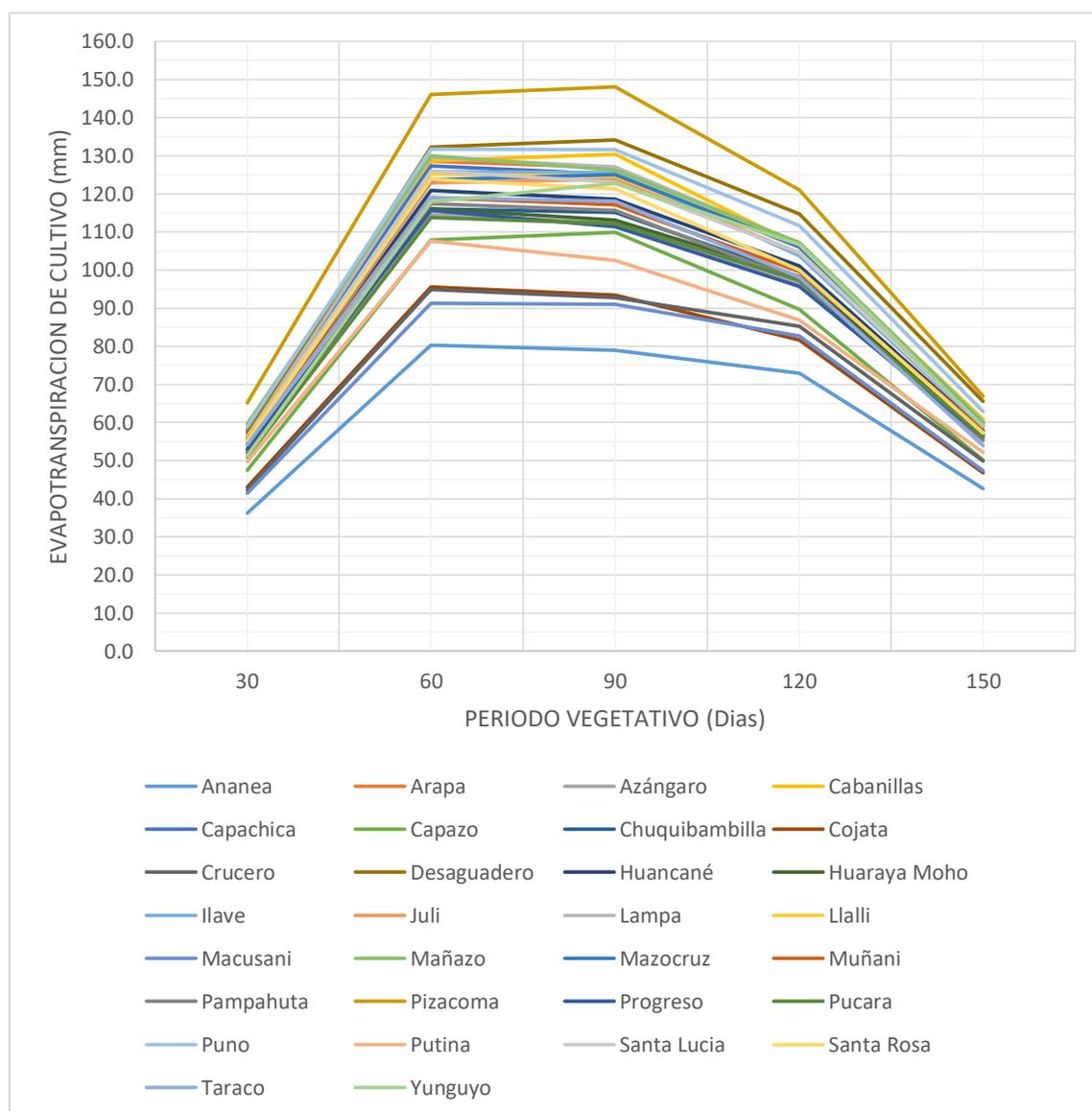
**Cuadro 13.** Evapotranspiración ETc. mensual (mm) del cultivo de quinua – Penman Monteith.

ESTACION	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	TOTAL
Pizacoma	65.2	146.1	148.1	121	66.8	547.6
Desaguadero	57.2	132.2	134.2	114.7	65.5	503.8
Puno	58.8	131.7	131.7	111.7	62.9	496.7
Mañazo	59.6	130	126.2	107.2	60.2	483.2
Cabanillas	55.9	128.6	130.3	106.3	60.9	482.1
Arapa	58.1	128.4	127	106.7	59.9	480.1
Lampa	56.3	129.5	127.1	106.9	60.1	479.8
Capachica	57.4	127.3	125.2	106	59.9	475.9
Llalli	56	125.1	124.7	106.6	60.5	472.8
Ilave	55.5	125.8	125.5	103.8	58.8	469.4
Mazocruz	54.5	123.7	125	106.1	59.3	468.7
Santa Lucia	55.3	126	123	104.6	59.3	468.1
Juli	54.3	122.9	123.8	104.6	60	465.6
Yunguyo	51.2	117.9	122.7	106.7	59.1	457.6
Santa Rosa	55.1	123.8	121.2	100	57.3	457.4
Huancané	54.2	120.9	118.6	101	57.9	452.5
Muñani	55.5	119	117.2	99.5	57.9	449.0
Taraco	54.2	119	118.1	98	53.9	443.2
Chuquibambilla	52.6	116.1	115.2	98.2	56.9	438.9
Pampahuta	52.5	117.3	115.7	97.1	55.5	438.1
Huaraya Moho	52.1	116	113.1	98.2	56.7	436.1
Progreso	53.1	115.6	111.4	95.7	56.1	432.0
Azángaro	52.1	114.6	112.2	96.5	55.1	430.6
Pucara	50.9	113.8	112.1	97.3	56.3	430.5
Capazo	47.4	107.9	109.9	89.7	50.2	405.1
Putina	49.7	107.5	102.5	86.9	52.2	398.9
Crucero	42.2	95	92.7	85.2	49.9	365.0
Cojata	43.1	95.6	93.4	81.7	46.8	360.6
Macusani	41.4	91.3	91	82.7	47.3	353.8
Ananea	36.2	80.3	78.9	73	42.7	311.0
Promedio	52.9	118.3	117.3	99.8	56.9	445.1

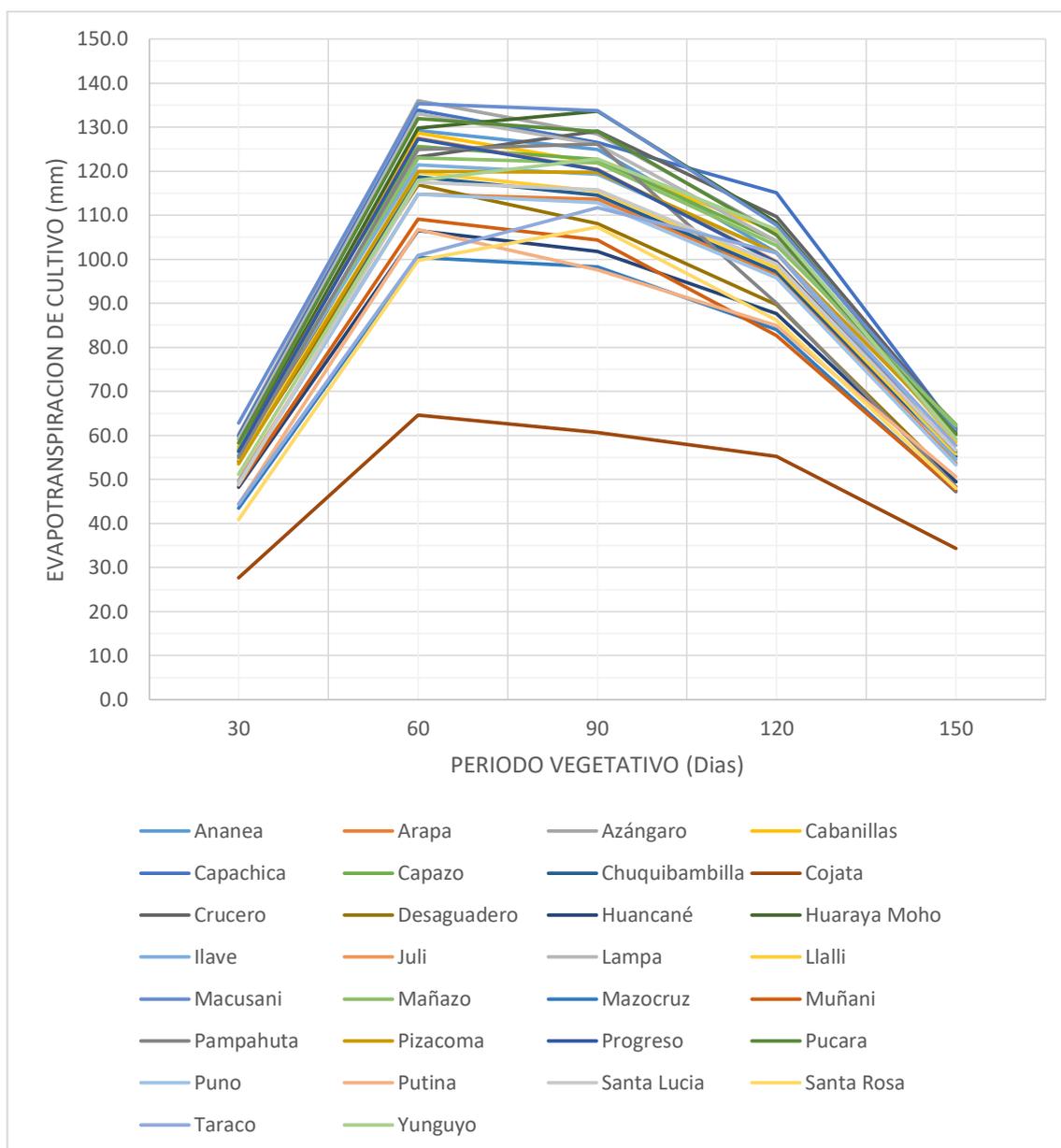
**Cuadro 14.** Evapotranspiración mensual (mm) del cultivo de quinua – Tanque clase A.

ESTACION	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	TOTAL
Yunguyo	62.8	135.4	133.8	107.8	61.4	501.10
Taraco	59.8	133.8	126.5	115.1	61.2	496.50
Santa Rosa	60.2	136	128.5	106.1	60.3	491.00
Santa Lucia	56.7	129.7	133.6	108.3	60.5	488.80
Putina	58.3	131.9	129	105.5	60.2	484.80
Puno	59.2	133.1	126	104.2	59.2	481.60
Pucara	54.3	123.2	129.1	109.7	61.7	477.90
Progreso	59.2	125.6	122.6	104.1	62.5	474.00
Pizacoma	57.5	128.6	121.9	106.2	58.5	472.70
Pampahuta	55.4	129.3	124.9	101.6	56	467.20
Muñani	56.9	123	121.9	103.1	62.2	467.10
Mazocruz	56.4	127.5	120.5	99.5	56.5	460.30
Mañazo	56.3	127.3	120.3	99.3	56.4	459.60
Macusani	51.2	117.9	122.7	106.7	59.1	457.60
Llalli	53.5	120	119.7	101.4	60.2	454.80
Lampa	56.3	121.4	119.3	101.5	54.6	453.10
Juli	55	124.9	126.2	90	48.3	444.30
Ilave	54.6	119.7	115.4	98	55.8	443.60
Huaraya Moho	54.2	118.7	114.6	97.1	55.2	439.80
Huancané	48.8	117.4	115.7	98.9	56.6	437.40
Desaguadero	49.7	114.8	113.6	96.5	53.8	428.40
Crucero	49.4	114.8	112.8	95.8	53.3	426.00
Cojata	54.1	116.9	108.1	89.6	49.5	418.20
Chuquibambilla	44.3	100.8	111.8	101.4	57.8	416.10
Capazo	48.3	106.5	101.8	87.6	49.5	393.60
Capachica	48.7	109.2	104.3	82.7	47.4	392.30
Cabanillas	44.4	106.7	97.6	84.9	50.6	384.30
Azángaro	40.9	99.8	107.3	86.2	48	382.20
Arapa	43.5	100.5	98.3	84.1	47.3	373.50
Ananea	27.7	64.6	60.6	55.3	34.3	242.50
<b>Promedio</b>	<b>52.6</b>	<b>118.6</b>	<b>116.3</b>	<b>97.6</b>	<b>55.3</b>	<b>440.3</b>

En las figuras 19 y 20, se muestran la variación mensual de la evapotranspiración del cultivo de quinua (mm) para un periodo vegetativo de 150 días estimados mediante los métodos Penman-Monteith y tanque clase A, respectivamente; en ellas se puede observar que el comportamiento de la evapotranspiración del cultivo de quinua durante todo el periodo vegetativo es similar para ambos métodos., y la estación de Ananea tiene la menor evapotranspiración en ambos métodos.



**Figura 19.** Variación mensual de la evapotranspiración del cultivo de quinua (mm) – Penman Monteith



**Figura 20.** Variación mensual de la evapotranspiración del cultivo de quinua (mm) – Tanque clase A

**c. Evapotranspiración del ETC. del cultivo de alfalfa**

Para el caso de la investigación, se ha calculado la evapotranspiración del cultivo alfalfa para un periodo de 180 días considerando la instalación del cultivo, el primer corte a los 80 días y el segundo corte de acuerdo al crecimiento y humedad del suelo; como son cultivos permanentes, los

demás cortes estarán en función de las condiciones climáticas, precipitación y humedad del suelo.

En el Cuadro 15, se presentan los resultados de la evapotranspiración mensual del cultivo de alfalfa, considerando la evapotranspiración de referencia estimado mediante el método de Penman-Monteith, en ella se puede apreciar que en el ámbito en estudio, la evapotranspiración de cultivo para un periodo vegetativo de 180 días, varía de 473.8 a 784.30 mm, que corresponden a las estaciones Ananea y Pizacoma, respectivamente. En promedio para todo el ámbito en estudio es la evapotranspiración del cultivo es de 643.0 mm.

En el Cuadro 16, se presentan los resultados de la evapotranspiración mensual del cultivo de alfalfa considerando la evapotranspiración de referencia estimado mediante el método tanque clase A, en ella se puede apreciar que en el ámbito en estudio, la evapotranspiración de cultivo para un periodo vegetativo de 180 días, varía de 364.20 mm a 691.30 mm, que corresponden a las estaciones Crucero y llave respectivamente. En promedio para todo el ámbito en estudio la evapotranspiración del cultivo es de 625.4 mm.

Los resultados obtenidos por ambos métodos es bastante parecidos 643.0 mm por Penman-Monteith y 625.4 mm. tanque clase A

**Cuadro 15.** Evapotranspiración mensual (mm) del cultivo de alfalfa – Penman Monteith.

ESTACION	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	TOTAL
Pizacoma	140.7	152.9	128.1	120.7	121.7	120.20	784.30
Desaguadero	127.5	144.9	125.5	117.1	108.7	102.10	725.80
Puno	125.1	141.1	120.5	110.5	106.4	102.10	705.70
Arapa	120.6	134.7	114.8	109.3	107.1	107.00	693.40
Capachica	118.9	133.9	114.9	108.2	106	103.30	685.20
Cabanillas	123.8	134.3	116.8	104.4	99.5	103.30	682.00
Mañazo	119.9	135.3	115.4	104.7	101.5	103.70	680.50
Lampa	120.7	135	115.1	106.7	103.7	98.50	679.80
Santa Lucia	116.8	132.1	113.7	104.8	102.9	102.60	672.90
Llalli	118.5	134.6	116	106	100.1	96.30	671.30
Muñani	111.3	125.7	110.9	106.2	106.4	109.20	669.70
Mazocruz	118.7	134.1	113.7	105.1	99.9	95.20	666.70
Juli	117.6	132.1	114.9	104.7	100.4	96.60	666.30
Ilave	119.2	131.1	112.7	102.5	99.8	99.50	664.80
Yunguyo	116.6	134.8	113.3	103.3	94.4	88.70	651.10
Huancané	112.7	127.6	110.9	102.7	99.2	96.40	649.50
Santa Rosa	115.2	126.3	109.8	99.7	98.2	99.50	648.70
Taraco	112.2	123.9	103.4	99.3	99.9	102.50	641.10
Progreso	105.9	120.9	107.5	102.6	101.2	100.90	639.00
Pucara	106.5	123	108	101.3	99.6	99.50	637.90
Chuquibambilla	109.4	124	109	101.4	97.7	95.50	637.10
Azángaro	106.6	121.9	105.6	100.9	98.2	97.30	630.50
Pampahuta	109.9	122.7	106.4	98.9	96.5	95.70	630.10
Huaraya Moho	107.4	124.1	108.6	102.6	96.1	89.60	628.30
Putina	97.4	109.8	100.1	96	95.7	94.90	593.70
Capazo	104.4	113.3	96.2	88.1	82.8	75.80	560.60
Crucero	88.1	107.6	95.7	88.9	85.3	83.50	549.10
Macusani	86.5	104.5	90.7	85.5	84.3	84.80	536.30
Cojata	88.8	103.2	89.7	86.5	84.4	81.60	534.20
Ananea	74.9	92.2	81.8	76.3	73.4	75.20	473.80
Promedio	<b>111.4</b>	<b>126.0</b>	<b>109.0</b>	<b>101.5</b>	<b>98.4</b>	<b>96.7</b>	<b>643.0</b>

**Cuadro 16.** Evapotranspiración ETc. mensual (mm) del cultivo de alfalfa – Tanque clase A.

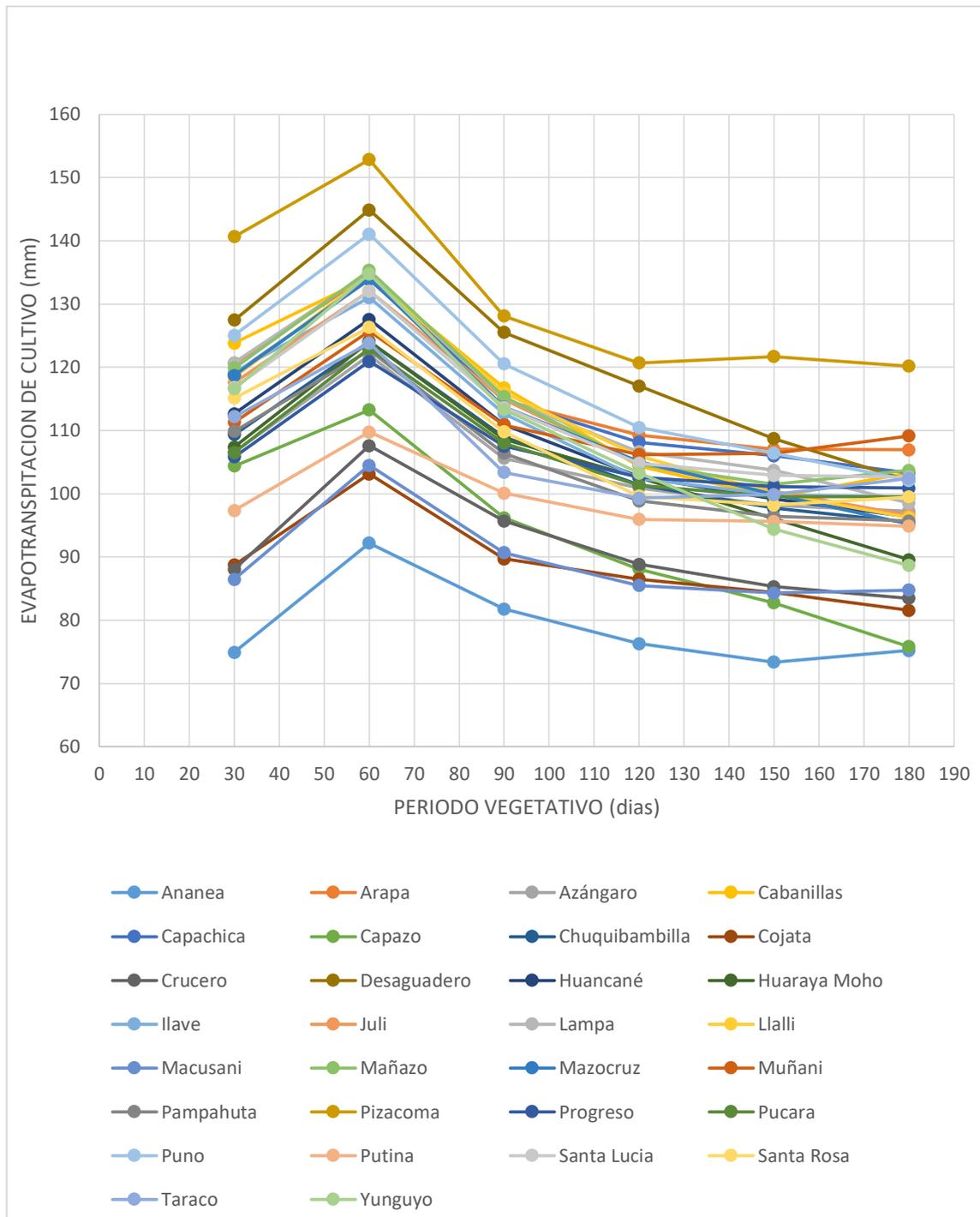
ESTACION	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	TOTAL
Ilave	126.9	136.8	115.9	105.6	101	105.00	691.30
Progreso	113.7	128.1	115.3	110.6	108.8	114.50	691.00
Chuquibambilla	116.5	131.5	119.8	112.2	104.8	105.80	690.60
Mañazo	127.1	136.1	117.7	107	99.8	101.30	688.90
Desaguadero	122.6	138.6	118.2	107.9	101.4	99.60	688.30
Cabanillas	122.1	134	115.6	107	101.6	101.10	681.30
Puno	122.6	133.2	115.4	106.9	101.6	97.30	676.90
Mazocruz	115.8	130.2	119.3	107.9	98.4	101.20	672.80
Llalli	119.7	131.6	113.4	105	100.6	100.80	671.20
Capazo	120.2	145.4	117.4	97.4	92.6	96.50	669.40
Arapa	118.7	128.3	107.4	100.7	102.7	108.80	666.50
Capachica	115.8	134.2	112	105.8	97.7	92.60	658.10
Yunguyo	106.2	128.1	110.7	98.7	97.8	103.70	645.10
Macusani	109.7	123.8	106.9	99.8	98.2	101.00	639.50
Lampa	114.4	125.6	108.3	100.3	95.3	94.80	638.70
Pucara	114.3	125.5	108.2	100.1	95.2	94.80	638.00
Cojata	108.8	122.7	105.9	98.8	97.8	100.80	634.90
Santa Rosa	109.9	124.9	108.4	102.2	94.4	94.90	634.70
Juli	113.4	128.2	104.6	95	90.9	92.00	624.10
Azángaro	107.9	121.9	103	95.2	97.6	98.40	624.10
Putina	107.2	121	102.1	94.4	96.8	98.40	619.80
Taraco	102	108.9	92	91.6	103.1	110.60	608.10
Pizacoma	119.9	113.7	92.6	102.6	96.2	79.00	603.90
Santa Lucia	92.8	107.2	97	93	89.2	89.30	568.40
Huaraya Moho	96.7	110.7	94.8	87.6	86.6	86.90	563.30
Ananea	96.1	107.6	92.4	85.9	88.6	92.60	563.00
Huancané	102.7	113.2	94.8	84.6	80.2	83.80	559.20
Muñani	93.3	106.2	90.6	84	85.5	87.80	547.40
Pampahuta	99.1	104.5	90.9	81.5	80.7	83.00	539.70
Crucero	57.6	69.8	65.8	53.1	63.6	54.30	364.20
<b>Promedio</b>	<b>109.8</b>	<b>122.4</b>	<b>105.2</b>	<b>97.4</b>	<b>95.0</b>	<b>95.7</b>	<b>625.4</b>

Las estimaciones de la evapotranspiración de cultivo de alfalfa, con ambos métodos fueron comparadas y presentaron una correlación de 84.17 %.

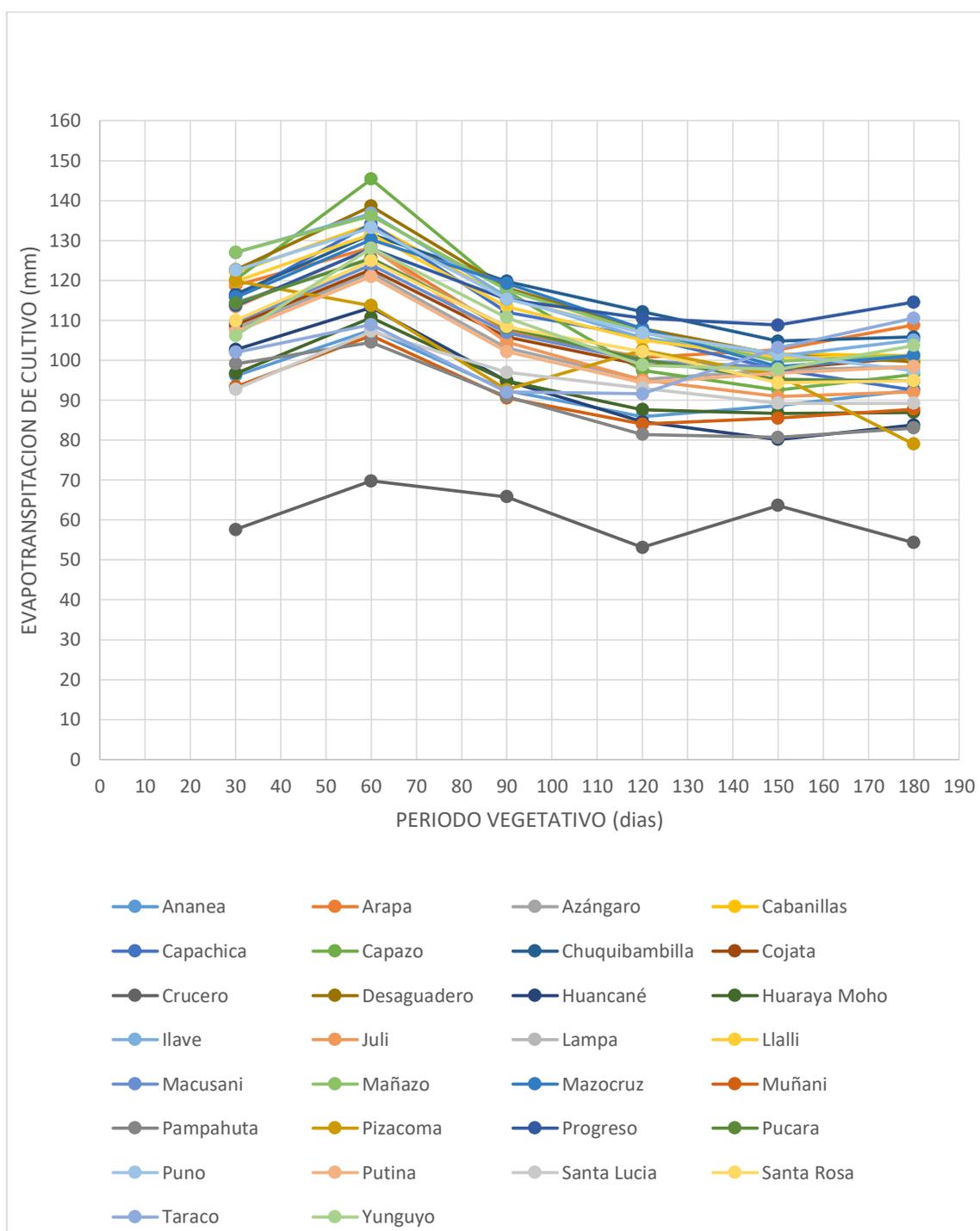
La FAO (2012a) menciona que la evapotranspiración del cultivo alfalfa anual acumulada varía entre 200 mm en condiciones áridas hasta 1000 mm en condiciones favorables de humedad del suelo o zonas húmedas.

La cantidad de veces que la alfalfa se puede cosechar durante un año depende de las condiciones climáticas y el manejo Teixeira *et al.*, (2007), después de cada cosecha, se genera un conjunto de brotes vegetativos.

En las figuras 21 y 22, se muestran la variación mensual de la evapotranspiración del cultivo de alfalfa (mm) para un periodo vegetativo de 180 días, estimadas mediante el método de Penman-Monteith y tanque clase A, respectivamente; en ellas se puede apreciar que el comportamiento mensual de la evapotranspiración del cultivo de alfalfa son similares para ambos métodos.



**Figura 21.** Variación mensual de la evapotranspiración del cultivo de alfalfa (mm) – Penman Monteith.



**Figura 22.** Variación mensual de la evapotranspiración del cultivo de alfalfa (mm) – Tanque clase A.

## CONCLUSIONES

- Para el ámbito de la cuenca del lago Titicaca, la evapotranspiración de referencia estimados mediante Penman Monteith, en promedio son: 105.05, 94.78, 101.50, 98.37, 96.70, 87.10, 92.82, 104.73, 113.99, 126.02, 124.54, 117.26 mm, que corresponden a los meses de enero a diciembre, respectivamente.
- Para el ámbito de la cuenca del lago Titicaca, la evapotranspiración de referencia estimados mediante el método de tanque evaporímetro clase A, en promedio son: 101.99, 91.50, 97.41, 94.96, 95.69, 88.46, 93.20, 105.03, 113.77, 124.98, 124.41, 115.56 mm, que corresponden a los meses de enero a diciembre, respectivamente.
- La evapotranspiración mensual del cultivo de papa estimado mediante el método de Penman-Monteith, para un periodo vegetativo de 150 días, varía de 353.1 a 599.6 mm, en promedio para toda la región es de 492.8 mm y mediante el método tanque clase A varia de 270.7 a 542.1 mm, en promedio para toda la región es de 480.7 mm; las estimaciones de la evapotranspiración de cultivo de papa con ambos métodos fueron comparadas y presentaron una correlación del 86.58 %.

- La evapotranspiración mensual del cultivo de quinua estimado mediante el método de Penman-Monteith, para un periodo vegetativo de 150 días, varía de 311.0 a 547.6 mm, en promedio para toda la región es de 445.1 mm y mediante el método tanque clase A varia de 242.5 a 501.1 mm, en promedio para toda la región es de 440.30 mm; las estimaciones de la evapotranspiración de cultivo de quinua con ambos métodos fueron comparadas y presentaron una correlación del 89.41 %.
- La evapotranspiración mensual del cultivo de alfalfa estimado mediante el método de Penman-Monteith, para un periodo vegetativo de 180 días, varía de 473.80 a 784.30 mm, en promedio para toda la región es de 643.0 mm y mediante el método tanque clase A varia de 364.2 a 691.3 mm, en promedio para toda la región es de 625.4 mm; las estimaciones de la evapotranspiración de cultivo de alfalfa con ambos métodos fueron comparadas y presentaron una correlación del 84.17 %.

## RECOMENDACIONES

- Estimar la evapotranspiración de referencia mediante métodos directos para comparar los resultados de esta investigación.
- Estimar el coeficiente de cultivo mediante métodos directos en campo y comparar con los estimados en esta investigación.
- Estimar la evapotranspiración de cultivo mediante métodos directos y comparar con los estimados en esta investigación.

## BIBLIOGRAFÍA

- Alcántara, J. (1986). *Calculo de la Demanda de Agua de un Proyecto de Riego*. Asociación de Ingenieros Agrícolas del Perú. Curso de Hidrología Aplicada. Lima –Perú.
- Allen, G. R., Pereira, L., Raes, D., y Smith, M. (2006). *Estudio FAO Riego y drenaje 56. Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Serie Cuadernos Técnicos. Roma, Italia. FAO. 298 p.
- Álvarez, L., Arendt, E.K., y Gallagher, E. (2009). *Nutritive value of pseudo cereals and their increasing use as functional gluten-free ingredients. Trends in Food Science & Technology* 21: 106-113.
- Amagua, J.M. (2013). *Respuesta a bajas temperaturas de treinta genotipos de papa (Solanum Spp), bajo condiciones controladas*. Cutuglahua, Pichincha, Tesis de grado previa a la obtención del título de Ingeniera Agrónoma. Quito Ecuador.
- Aparicio, F. (1992). *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. Editores Noriega (Limusa) México, 252 p.
- Argote, G. (2004). *Cultivo de alfalfa, instalación, producción y manejo*. Estación Experimental Illpa. INIA. Boletín N° 01-2004. Puno, Perú.

- Arocutipa, M. (2010). *Necesidades hídricas para cultivos alimenticios y forrajeros en el INIA Illpa - Puno*. (Tesis de Ingeniero Agrícola.) U.N.A. Puno, Perú.
- Benites, C. (1998). *Sistemas Hidráulicos de Riego*. Editorial UNSA Arequipa – Perú. 699 Pág.
- Bolívar, M. (2013), *el cultivo de la quinua y el clima en el ecuador*. Estudios e Investigaciones Meteorológicas INAMHI - Ecuador
- Cahuana, R. y J. Arcos. (1993). *Variedades de papas más importantes en Puno*. Programa Interinstitucional Waru Waru. Puno, Perú. CIP, 1980. Compendio de enfermedades de la papa. CIP, Lima.
- Calera, A. Campos, I. y Garrido, J. (2016). *Determinación de las necesidades de agua y riego*. CENTER, 20 Pag.
- Callo, W. (2003). *Mejoramiento del sistema de captación de la irrigación Huacauta canal J.* (Tesis de Ingeniero Agrícola.) U.N.A. Puno, Perú.
- Canllahui, M. (2013), *Determinación de la evapotranspiración y coeficiente de cultivo (Kc) en la producción de papa (Solanum tuberosum L.) Var. Silver en el CIP-ILLPA-Puno*. (Tesis para optar el título de Ingeniero Agrónomo). Universidad Nacional del Altiplano. Puno, Perú.
- Chávez, O. (1978). *Métodos de riego cursillo de divulgación*. Instituto Interamericano de ciencias agrícolas IICA OEA. Tegucigalpa –Honduras. Enlace disponible en:  
<http://books.google.com.ec/books?id=vEqAAAAYAAJ&pg=PA18&dq=metodo+de+riego+cursillo&hl=es&sa=X&ei=hCI9T5v3G5Cctwfav820BQ&ved=0CDYQ6AEwAA#v=onepage&q=metodo%20de%20riego%20cursillo&f=false>
- Choque, J. (2005). *Producción y manejo de especies forrajeras*. UNA Puno. pag. 306, Rev. Investig. Altoandin. 2013; Vol 15 Nro 2

- Choque, L. (2005). *Propuesta de sistema de riego por goteo para la comunidad de Tambillo Pomata*. (Tesis de Ingeniero Agrícola).
- Condori, B., Hijmans, R.J., Quiroz, R. y Ledent, J.-F. (2010). *Quantifying the expression of potato genetic diversity in the high Andes through growth analysis and modelling*. *Field Crops Research* 119(1):135-144.
- De Santa Olalla, F., Lopez, P., y Calera, A. (2005). *Agua y Agronomía*. Mundi-Prensa. Madrid, España. 606 p.
- Doorembos, J. y Pruitt, W. (1976). *Las necesidades de Agua por los Cultivos*. FAO. Organización de las Naciones Unidas. Roma. Italia. (Publicación N° 24).
- FAO (2002). *Quinoa (Chenopodium quinoa). Ancestral cultivo andino, alimento del presente y futuro*. Editores: Mujica A., S. Jacobsen, J. Izquierdo y J.P Marathee. Santiago de Chile. 1952 FAO
- FAO (2012a). *Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua*, 00153 Roma, Italia, 210 p. web: [www.fao.org](http://www.fao.org)
- FAO. (2012). *El Estado Mundial de la Agricultura y la alimentación 2010 – 2011*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma.
- FAO. (2016). *Guía del cultivo de la quinua*. FAO-Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú. 130 pág.
- Faustino, J. (2006). *Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas*. Universidad Nacional Agraria la Molina. Escuela de Post Grado. Lima-Peru. 365 p.
- Flores, E. (2013). *Evapotranspiración en función de factores y elementos del clima en el altiplano peruano*. (Tesis para optar grado de Doctor). Universidad Nacional del Altiplano. Puno.
- Franco, E. (1983). *Producción, distribución y uso de semilla de Papa*. CIP, INIPA, Lima.

- Geerts, S., Raes, D., García, M., Mendoza, J. y Huanca, R. (2008). *Indicators to quantify the flexible phenology of quinoa (Chenopodium quinoa Willd.) in response to drought stress*. Field Crops Research 108, 150-156.
- Guevara, E. y Cartaya, H. (2004) *Hidrología ambiental*. Facultad de Ingeniería. Universidad de Carabobo. Venezuela.
- Huapaya, H. (2013), *Análisis de la evapotranspiración potencial en función de elementos climáticos en la zona circunlacustre de la cuenca del Titicaca* Peruano, Puno, Perú. Rev. Investg. Alto Andina.2014 vol.16. N° 1
- Jaramillo, A. (2006). *Evapotranspiración de referencia en la región Andina de Colombia*. Cenicafé 57(4):288-298.2006.
- Jensen, M., Burman, R. & Allen, R. (1990). *Evapotranspiration and irrigation water requirements*. Committee on Irrigation Water Requirements of the Irrigation and Drainage Division of the American Society of Civil Engineers, 121(1), pp.133-34.
- López, J. y Dennett, M. (2005). *Comparación de dos métodos para estimar la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) en una zona semiárida de Venezuela*. Bioagro 17(1): 41-46.
- Mallma, T. (2015). *Huella hídrica de los productos agrícolas de la región Junín comercializadas en la ciudad de Lima*. (Tesis para optar el grado de Doctoris Philosophiae). Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Marín, V. (2010). *Evaluación de la relación entre la evapotranspiración potencial teórica y la evaporación registrada en los departamentos de Cundinamarca y valle del Cauca*.(Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Civil). Pontificia Universidad Javeriana Bogotá D.C.
- Melesse, A.M., Weng, Q., Thenkabail, P.S. & Senay, G.B. (2007). *Remote Sensing Sensors and Applications in Environmental Resources Mapping and Modelling*. Sensors, 7(12), pp.3209-41.
- Ministerio de Agricultura. (2013). *Quinoa: Principales aspectos de la cadena*

*productiva*. Dirección General de Competitividad Agraria. Lima, Perú

Ministerio de Agricultura y Riego. (2013). *Valor Bruto de la producción Agropecuaria. Oficina de Estudios Económicos y Estadísticos*. SIEA, Lima, Perú.

Ministerio de Agricultura. (2006). *Estadísticas de producción de papa por departamento*. Oficina de Información Agraria (OIA). Lima, Perú.

Ministerio de Agricultura. (2012). *La Papa, Principales aspectos de la cadena productiva*. Cadena agroproductiva de la PAPA, Dirección General De Competitividad Agraria, Lima Perú. 1ra Edición: agosto 2012.

Ministerio de Agricultura. (2012a). *Quinua: Perú campo fértil para sus inversiones y desarrollo de sus exportaciones*. Agro al Día, Dirección General de Competitividad Agraria. Lima, Perú.

Mujica, A., Canahua, A. y Saravia. R. (2001). Agronomía del cultivo de la quinua. En: Quinua, ancestral cultivo andino. Alimento del presente y del futuro. FAO, UNA Puno, CIP Lima. FAO Oficina Regional, Santiago de Chile.

Ochoa, C. (1990). *The potatoes of South America: Bolivia*. Cambridge University Press. ORSTOM, 1992. La papa amarga. I. Mesa redonda Perú-Bolivia, La Paz.

Pino, M.T., Chen, T.H. (2016). Efectos de las heladas en el cultivo de la papa y desafíos del mejoramiento genético. Boletín INIA, N° 331 Boletín INIA, N° 33

Quispe, E. (2003). *Aprovechamiento de los recursos hídricos en la sub cuenca Chila Coypacoypa con fines productivos*. (Tesis de Ingeniero Agrícola). U.N.A. Puno, Perú.

Requena, A., Nordenström, G., y Castillo, E. (2010). *Coeficientes de cultivo de manzano en período de formación, obtenidos en lisímetros de drenaje*. EEA INTA Alto Valle. 1: 1-7.

Sáez, M. (2016). *Determinación de la evapotranspiración mediante imágenes aéreas en bandas del espectro visible e infrarrojo cercano para cultivos de*

- papa solanum spp.* Tesis Biofísico Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Ciencias. Ecuador.
- Sánchez, M., y Carvacho, I. (2006). Estimación de evapotranspiración potencial, ETP, a partir de imágenes NOAAVHRR en la VI Región del Libertador General Bernardo O'Higgins. *Revista de Geografía Norte Grande*, 2006, (Nº 36), p. 49-60
- Sánchez, M., y Carvacho, I. (2011). Comparación de ecuaciones empíricas para el cálculo de la evapotranspiración de referencia en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, Chile, *Revista de Geografía Norte Grande*, 50: 171-186
- Sood, M.C. y Singh, N. (2003). *Water Management. En: Khurana, S.M.P., Minhas, J.S., Pandey, S.K., eds. The potato: Production and utilization in Sub- Tropics.* Nueva Delhi, India, Mehta Publishers, págs. 111-120.
- Tacon, Le., Vacher ,j., y Eldin, M. (1991). Los riesgos de helada en el Altiplano Boliviano, actas del VII Congreso Internacional sobre cultivos Andinos de Bolivia, Boletín INIA, Nº 331.
- Tapia, M. (1985). *Avances en la investigación sobre tubérculos alimenticios. Programa Nacional de Sistemas Andinos de Producción Agropecuaria*, INIPA. Lima.
- Tapia, M. y Fries, A. (2007). *Guía de campo de los cultivos andinos.* FAO y ANPE. Lima. 222 pág.
- Teixeira, E.I., Moot, D.J., Pollock, K.J. y Brown, H.E. (2007). *How does defoliation management affect yield, canopy forming processes and light interception in lucerne (Medicago sativa L.) crops. European Journal of Agronomy* 27, 154-164.
- Vásquez, A. (2000). *Manejo de Cuencas Alto andinas. Tomo I.* Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima-Perú. 512 p.

Vásquez, A., Vásquez, I., Vásquez, C. y Cañamero, M. (2017). *Fundamentos de la Ingeniería de riego*. Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima-Perú. 442 p.

Villon, M. (2002). *Hidrología Estadística*. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Ediciones Villon. Lima-Peru. 478 p.



**ANEXOS**

**Anexo 1.** Información meteorológica de las estaciones estudiadas.**Cuadro 17.** Información meteorológica promedio mensual - estación Ananea

Mes	Temp. min.	Temp. max.	Humedad relativa	Velocidad viento	Insolación
	°C	°C	%	m/s	Horas
Enero	-0.90	9.60	86.00	2.00	3.90
Febrero	-0.80	9.90	87.00	1.90	4.50
Marzo	-1.20	10.00	86.00	2.00	4.90
Abril	-1.50	10.50	84.00	2.10	6.40
Mayo	-2.40	10.80	77.00	2.00	8.00
Junio	-3.70	10.50	75.00	2.20	8.70
Julio	-3.90	10.30	78.00	2.20	8.60
Agosto	-3.80	10.60	78.00	2.10	8.60
Septiembre	-3.50	10.30	80.00	2.40	7.50
Octubre	-2.10	10.60	83.00	2.20	6.10
Noviembre	-1.70	10.60	85.00	2.00	5.70
Diciembre	-1.00	10.00	87.00	2.00	4.30
<b>Promedio</b>	<b>-2.20</b>	<b>10.30</b>	<b>82.00</b>	<b>2.10</b>	<b>6.40</b>

**Cuadro 18.** Información meteorológica promedio mensual - estación Arapa

Mes	Temp. Min.	Temp. Max.	Humedad relativa	Velocidad viento	Insolación
	°C	°C	%	m/s	horas
Enero	4.90	15.60	65.00	3.00	5.50
Febrero	4.90	15.60	68.00	2.90	5.90
Marzo	4.40	15.70	67.00	3.00	6.60
Abril	3.00	16.10	60.00	2.90	8.10
Mayo	0.20	16.00	52.00	2.80	9.20
Junio	-1.70	15.30	48.00	2.90	9.10
Julio	-2.30	15.30	48.00	3.00	9.00
Agosto	-1.00	16.10	48.00	3.10	9.00
Septiembre	1.30	16.80	49.00	3.40	9.00
Octubre	3.00	17.30	51.00	3.40	8.30
Noviembre	3.70	17.40	54.00	3.40	8.00
Diciembre	4.50	16.70	58.00	3.40	6.40
<b>Promedio</b>	<b>2.10</b>	<b>16.20</b>	<b>56.00</b>	<b>3.10</b>	<b>7.80</b>

**Cuadro 19.** Información meteorológica promedio mensual - estación Azángaro.

Mes	Temp. min.	Temp. max.	Humedad relativa	Velocidad viento	Insolación
	°C	°C	%	m/s	horas
Enero	4.80	15.70	70.00	2.20	4.50
Febrero	4.90	15.70	72.00	2.20	5.10
Marzo	4.20	15.70	70.00	2.00	5.80
Abril	2.30	16.20	67.00	2.00	7.60
Mayo	-1.60	16.10	60.00	2.10	8.90
Junio	-4.50	15.70	54.00	2.20	9.20
Julio	-4.70	15.70	53.00	2.40	9.30
Agosto	-2.90	16.40	52.00	2.60	8.50
Septiembre	0.30	17.10	55.00	2.90	8.00
Octubre	2.60	17.60	57.00	2.70	7.00
Noviembre	3.30	17.70	59.00	2.60	6.60
Diciembre	4.40	16.70	64.00	2.40	5.20
<b>Promedio</b>	<b>1.10</b>	<b>16.40</b>	<b>61.00</b>	<b>2.40</b>	<b>7.10</b>

**Cuadro 20.** Información meteorológica promedio mensual - estación Cabanillas.

Mes	Temp. min.	Temp. max.	Humedad relativa	Velocidad viento	Insolación
	°C	°C	%	m/s	horas
Enero	4.50	16.20	63.00	1.60	5.70
Febrero	4.60	15.90	64.00	1.50	6.50
Marzo	4.20	15.90	64.00	1.40	6.30
Abril	2.90	16.40	55.00	1.60	7.30
Mayo	0.30	16.30	44.00	1.90	9.30
Junio	-1.60	15.80	43.00	1.90	9.30
Julio	-2.10	15.80	43.00	2.10	9.20
Agosto	-0.40	16.40	43.00	2.20	9.00
Septiembre	1.40	17.10	43.00	2.20	8.60
Octubre	2.60	17.70	45.00	2.10	8.10
Noviembre	3.40	18.00	45.00	2.00	8.30
Diciembre	4.10	17.20	53.00	1.80	7.60
<b>Promedio</b>	<b>2.00</b>	<b>16.50</b>	<b>51.00</b>	<b>1.90</b>	<b>7.90</b>

**Cuadro 21.** Información meteorológica promedio mensual - estación Capachica.

Mes	Temp. min.	Temp. max.	Humedad relativa	Velocidad viento	Insolación
	°C	°C	%	m/s	horas
Enero	4.80	13.70	66.00	3.70	6.20
Febrero	4.80	13.50	66.00	3.50	6.60
Marzo	4.50	13.70	63.00	3.30	6.80
Abril	3.10	14.00	56.00	3.10	8.30
Mayo	0.40	13.60	48.00	3.00	9.20
Junio	-1.50	13.20	45.00	3.10	9.30
Julio	-2.00	13.00	45.00	3.20	9.60
Agosto	-0.80	13.50	45.00	3.50	9.40
Septiembre	1.20	13.90	49.00	3.90	9.00
Octubre	2.70	14.60	50.00	4.10	9.00
Noviembre	3.30	14.70	50.00	4.10	8.40
Diciembre	4.10	14.10	57.00	4.00	7.10
<b>Promedio</b>	<b>2.10</b>	<b>13.80</b>	<b>53.00</b>	<b>3.50</b>	<b>8.20</b>

**Cuadro 22.** Información meteorológica promedio mensual - estación Capazo.

Mes	Temp. min.	Temp. max.	Humedad relativa	Velocidad viento	Insolación
	°C	°C	%	m/s	horas
Enero	-1.00	14.00	86.00	2.50	5.50
Febrero	-1.00	13.50	88.00	2.00	5.80
Marzo	-1.60	13.70	88.00	1.80	5.90
Abril	-3.50	13.70	82.00	2.00	7.00
Mayo	-8.50	12.60	81.00	2.40	7.80
Junio	-11.00	12.60	79.00	2.00	7.60
Julio	-12.30	11.70	85.00	3.00	7.90
Agosto	-11.00	13.20	76.00	2.40	7.70
Septiembre	-8.60	13.80	71.00	2.60	7.70
Octubre	-7.30	15.40	66.00	2.50	7.40
Noviembre	-5.70	16.30	70.00	2.20	7.30
Diciembre	-3.20	15.60	76.00	2.20	6.50
<b>Promedio</b>	<b>-6.20</b>	<b>13.80</b>	<b>79.00</b>	<b>2.30</b>	<b>7.00</b>

**Cuadro 23.** Información meteorológica promedio mensual – estación Chuquibambilla.

Mes	Temp. min.	Temp. max.	Humedad relativa	Velocidad viento	Insolación
	°C	°C	%	m/s	horas
Enero	2.40	15.80	67.00	2.10	4.70
Febrero	2.60	15.80	68.00	2.00	5.40
Marzo	2.10	15.90	68.00	1.90	5.70
Abril	-0.50	16.20	62.00	1.80	7.20
Mayo	-5.50	15.80	56.00	1.70	8.80
Junio	-9.10	15.30	53.00	1.80	9.00
Julio	-9.80	15.30	51.00	1.90	9.20
Agosto	-7.90	16.40	49.00	2.10	8.70
Septiembre	-3.90	17.10	51.00	2.40	8.10
Octubre	-1.60	17.80	52.00	2.20	7.40
Noviembre	-0.40	17.90	55.00	2.20	7.00
Diciembre	1.20	16.80	61.00	2.10	5.90
<b>Promedio</b>	<b>-2.50</b>	<b>16.30</b>	<b>58.00</b>	<b>2.00</b>	<b>7.20</b>

**Cuadro 24.** Información meteorológica promedio mensual - estación Cojata.

Mes	Temp. min.	Temp. max.	Humedad relativa	Velocidad viento	Insolación
	°C	°C	%	m/s	horas
Enero	1.20	12.10	87.00	3.10	5.50
Febrero	1.20	12.20	87.00	3.30	5.90
Marzo	0.60	12.30	87.00	3.00	6.60
Abril	-2.10	12.70	83.00	2.60	8.10
Mayo	-5.70	12.30	79.00	2.30	9.20
Junio	-9.30	12.10	77.00	1.60	9.10
Julio	-10.20	11.80	71.00	2.50	9.00
Agosto	-9.60	12.80	77.00	3.00	9.00
Septiembre	-5.90	13.00	80.00	4.10	9.00
Octubre	-2.80	13.30	80.00	3.10	8.30
Noviembre	-1.30	13.70	83.00	3.30	8.00
Diciembre	0.10	12.90	85.00	3.10	6.40
<b>Promedio</b>	<b>-3.70</b>	<b>12.60</b>	<b>81.00</b>	<b>2.90</b>	<b>7.80</b>

**Cuadro 25.** Información meteorológica promedio mensual - estación Crucero.

Mes	Temp. min.	Temp. max.	Humedad relativa	Velocidad viento	Insolación
	°C	°C	%	m/s	horas
Enero	2.60	14.40	77.00	1.40	3.90
Febrero	2.70	14.40	77.00	1.40	4.50
Marzo	1.60	14.30	78.00	1.60	4.90
Abril	-1.00	14.80	75.00	1.40	6.40
Mayo	-5.50	15.10	70.00	1.10	8.00
Junio	-8.60	14.60	68.00	1.20	8.70
Julio	-9.30	14.30	68.00	1.40	8.60
Agosto	-7.80	14.90	68.00	1.60	8.60
Septiembre	-4.10	15.50	71.00	2.10	7.50
Octubre	-0.80	15.20	72.00	1.80	6.10
Noviembre	0.20	15.70	72.00	1.70	5.70
Diciembre	1.60	14.60	76.00	1.60	4.30
<b>Promedio</b>	<b>-2.40</b>	<b>14.80</b>	<b>73.00</b>	<b>1.50</b>	<b>6.40</b>

**Cuadro 26.** Información meteorológica promedio mensual - estación Desaguadero.

Mes	Temp. min.	Temp. max.	Humedad relativa	Velocidad viento	Insolación
	°C	°C	%	m/s	horas
Enero	4.90	15.10	65.00	4.50	6.80
Febrero	5.00	15.00	64.00	4.40	7.00
Marzo	4.70	15.20	63.00	4.20	7.20
Abril	2.40	15.00	60.00	4.20	8.10
Mayo	-2.00	14.30	56.00	4.00	8.30
Junio	-4.90	13.20	54.00	4.00	8.40
Julio	-5.00	12.80	56.00	4.20	8.60
Agosto	-3.30	13.70	57.00	4.40	8.60
Septiembre	-0.40	14.60	56.00	4.80	8.80
Octubre	1.50	15.80	54.00	4.80	8.50
Noviembre	2.50	16.30	53.00	4.90	8.50
Diciembre	4.10	15.80	59.00	4.60	7.80
<b>Promedio</b>	<b>0.80</b>	<b>14.70</b>	<b>58.00</b>	<b>4.40</b>	<b>8.00</b>

**Cuadro 27.** Información meteorológica promedio mensual - estación Huancafé.

Mes	Temp. min.	Temp. max.	Humedad relativa	Velocidad viento	Insolación
	°C	°C	%	m/s	horas
Enero	4.10	14.60	69.00	3.00	5.50
Febrero	4.00	14.60	68.00	2.90	5.90
Marzo	3.30	14.50	70.00	2.80	6.60
Abril	1.60	14.80	65.00	2.60	8.10
Mayo	-2.20	14.80	58.00	2.30	9.20
Junio	-4.40	14.20	56.00	2.10	9.10
Julio	-5.00	14.00	55.00	2.40	9.00
Agosto	-3.20	14.60	53.00	3.00	9.00
Septiembre	-0.10	15.30	55.00	3.40	9.00
Octubre	2.00	15.80	56.00	3.40	8.30
Noviembre	2.90	16.10	57.00	3.40	8.00
Diciembre	3.60	15.40	62.00	3.20	6.40
<b>Promedio</b>	<b>0.60</b>	<b>14.90</b>	<b>60.00</b>	<b>2.90</b>	<b>7.80</b>

**Cuadro 28.** Información meteorológica promedio mensual - estación Huaraya Moho.

Mes	Temp. min.	Temp. max.	Humedad relativa	Velocidad viento	Insolación
	°C	°C	%	m/s	horas
Enero	5.20	14.30	70.00	1.80	5.50
Febrero	5.20	14.30	69.00	1.80	5.90
Marzo	4.60	14.30	68.00	2.00	6.60
Abril	3.20	14.60	66.00	1.90	8.10
Mayo	1.00	14.20	62.00	1.60	9.20
Junio	-0.80	13.60	58.00	1.50	9.10
Julio	-1.00	13.70	56.00	1.80	9.00
Agosto	0.10	14.40	55.00	2.10	9.00
Septiembre	2.00	15.30	56.00	2.30	9.00
Octubre	3.60	15.70	57.00	2.30	8.30
Noviembre	4.10	15.90	60.00	2.30	8.00
Diciembre	4.80	15.00	65.00	2.00	6.40
<b>Promedio</b>	<b>2.70</b>	<b>14.60</b>	<b>62.00</b>	<b>1.90</b>	<b>7.80</b>

**Cuadro 29.** Información meteorológica promedio mensual - estación llave.

Mes	Temp. min.	Temp. max.	Humedad relativa	Velocidad viento	Insolación
	°C	°C	%	m/s	horas
Enero	4.50	14.80	72.00	3.10	6.40
Febrero	4.50	14.70	73.00	3.20	6.80
Marzo	4.30	14.60	72.00	2.80	6.80
Abril	2.50	14.90	66.00	2.90	8.20
Mayo	-0.70	14.50	56.00	3.00	9.10
Junio	-3.00	13.70	55.00	2.70	8.90
Julio	-3.50	13.50	56.00	2.90	9.20
Agosto	-2.10	14.30	56.00	3.20	9.00
Septiembre	0.10	15.00	57.00	3.40	9.00
Octubre	1.80	16.10	55.00	3.60	8.70
Noviembre	2.90	16.50	57.00	3.60	8.50
Diciembre	3.90	15.90	64.00	3.40	7.50
<b>Promedio</b>	<b>1.30</b>	<b>14.90</b>	<b>62.00</b>	<b>3.10</b>	<b>8.20</b>

**Cuadro 30.** Información meteorológica promedio mensual - estación Juli.

Mes	Temp. min.	Temp. max.	Humedad relativa	Velocidad viento	Insolación
	°C	°C	%	m/s	horas
Enero	4.90	13.90	68.00	2.60	6.50
Febrero	4.80	13.90	69.00	2.50	7.20
Marzo	4.60	13.90	69.00	2.40	7.30
Abril	3.20	14.10	61.00	2.40	8.50
Mayo	0.80	13.50	52.00	2.50	9.30
Junio	-0.80	12.80	47.00	2.50	9.30
Julio	-1.10	12.50	48.00	2.60	9.40
Agosto	0.00	13.10	49.00	2.80	9.20
Septiembre	1.90	13.80	53.00	3.00	9.50
Octubre	3.30	14.70	53.00	3.10	8.90
Noviembre	4.20	15.00	55.00	3.10	8.80
Diciembre	4.80	14.50	61.00	3.00	7.70
<b>Promedio</b>	<b>2.60</b>	<b>13.80</b>	<b>57.00</b>	<b>2.70</b>	<b>8.50</b>

**Cuadro 31.** Información meteorológica promedio mensual - estación Lampa.

Mes	Temp. min.	Temp. max.	Humedad relativa	Velocidad viento	Insolación
	°C	°C	%	m/s	horas
Enero	4.00	16.00	66.00	2.10	6.00
Febrero	3.90	15.80	67.00	2.10	6.30
Marzo	3.40	15.90	68.00	2.00	6.70
Abril	1.00	16.30	63.00	2.00	8.60
Mayo	-3.30	16.30	55.00	1.90	9.30
Junio	-5.70	15.70	52.00	2.00	9.20
Julio	-6.30	15.70	50.00	2.30	9.70
Agosto	-4.60	16.40	48.00	2.50	9.30
Septiembre	-1.90	17.20	49.00	2.60	8.90
Octubre	-0.20	17.70	51.00	2.50	8.50
Noviembre	1.10	18.00	50.00	2.50	8.70
Diciembre	2.90	17.00	58.00	2.30	7.30
<b>Promedio</b>	<b>-0.50</b>	<b>16.50</b>	<b>56.00</b>	<b>2.20</b>	<b>8.20</b>

**Cuadro 32.** Información meteorológica promedio mensual - estación Llalli.

Mes	Temp. min.	Temp. max.	Humedad relativa	Velocidad viento	Insolación
	°C	°C	%	m/s	horas
Enero	3.00	15.20	65.00	2.10	6.30
Febrero	3.10	15.10	66.00	2.00	6.70
Marzo	2.50	15.00	66.00	1.90	6.80
Abril	0.20	15.30	59.00	1.80	8.10
Mayo	-3.30	15.20	50.00	1.70	9.00
Junio	-6.10	14.70	47.00	1.80	8.80
Julio	-6.30	14.50	45.00	1.90	9.10
Agosto	-5.00	15.50	44.00	2.10	8.90
Septiembre	-2.10	16.70	45.00	2.40	8.90
Octubre	-0.20	17.50	48.00	2.20	8.60
Noviembre	0.50	17.40	49.00	2.20	8.40
Diciembre	2.10	16.30	58.00	2.10	7.50
<b>Promedio</b>	<b>-1.00</b>	<b>15.70</b>	<b>53.00</b>	<b>2.00</b>	<b>8.10</b>

**Cuadro 33.** Información meteorológica promedio mensual - estación Macusani.

Mes	Temp. min.	Temp. max.	Humedad relativa	Velocidad viento	Insolación
	°C	°C	%	m/s	horas
Enero	1.20	12.30	76.00	3.00	3.90
Febrero	1.30	12.00	77.00	3.00	4.50
Marzo	0.60	12.20	76.00	3.10	4.90
Abril	-0.70	12.60	73.00	3.00	6.40
Mayo	-3.90	12.90	72.00	2.90	8.00
Junio	-7.20	12.90	69.00	3.00	8.70
Julio	-7.80	12.40	70.00	3.20	8.60
Agosto	-6.40	13.00	70.00	3.20	8.60
Septiembre	-3.40	13.00	72.00	3.10	7.50
Octubre	-1.30	13.20	71.00	3.00	6.10
Noviembre	-0.20	13.30	72.00	3.00	5.70
Diciembre	0.90	12.60	73.00	3.00	4.30
<b>Promedio</b>	<b>-2.20</b>	<b>12.70</b>	<b>73.00</b>	<b>3.10</b>	<b>6.40</b>

**Cuadro 34.** Información meteorológica promedio mensual - estación Mañazo.

Mes	Temp. min.	Temp. max.	Humedad relativa	Velocidad viento	Insolación
	°C	°C	%	m/s	horas
Enero	4.30	16.00	64.00	1.40	6.20
Febrero	4.30	15.40	66.00	1.50	6.60
Marzo	3.60	15.50	68.00	1.40	6.80
Abril	1.70	16.10	59.00	1.50	8.30
Mayo	-0.90	16.30	42.00	1.80	9.20
Junio	-2.70	15.60	41.00	1.60	9.30
Julio	-2.80	15.60	40.00	1.80	9.60
Agosto	-1.80	16.60	41.00	1.90	9.40
Septiembre	0.00	17.60	41.00	2.00	9.00
Octubre	1.90	18.20	38.00	2.10	9.00
Noviembre	2.80	18.40	43.00	2.00	8.40
Diciembre	3.80	17.40	55.00	1.70	7.10
<b>Promedio</b>	<b>1.20</b>	<b>16.60</b>	<b>50.00</b>	<b>1.70</b>	<b>8.20</b>

**Cuadro 35.** Información meteorológica promedio mensual - estación Mazocruz.

Mes	Temp. min.	Temp. max.	Humedad relativa	Velocidad viento	Insolación
	°C	°C	%	m/s	horas
Enero	0.50	15.40	65.00	2.10	6.20
Febrero	0.30	15.10	68.00	2.10	6.60
Marzo	-0.50	15.50	67.00	1.90	6.70
Abril	-5.00	16.00	60.00	1.80	8.00
Mayo	-10.60	15.40	53.00	1.90	8.90
Junio	-13.30	14.60	50.00	2.00	8.60
Julio	-14.00	14.50	49.00	2.00	8.90
Agosto	-12.70	15.40	49.00	2.00	8.80
Septiembre	-9.80	16.30	52.00	2.20	8.80
Octubre	-7.70	17.60	49.00	2.10	8.40
Noviembre	-5.30	17.90	52.00	2.20	8.30
Diciembre	-2.00	16.90	57.00	2.10	7.30
<b>Promedio</b>	<b>-6.70</b>	<b>15.90</b>	<b>56.00</b>	<b>2.00</b>	<b>7.90</b>

**Cuadro 36.** Información meteorológica promedio mensual - estación Muñani.

Mes	Temp. min.	Temp. max.	Humedad relativa	Velocidad viento	Insolación
	°C	°C	%	m/s	horas
Enero	3.80	15.30	66.00	2.80	4.50
Febrero	3.70	15.40	65.00	2.70	5.10
Marzo	3.30	15.70	65.00	2.80	5.80
Abril	1.90	16.40	59.00	2.70	7.60
Mayo	-0.90	16.40	49.00	2.80	8.90
Junio	-2.70	15.90	45.00	2.80	9.20
Julio	-3.00	15.60	45.00	3.20	9.30
Agosto	-1.60	16.60	44.00	3.40	8.50
Septiembre	0.30	17.00	47.00	3.50	8.00
Octubre	1.60	17.20	50.00	3.30	7.00
Noviembre	2.40	17.00	53.00	3.00	6.60
Diciembre	3.30	16.30	58.00	2.90	5.20
<b>Promedio</b>	<b>1.00</b>	<b>16.20</b>	<b>54.00</b>	<b>3.00</b>	<b>7.10</b>

**Cuadro 37.** Información meteorológica promedio mensual - estación Pampahuta.

Mes	Temp. min.	Temp. max.	Humedad relativa	Velocidad viento	Insolación
	°C	°C	%	m/s	horas
Enero	-0.20	13.10	71.00	2.20	6.00
Febrero	-0.20	13.10	70.00	2.30	6.30
Marzo	-0.60	12.90	69.00	2.20	6.70
Abril	-3.00	13.30	64.00	2.20	8.60
Mayo	-7.30	13.40	54.00	2.40	9.30
Junio	-10.40	12.60	53.00	2.60	9.20
Julio	-11.50	12.70	52.00	2.70	9.70
Agosto	-10.40	13.60	50.00	2.70	9.30
Septiembre	-8.10	14.70	51.00	2.90	8.90
Octubre	-6.00	15.30	53.00	2.60	8.50
Noviembre	-4.20	15.20	56.00	2.50	8.70
Diciembre	-1.80	14.20	63.00	2.40	7.30
<b>Promedio</b>	<b>-5.30</b>	<b>13.70</b>	<b>59.00</b>	<b>2.50</b>	<b>8.20</b>

**Cuadro 38.** Información meteorológica promedio mensual - estación Pizacoma.

Mes	Temp. min.	Temp. max.	Humedad relativa	Velocidad viento	Insolación
	°C	°C	%	m/s	horas
Enero	3.00	16.20	53.00	3.00	6.10
Febrero	3.00	15.90	56.00	2.90	6.50
Marzo	2.10	16.30	55.00	3.20	6.60
Abril	-0.40	16.80	47.00	3.60	7.90
Mayo	-4.30	16.30	41.00	3.80	8.80
Junio	-6.60	15.60	41.00	3.90	8.50
Julio	-6.40	15.40	40.00	4.00	8.80
Agosto	-5.20	16.10	42.00	4.20	8.70
Septiembre	-2.90	17.40	39.00	3.90	8.70
Octubre	-1.60	18.40	36.00	3.70	8.30
Noviembre	0.00	19.10	37.00	3.30	8.20
Diciembre	2.10	17.90	42.00	3.30	7.20
<b>Promedio</b>	<b>-1.40</b>	<b>16.80</b>	<b>44.00</b>	<b>3.60</b>	<b>7.80</b>

**Cuadro 39.** Información meteorológica promedio mensual - estación Progreso.

Mes	Temp. min.	Temp. max.	Humedad relativa	Velocidad viento	Insolación
	°C	°C	%	m/s	horas
Enero	4.40	15.10	69.00	2.10	4.50
Febrero	4.30	15.20	68.00	2.30	5.10
Marzo	3.80	15.40	66.00	2.10	5.80
Abril	2.40	15.90	62.00	2.20	7.60
Mayo	-0.70	15.80	57.00	2.50	8.90
Junio	-2.70	15.40	53.00	2.60	9.20
Julio	-3.20	15.10	51.00	2.90	9.30
Agosto	-1.60	16.00	51.00	3.30	8.50
Septiembre	0.90	16.60	53.00	3.40	8.00
Octubre	2.60	17.10	56.00	3.10	7.00
Noviembre	3.20	17.00	56.00	2.70	6.60
Diciembre	3.90	16.00	62.00	2.30	5.20
<b>Promedio</b>	<b>1.40</b>	<b>15.90</b>	<b>59.00</b>	<b>2.60</b>	<b>7.10</b>

**Cuadro 40.** Información meteorológica promedio mensual - estación Pucara.

Mes	Temp. min.	Temp. max.	Humedad relativa	Velocidad viento	Insolación
	°C	°C	%	m/s	horas
Enero	4.10	16.30	71.00	2.20	4.50
Febrero	4.40	16.10	70.00	2.20	5.10
Marzo	3.50	16.20	72.00	2.00	5.80
Abril	0.80	16.70	67.00	2.00	7.60
Mayo	-4.20	16.80	60.00	2.10	8.90
Junio	-7.50	16.10	51.00	2.20	9.20
Julio	-7.60	16.00	52.00	2.40	9.30
Agosto	-5.70	17.20	56.00	2.60	8.50
Septiembre	-2.40	18.00	59.00	2.90	8.00
Octubre	0.50	18.30	64.00	2.70	7.00
Noviembre	1.40	18.40	63.00	2.60	6.60
Diciembre	2.70	17.60	67.00	2.40	5.20
<b>Promedio</b>	<b>-0.80</b>	<b>17.00</b>	<b>63.00</b>	<b>2.40</b>	<b>7.10</b>

**Cuadro 41.** Información meteorológica promedio mensual - estación Puno.

Mes	Temp. min.	Temp. max.	Humedad relativa	Velocidad viento	Insolación
	°C	°C	%	m/s	horas
Enero	5.50	15.20	62.00	3.00	6.20
Febrero	5.40	15.00	63.00	2.90	6.60
Marzo	5.10	14.80	63.00	2.70	6.80
Abril	3.50	14.90	55.00	2.60	8.30
Mayo	0.80	14.50	46.00	2.40	9.20
Junio	-0.90	13.80	42.00	2.40	9.30
Julio	-1.30	13.70	42.00	2.50	9.60
Agosto	0.00	14.50	44.00	2.70	9.40
Septiembre	1.90	15.40	45.00	3.00	9.00
Octubre	3.40	16.20	46.00	3.10	9.00
Noviembre	4.30	16.60	48.00	3.10	8.40
Diciembre	5.00	16.10	54.00	3.10	7.10
<b>Promedio</b>	<b>2.70</b>	<b>15.10</b>	<b>51.00</b>	<b>2.80</b>	<b>8.20</b>

**Cuadro 42.** Información meteorológica promedio mensual - estación Putina.

Mes	Temp. min.	Temp. max.	Humedad relativa	Velocidad viento	Insolación
	°C	°C	%	m/s	horas
Enero	4.10	15.80	85.00	2.60	4.50
Febrero	4.00	16.40	83.00	2.50	5.10
Marzo	2.90	16.50	82.00	2.50	5.80
Abril	1.10	16.90	76.00	2.20	7.60
Mayo	-2.80	16.90	73.00	2.50	8.90
Junio	-5.40	16.50	69.00	2.60	9.20
Julio	-5.60	16.60	71.00	2.90	9.30
Agosto	-4.20	17.70	67.00	2.10	8.50
Septiembre	-1.00	18.00	70.00	3.00	8.00
Octubre	1.40	18.30	70.00	3.10	7.00
Noviembre	2.30	18.40	75.00	3.00	6.60
Diciembre	3.50	17.10	80.00	2.90	5.20
<b>Promedio</b>	<b>0.00</b>	<b>17.10</b>	<b>75.00</b>	<b>2.70</b>	<b>7.10</b>

**Cuadro 43.** Información meteorológica promedio mensual - estación Santa Lucia.

Mes	Temp. min.	Temp. max.	Humedad relativa	Velocidad viento	Insolación
	°C	°C	%	m/s	horas
Enero	2.40	15.80	71.00	2.80	6.00
Febrero	2.80	15.50	71.00	2.90	6.30
Marzo	1.90	15.70	73.00	2.90	6.70
Abril	-1.20	15.90	68.00	2.70	8.60
Mayo	-6.00	15.90	62.00	3.10	9.30
Junio	-9.40	15.80	63.00	3.00	9.20
Julio	-9.00	14.20	65.00	3.40	9.70
Agosto	-8.50	16.20	64.00	3.10	9.30
Septiembre	-5.80	17.10	64.00	3.00	8.90
Octubre	-3.30	18.10	61.00	3.00	8.50
Noviembre	-1.90	18.70	63.00	2.80	8.70
Diciembre	1.00	17.30	68.00	2.80	7.30
<b>Promedio</b>	<b>-3.10</b>	<b>16.30</b>	<b>66.00</b>	<b>3.00</b>	<b>8.20</b>

**Cuadro 44.** Información meteorológica promedio mensual - estación Santa Rosa.

Mes	Temp. min.	Temp. max.	Humedad relativa	Velocidad viento	Insolación
	°C	°C	%	m/s	horas
Enero	5.60	15.30	69.00	3.00	4.70
Febrero	5.70	15.20	69.00	2.60	5.40
Marzo	4.90	15.10	72.00	2.50	5.70
Abril	2.50	15.70	66.00	2.50	7.20
Mayo	-2.50	15.70	60.00	2.50	8.80
Junio	-5.80	15.30	53.00	2.60	9.00
Julio	-6.50	15.10	51.00	3.00	9.20
Agosto	-4.20	16.30	48.00	2.90	8.70
Septiembre	0.70	17.20	52.00	3.10	8.10
Octubre	3.50	17.60	54.00	3.10	7.40
Noviembre	5.00	18.10	54.00	2.90	7.00
Diciembre	5.50	16.80	61.00	2.80	5.90
<b>Promedio</b>	<b>1.20</b>	<b>16.10</b>	<b>59.00</b>	<b>2.80</b>	<b>7.20</b>

**Cuadro 45.** Información meteorológica promedio mensual - estación Taraco.

Mes	Temp. min.	Temp. max.	Humedad relativa	Velocidad viento	Insolación
	°C	°C	%	m/s	horas
Enero	5.10	15.40	74.00	2.80	5.30
Febrero	5.00	15.30	78.00	2.70	5.50
Marzo	3.90	15.30	77.00	2.80	6.30
Abril	-0.20	15.90	67.00	2.50	7.90
Mayo	-5.00	16.10	57.00	2.60	9.10
Junio	-7.70	15.40	51.00	2.80	9.30
Julio	-8.20	15.30	50.00	3.20	9.30
Agosto	-5.80	15.90	52.00	3.00	9.00
Septiembre	-2.10	16.80	54.00	3.00	8.50
Octubre	1.70	17.30	57.00	2.90	8.10
Noviembre	2.80	17.50	59.00	2.90	7.30
Diciembre	4.30	16.80	67.00	2.90	6.30
<b>Promedio</b>	<b>-0.50</b>	<b>16.10</b>	<b>62.00</b>	<b>2.80</b>	<b>7.70</b>

**Cuadro 46.** Información meteorológica promedio mensual - estación Yunguyo.

Mes	Temp. min.	Temp. max.	Humedad relativa	Velocidad viento	Insolación
	°C	°C	%	m/s	horas
Enero	4.00	14.60	68.00	2.00	6.80
Febrero	3.90	14.60	71.00	1.80	7.00
Marzo	3.60	14.60	72.00	1.80	7.20
Abril	2.00	14.80	66.00	1.60	8.10
Mayo	-0.70	14.20	57.00	1.90	8.30
Junio	-2.50	13.10	53.00	1.80	8.40
Julio	-2.60	12.70	56.00	1.90	8.60
Agosto	-1.10	13.60	56.00	1.90	8.60
Septiembre	0.60	14.40	58.00	1.90	8.80
Octubre	2.10	15.50	56.00	2.00	8.50
Noviembre	3.10	16.10	58.00	1.90	8.50
Diciembre	3.70	15.50	64.00	2.10	7.80
<b>Promedio</b>	<b>1.30</b>	<b>14.50</b>	<b>61.00</b>	<b>1.90</b>	<b>8.00</b>

Anexo 2. Cálculo de la evapotranspiración de referencia.

Cuadro 47. Calculo de ETo método Penman-Monteith, estación Ananea

ETo Penman-Monteith Mensual - D:\ETo Penman Monteith\ANANEA.PEM

País: PERU Estación: ANANEA

Altitud: 4660 m. Latitud: 14.70 °S Longitud: 69.50 °W

Mes	Temp Min	Temp Max	Humedad	Viento	Insolación	Rad	ETo
	°C	°C	%	m/s	horas	MJ/m²/día	mm/mes
Enero	-0.9	9.6	86	2.0	3.9	16.4	76.83
Febrero	-0.8	9.9	87	1.9	4.5	17.1	71.12
Marzo	-1.2	10.0	86	2.0	4.9	16.8	76.31
Abril	-1.5	10.5	84	2.1	6.4	17.3	73.39
Mayo	-2.4	10.8	77	2.0	8.0	17.5	75.22
Junio	-3.7	10.5	75	2.2	8.7	17.2	69.32
Julio	-3.9	10.3	78	2.2	8.6	17.6	71.60
Agosto	-3.8	10.6	78	2.1	8.6	19.5	81.72
Septiembre	-3.5	10.3	80	2.4	7.5	20.0	83.05
Octubre	-2.1	10.6	83	2.2	6.1	19.2	86.19
Noviembre	-1.7	10.6	85	2.0	5.7	19.1	84.49
Diciembre	-1.0	10.0	87	2.0	4.3	17.0	78.89
Promedio	-2.2	10.3	82	2.1	6.4	17.9	928.11

Cuadro 48. Calculo de ETo método Penman-Monteith, estación Arapa.

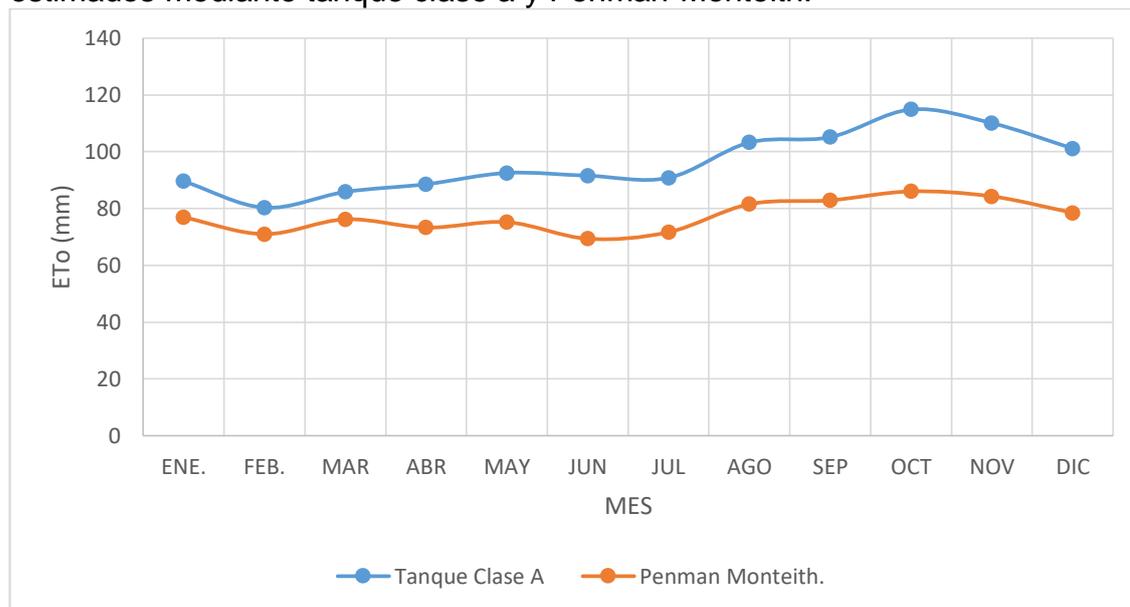
ETo Penman-Monteith Mensual - D:\ETo Penman Monteith\ARAPA.PEM

País: PERU Estación: ARAPA

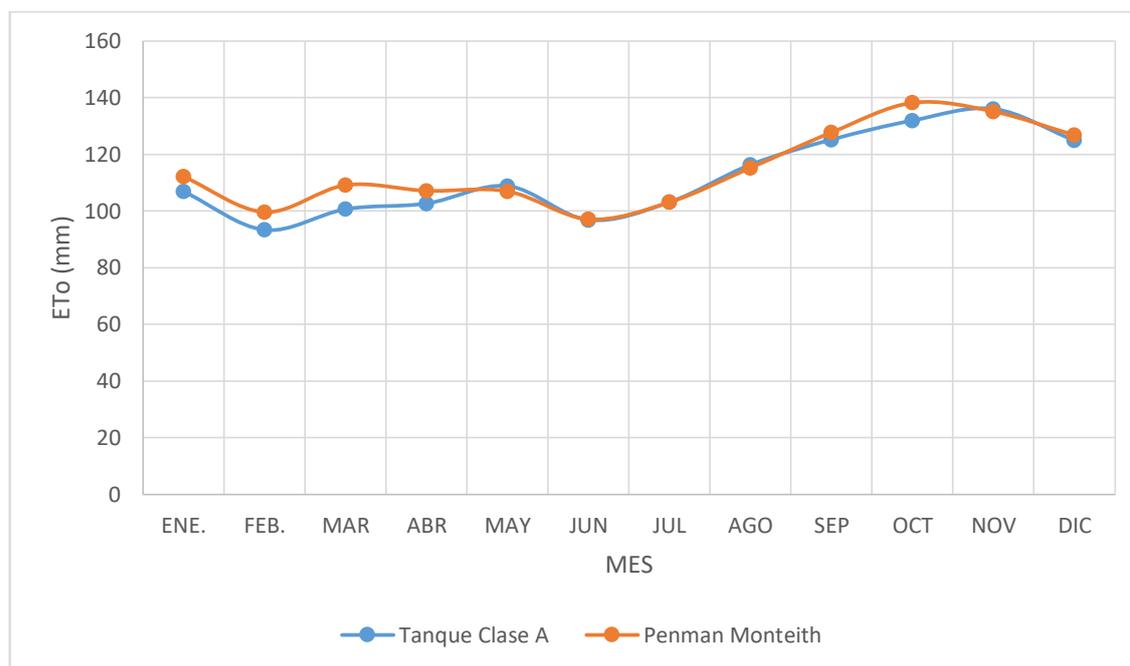
Altitud: 3830 m. Latitud: 15.10 °S Longitud: 70.10 °W

Mes	Temp Min	Temp Max	Humedad	Viento	Insolación	Rad	ETo
	°C	°C	%	m/s	horas	MJ/m²/día	mm/mes
Enero	4.9	15.6	65	3.0	5.5	19.0	112.27
Febrero	4.9	15.6	68	2.9	5.9	19.3	99.80
Marzo	4.4	15.7	67	3.0	6.6	19.4	109.26
Abril	3.0	16.1	61	2.9	8.1	19.7	107.07
Mayo	0.2	16.0	52	2.8	9.2	18.9	106.95
Junio	-1.7	15.3	48	2.9	9.1	17.6	97.19
Julio	-2.3	15.3	48	3.0	9.0	18.0	103.23
Agosto	-1.0	16.1	48	3.1	9.0	19.9	115.43
Septiembre	1.3	16.8	49	3.4	9.0	22.2	127.71
Octubre	3.0	17.3	51	3.4	8.3	22.7	138.37
Noviembre	3.7	17.4	54	3.4	8.0	22.8	135.21
Diciembre	4.5	16.7	59	3.4	6.4	20.4	126.97
Promedio	2.1	16.2	56	3.1	7.8	20.0	1379.46

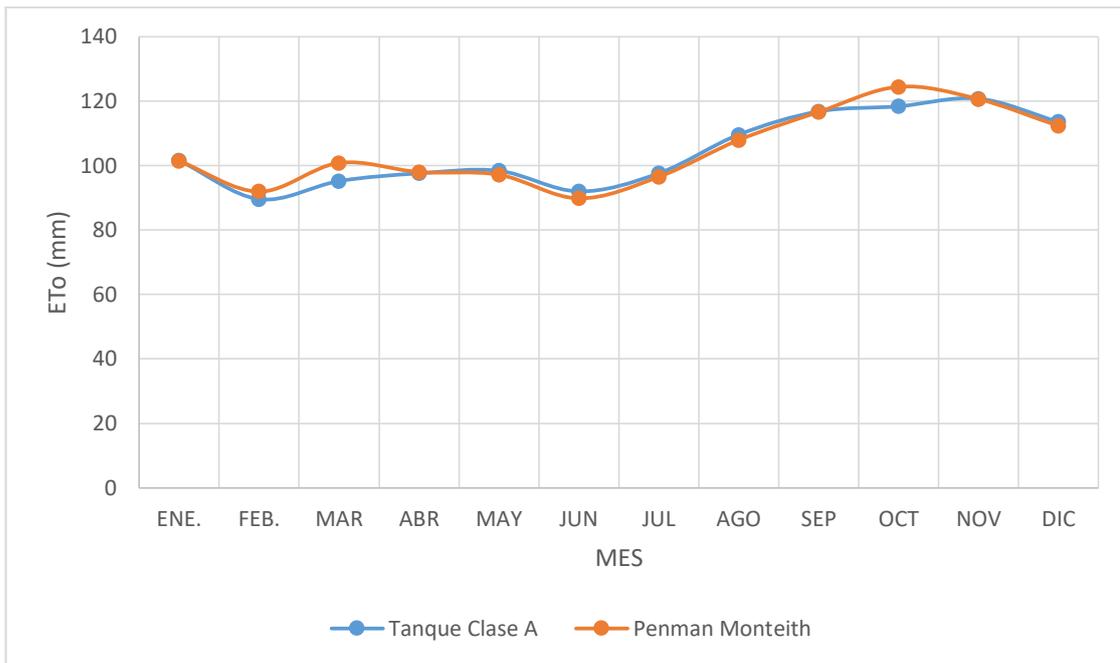
**Anexo 3.** Gráficos de la variación de la evapotranspiración de referencia estimados mediante tanque clase a y Penman-Monteith.



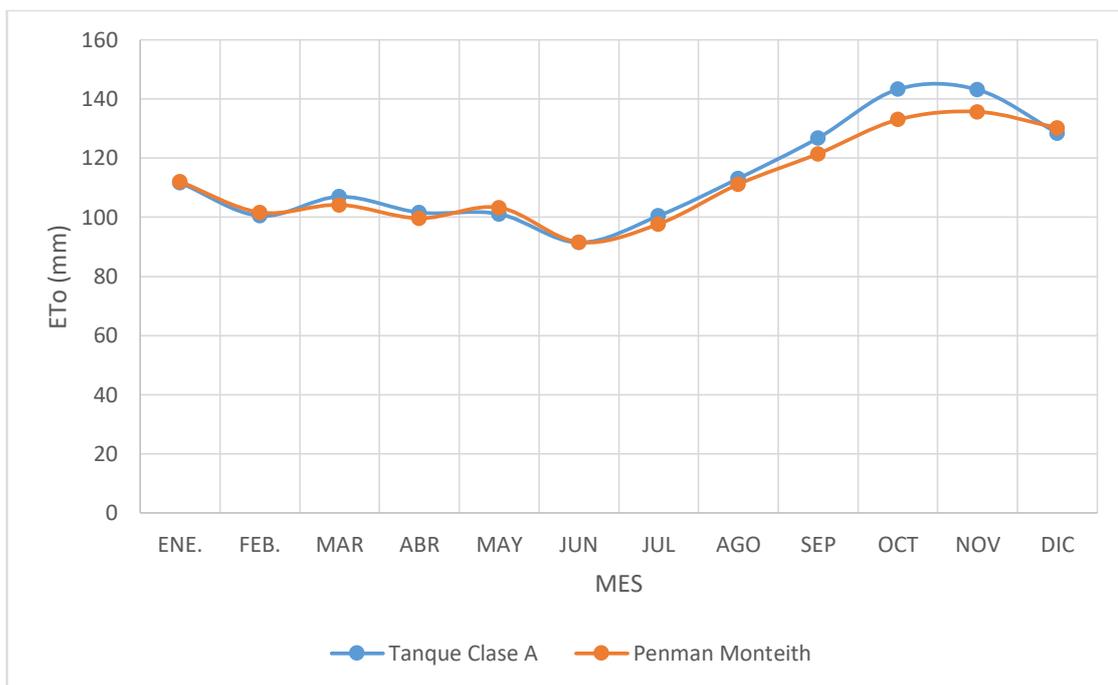
**Figura 23.** Variación mensual de la evapotranspiración de referencia (mm) - Estación Ananea



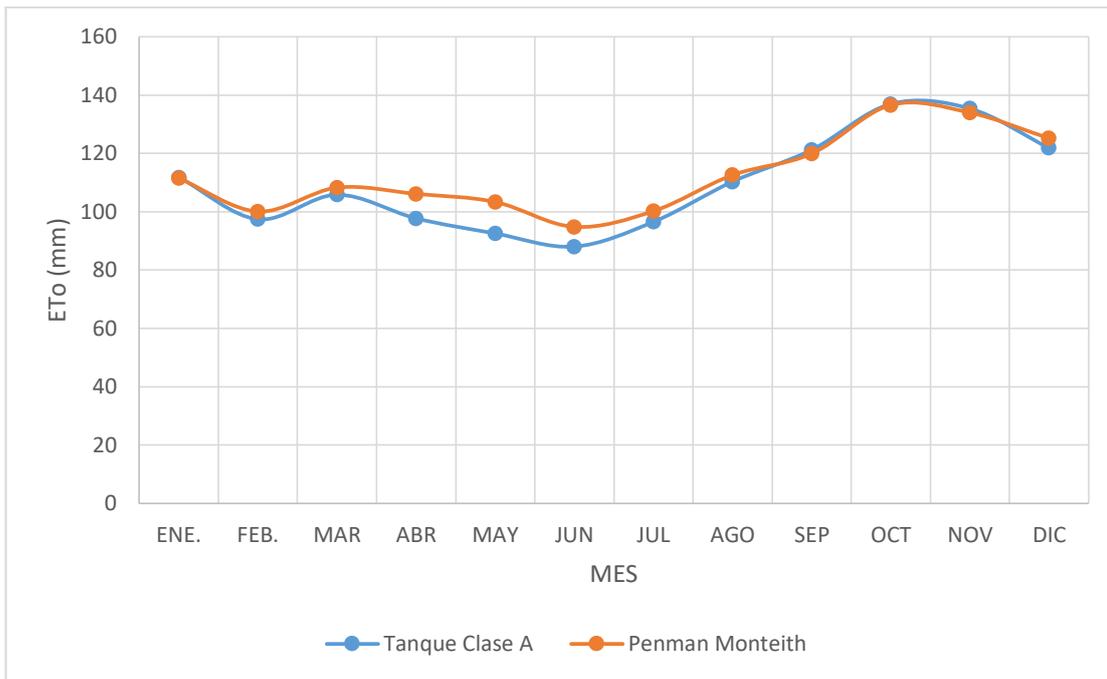
**Figura 24.** Variación mensual de la evapotranspiración de referencia (mm) Estación Arapa.



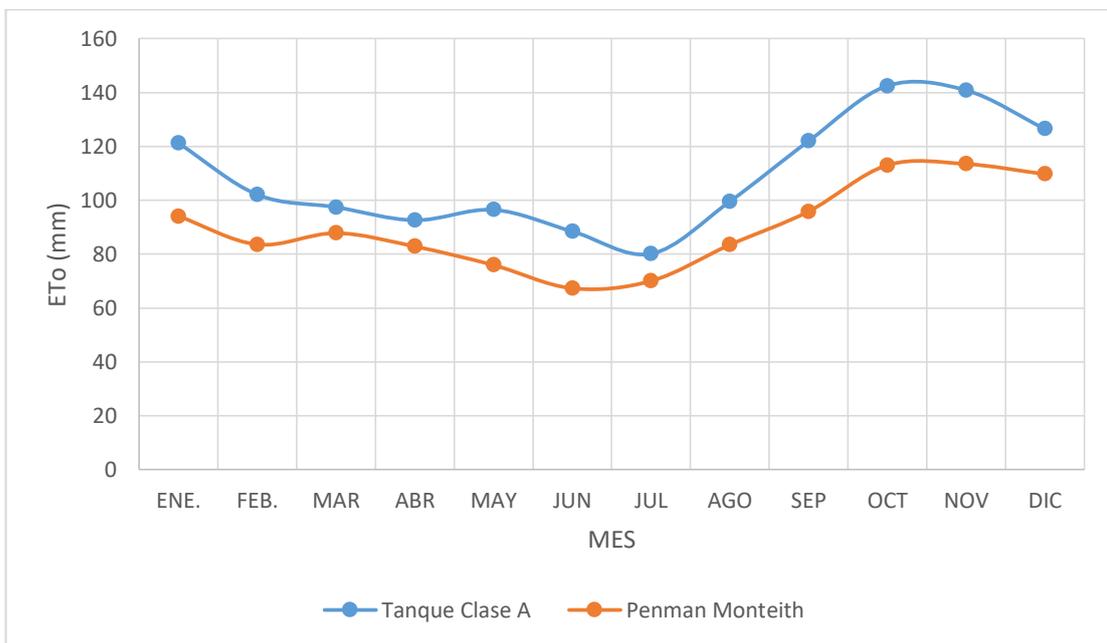
**Figura 25.** Variación mensual de la evapotranspiración de referencia (mm) Estación Azángaro



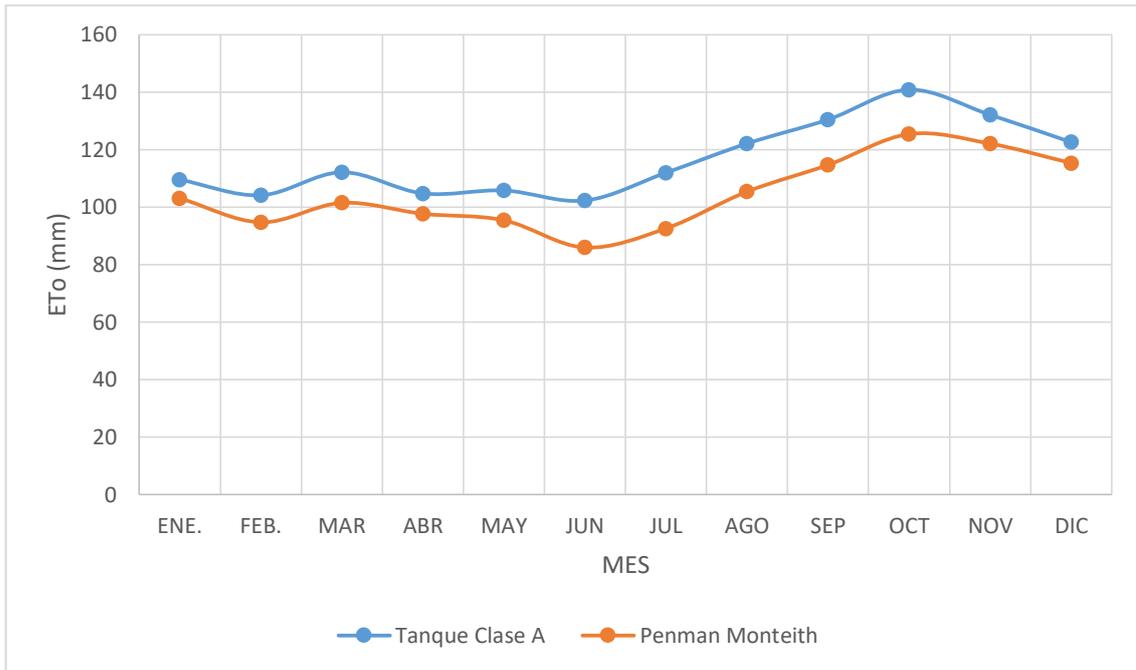
**Figura 26.** Variación mensual de la evapotranspiración de referencia (mm) Estación Cabanillas



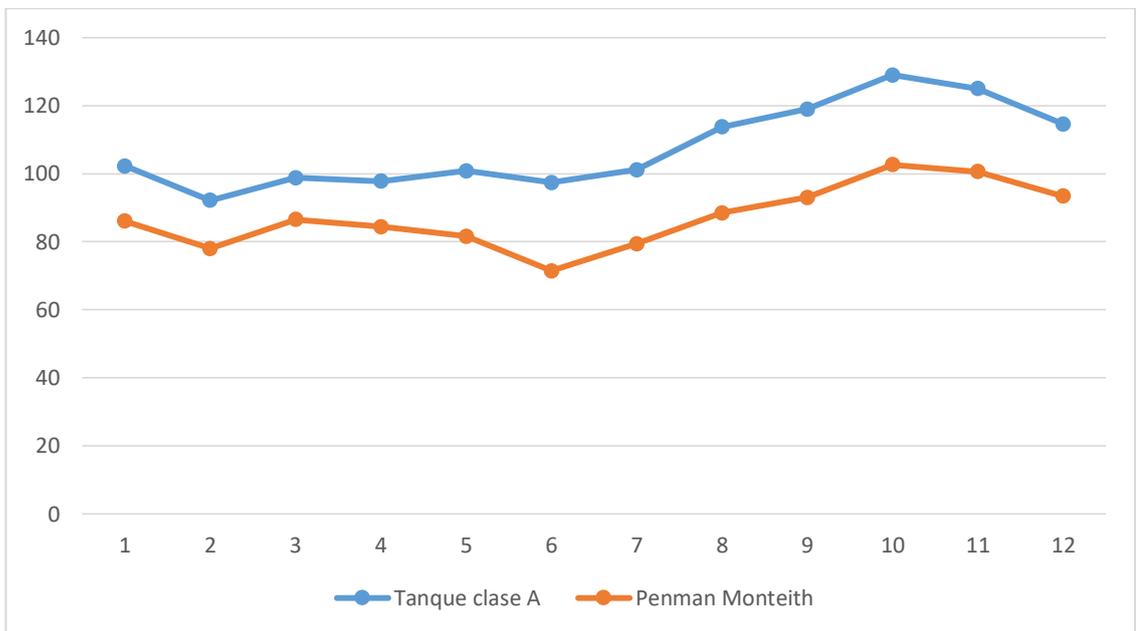
**Figura 27.** Variación mensual de la evapotranspiración de referencia (mm) Estación Capachica.



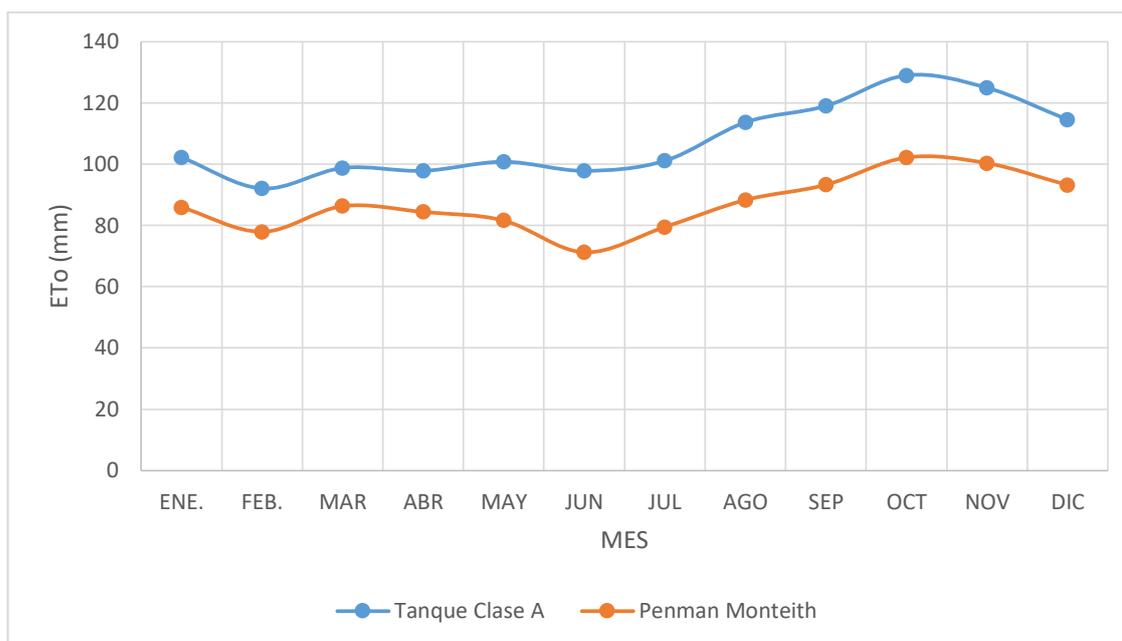
**Figura 28.** Variación mensual de la evapotranspiración de referencia (mm) Estación Capazo.



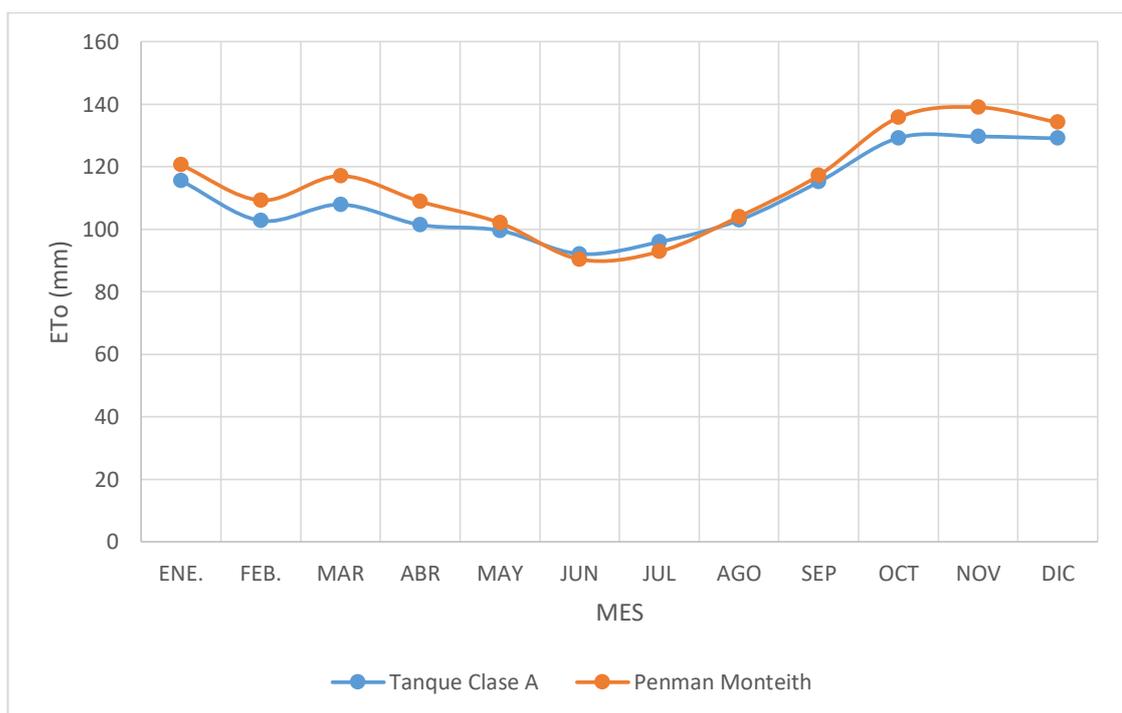
**Figura 29.** Variación mensual de la evapotranspiración de referencia (mm) Estación Chuquibambilla



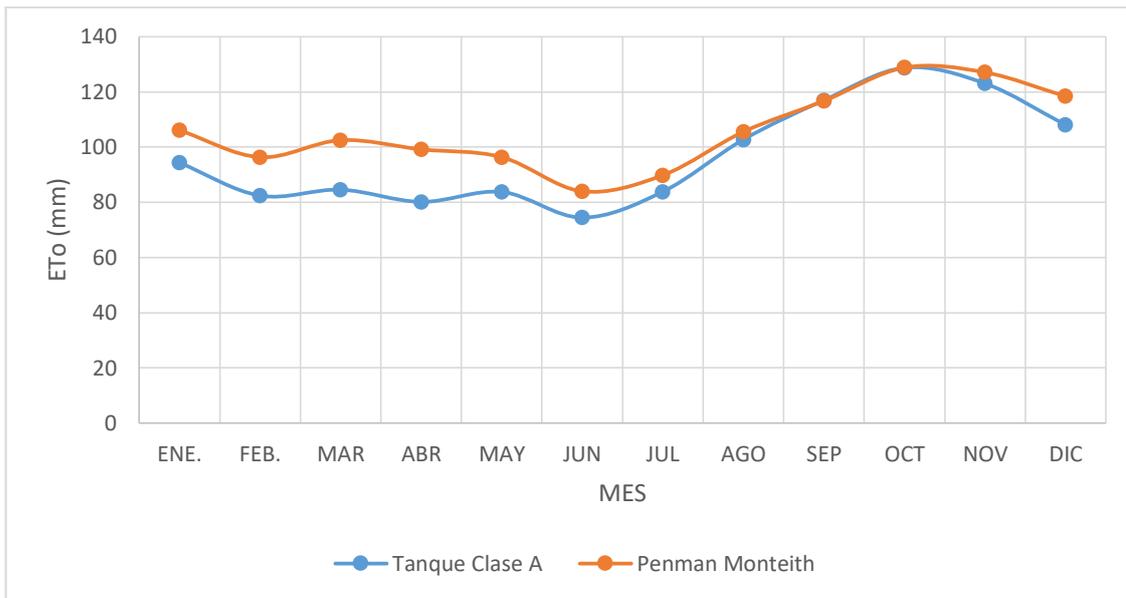
**Figura 30.** Variación mensual de la evapotranspiración de referencia (mm) Estación Cojata



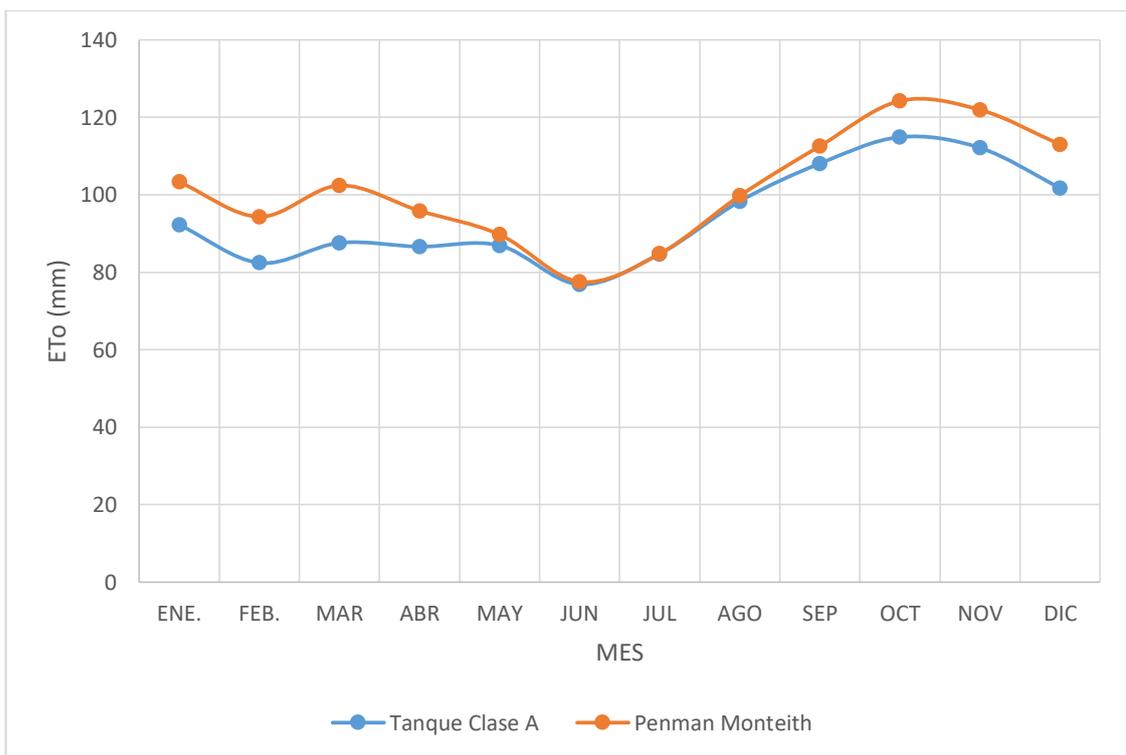
**Figura 31.** Variación mensual de la evapotranspiración de referencia (mm) Estación Crucero.



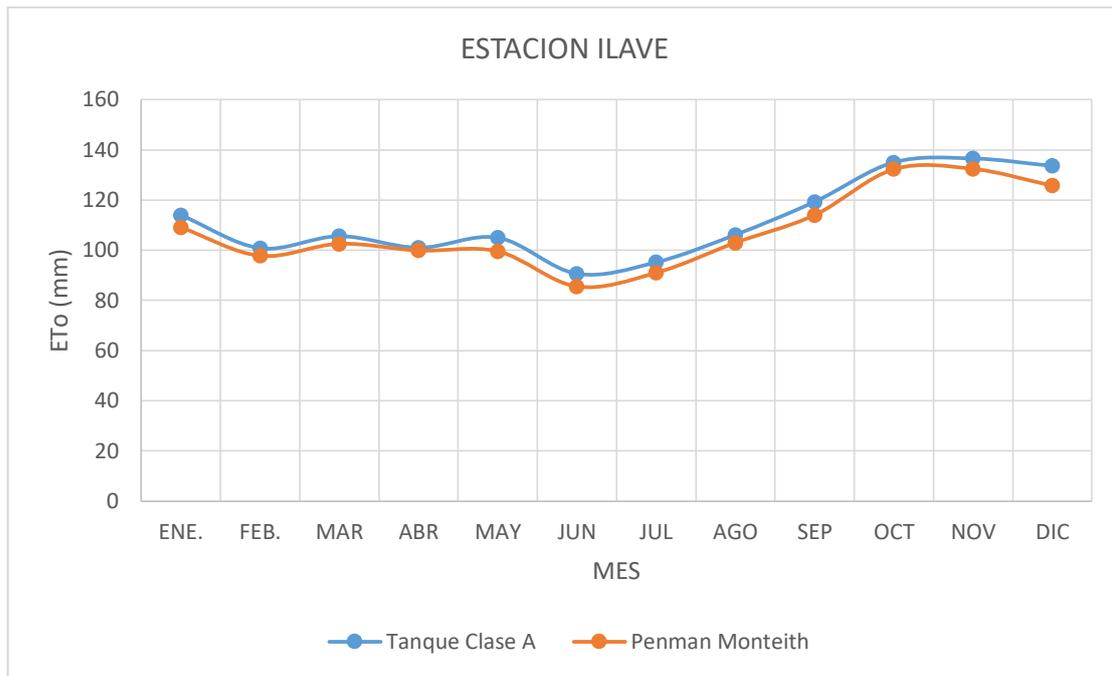
**Figura 32.** Variación mensual de la evapotranspiración de referencia (mm) Estación Desaguadero.



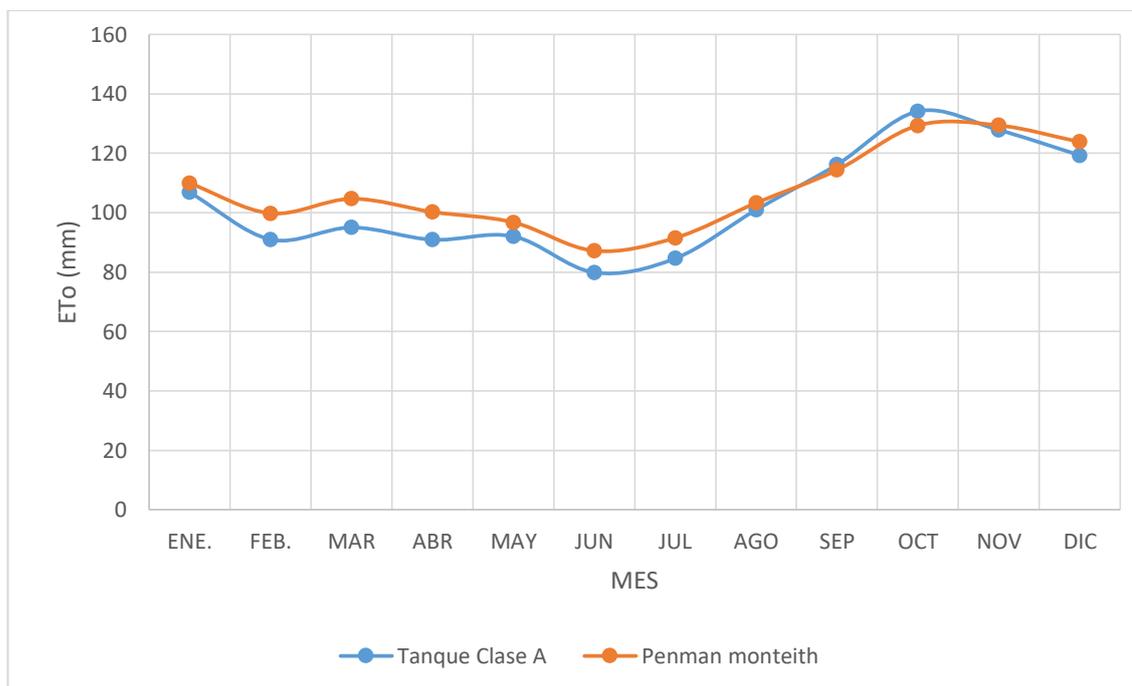
**Figura 33.** Variación mensual de la evapotranspiración de referencia (mm) Estación Huancane



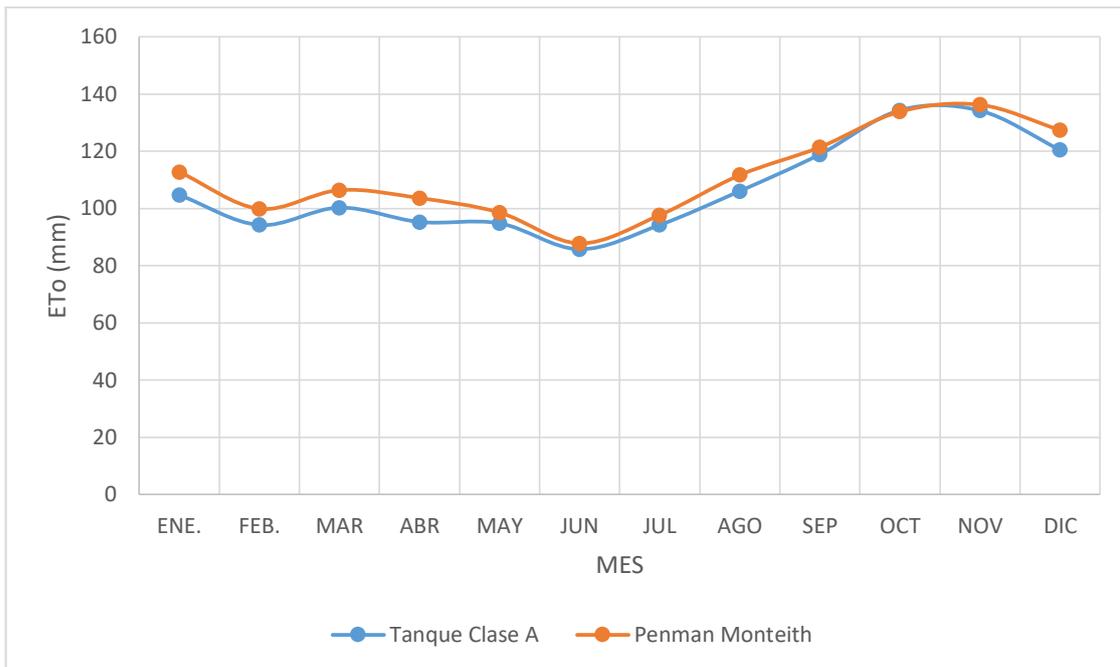
**Figura 34.** Variación mensual de la evapotranspiración de referencia (mm) Estación Huaraya Moho.



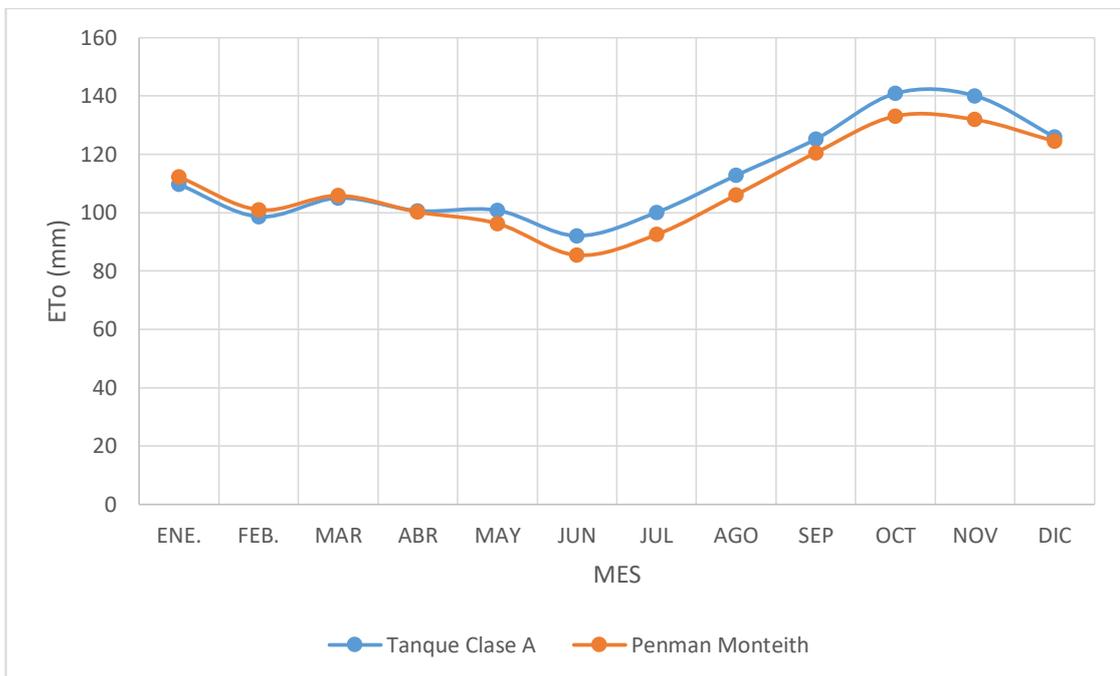
**Figura 35.** Variación mensual de la evapotranspiración de referencia (mm) Estación Ilave.



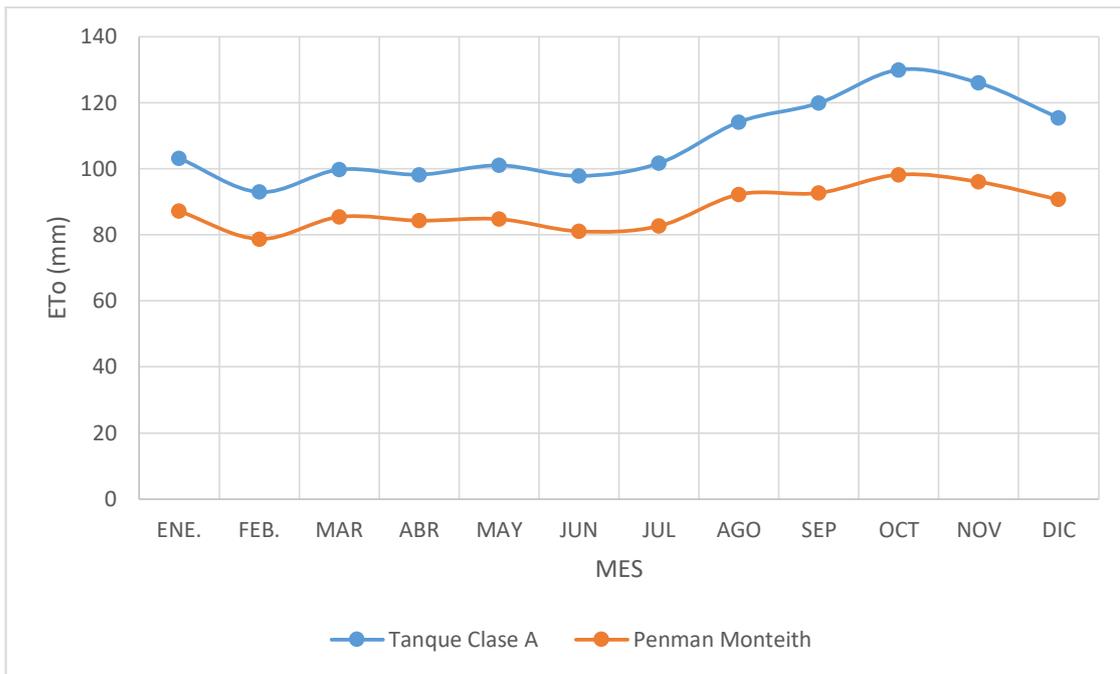
**Figura 36.** Variación mensual de la evapotranspiración de referencia (mm) Estación Juli



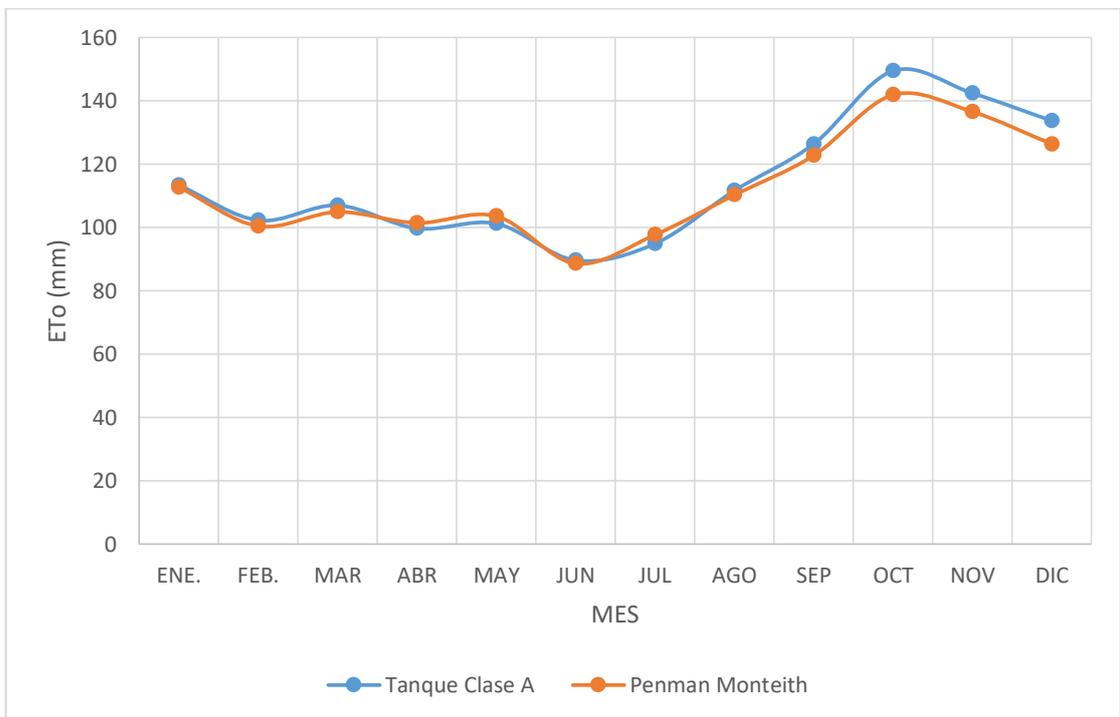
**Figura 37.** Variación mensual de la evapotranspiración de referencia (mm) Estación Lampa.



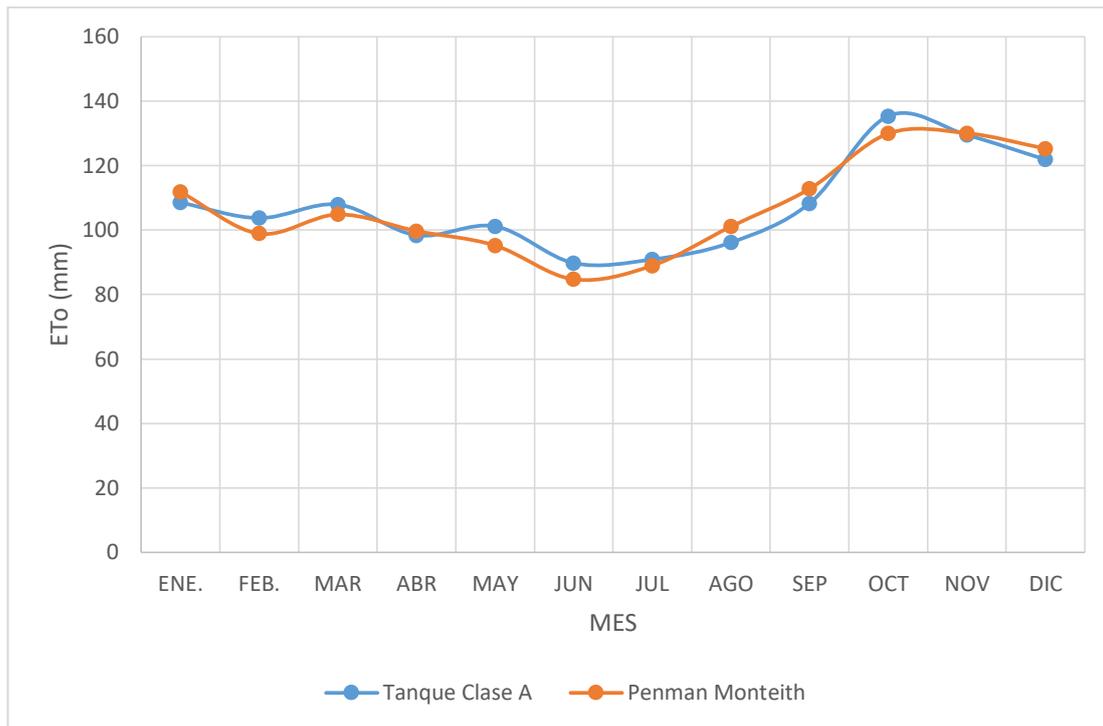
**Figura 38.** Variación mensual de la evapotranspiración de referencia (mm) Estación Llalli.



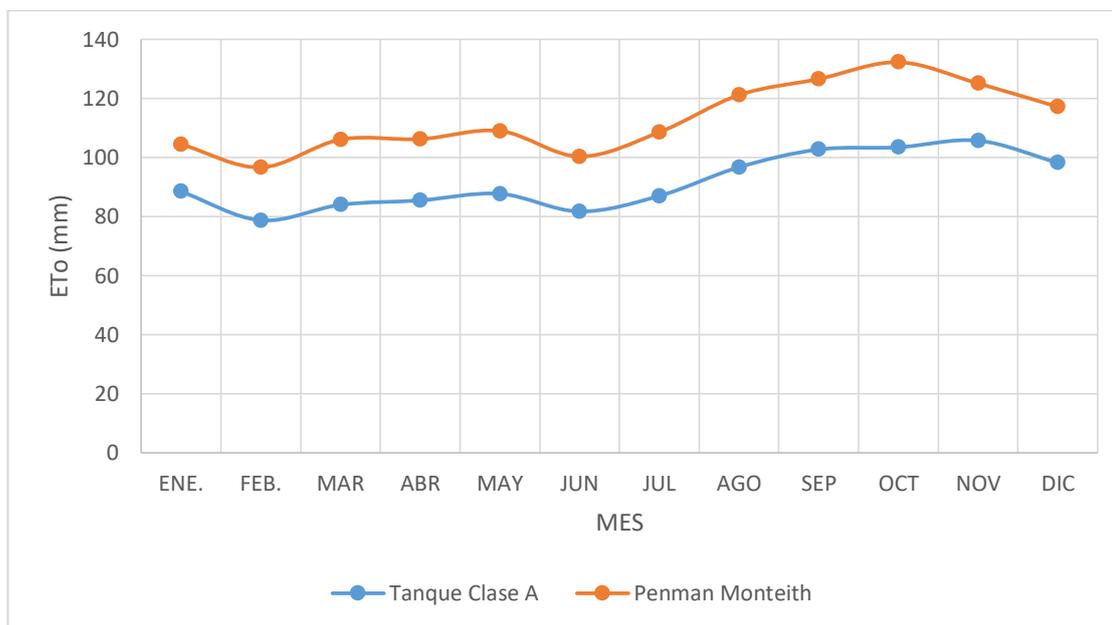
**Figura 39.** Variación mensual de la evapotranspiración de referencia (mm) Estación Macusani



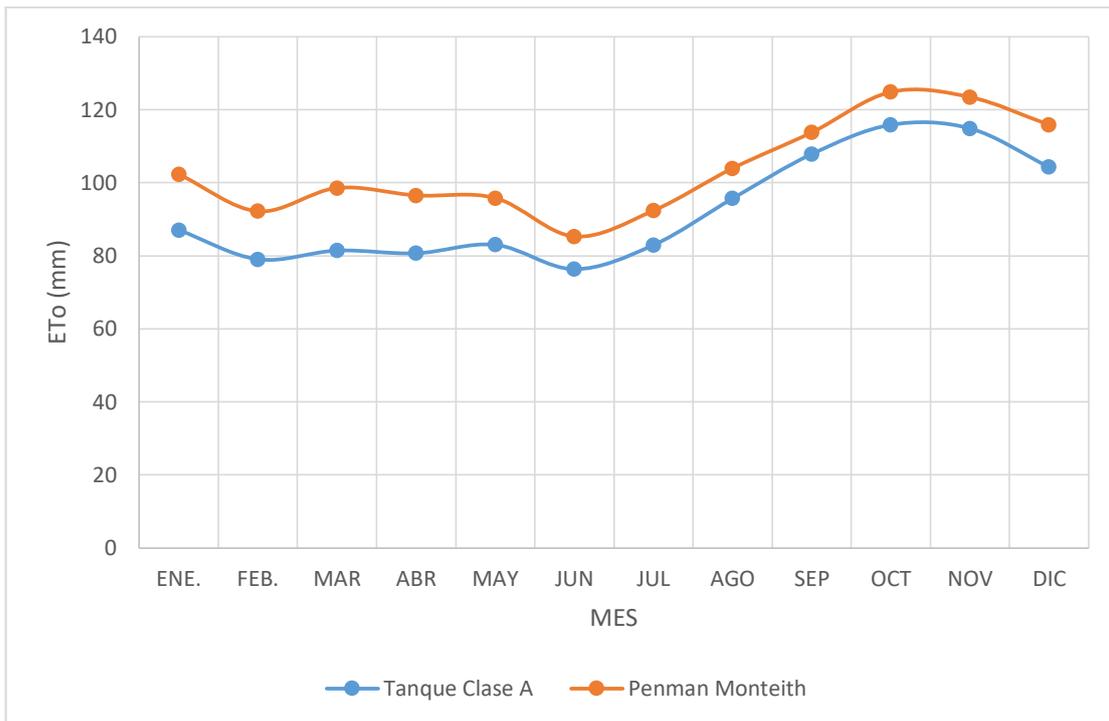
**Figura 40.** Variación mensual de la evapotranspiración de referencia (mm) Estación Mañazo.



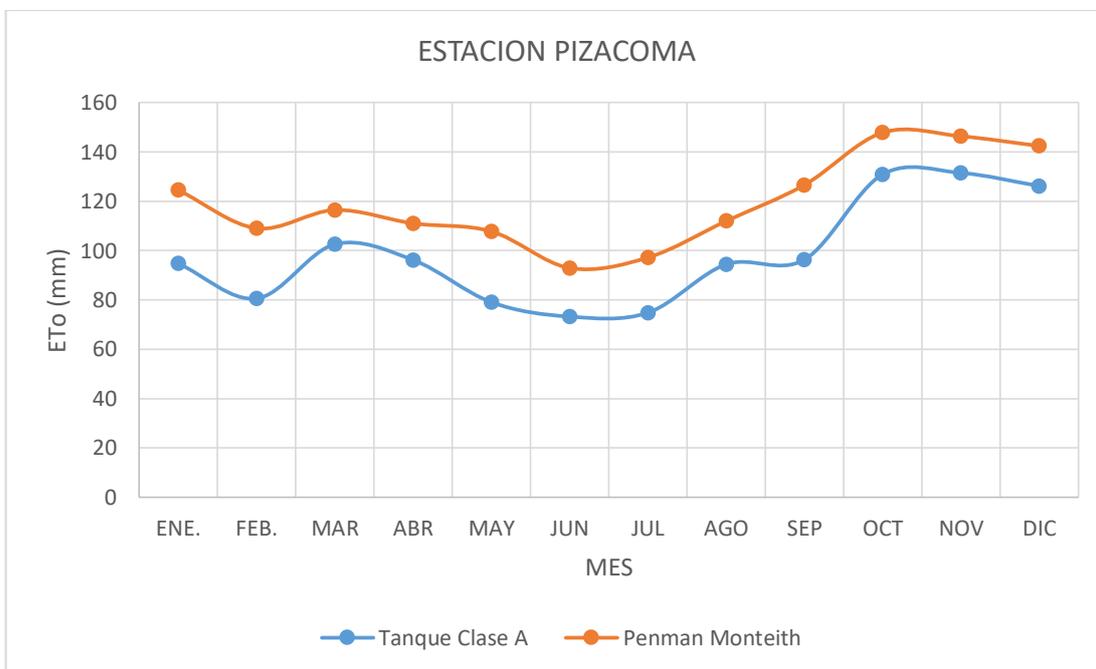
**Figura 41.** Variación mensual de la evapotranspiración de referencia (mm) Estación Mazo cruz



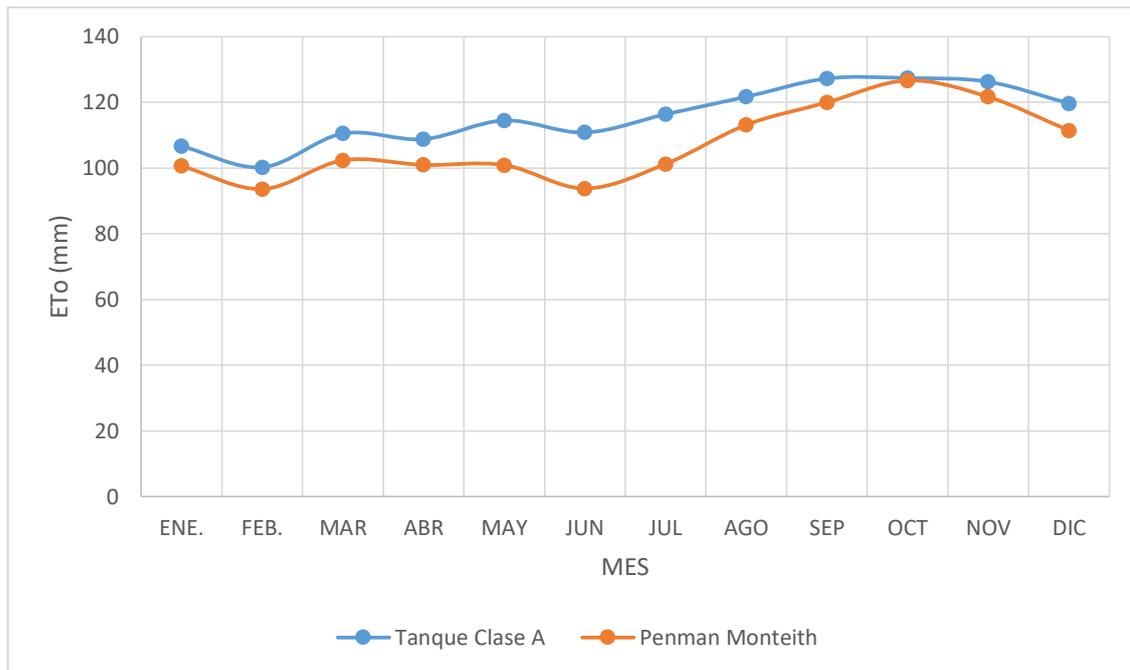
**Figura 42.** Variación mensual de la evapotranspiración de referencia (mm) Estación Muñani.



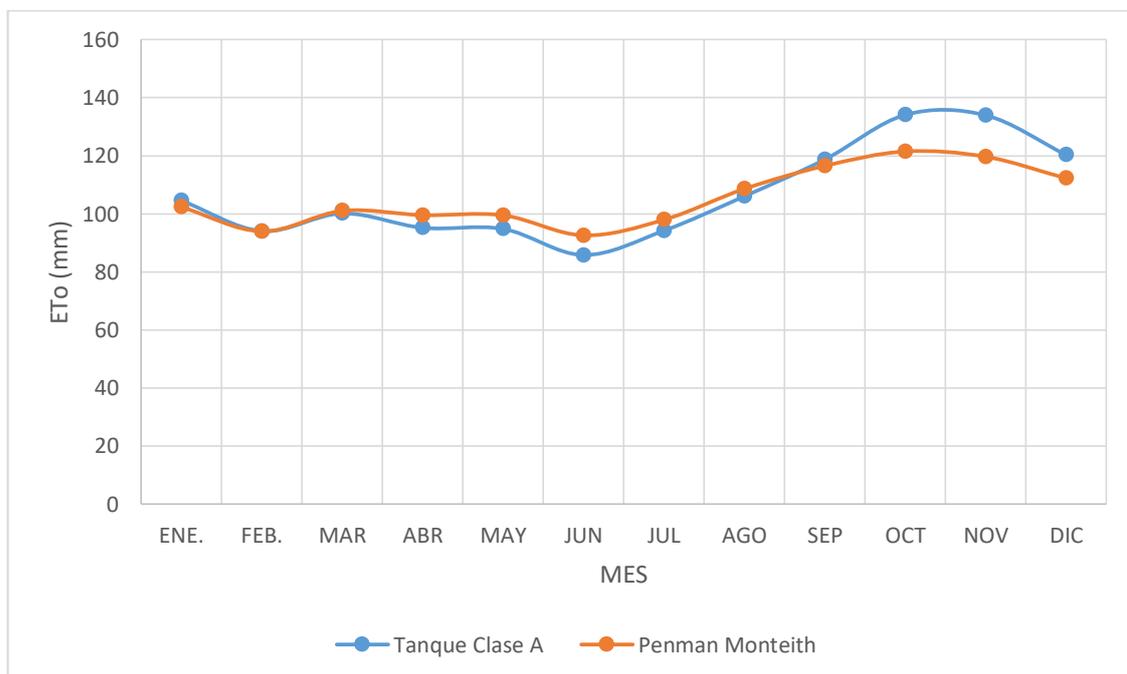
**Figura 43.** Variación mensual de la evapotranspiración de referencia (mm) Estación Pampahuta.



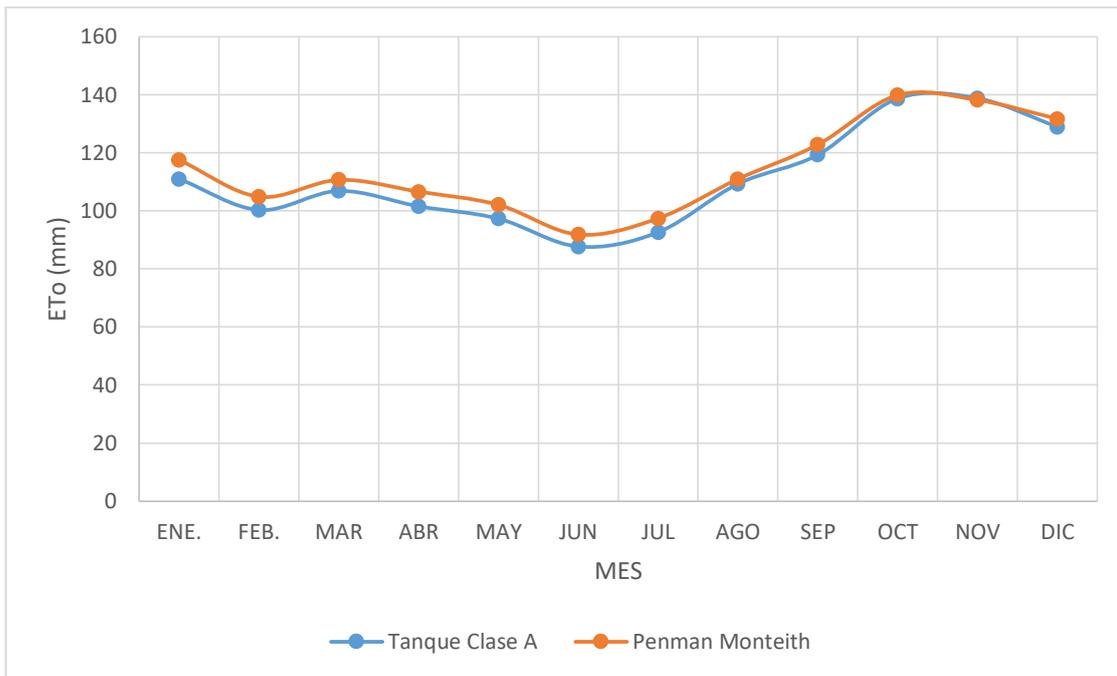
**Figura 44.** Variación mensual de la evapotranspiración de referencia (mm) Estación Pizacoma.



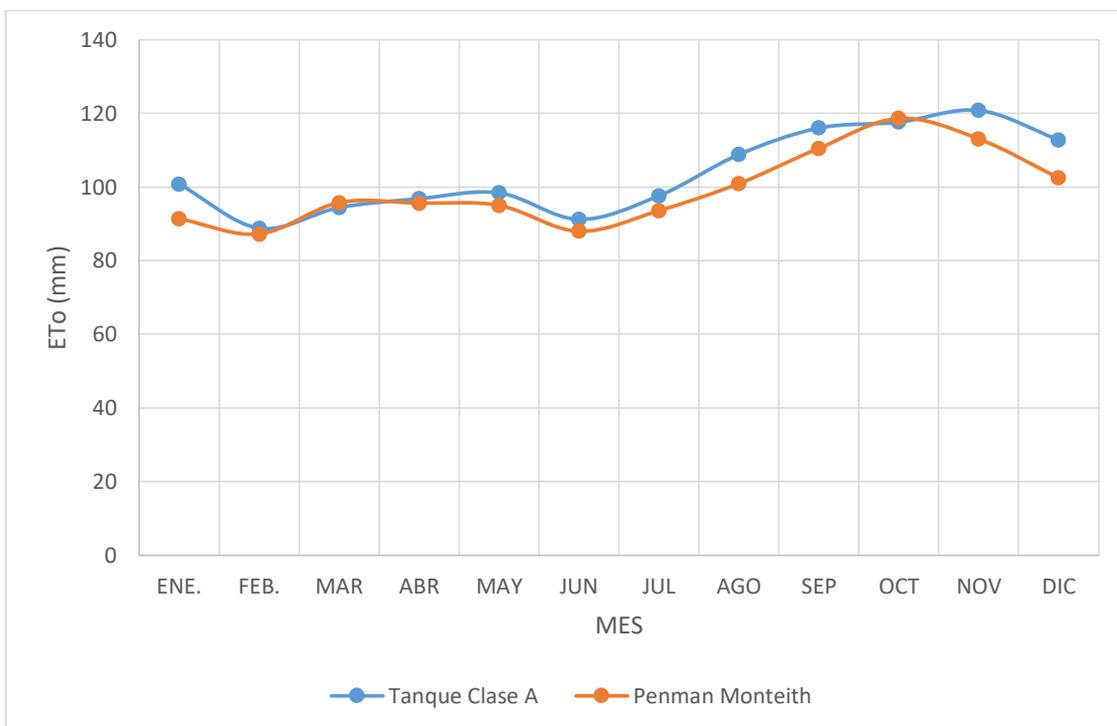
**Figura 45.** Variación mensual de la evapotranspiración de referencia (mm) Estación Progreso.



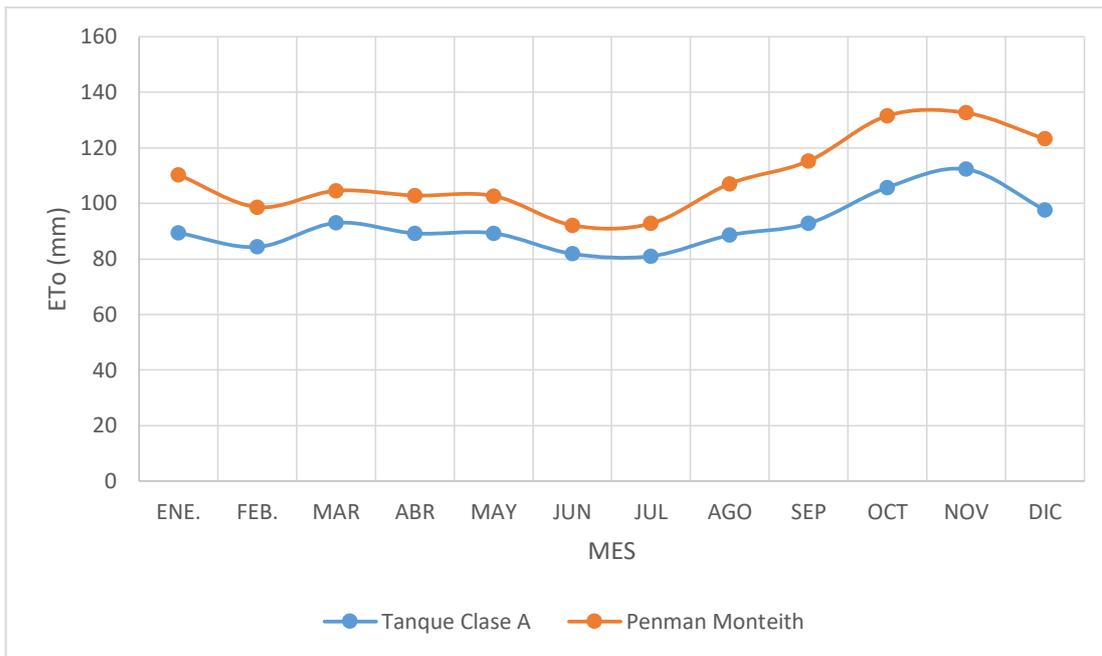
**Figura 46.** Variación mensual de la evapotranspiración de referencia (mm) Estación Pucara.



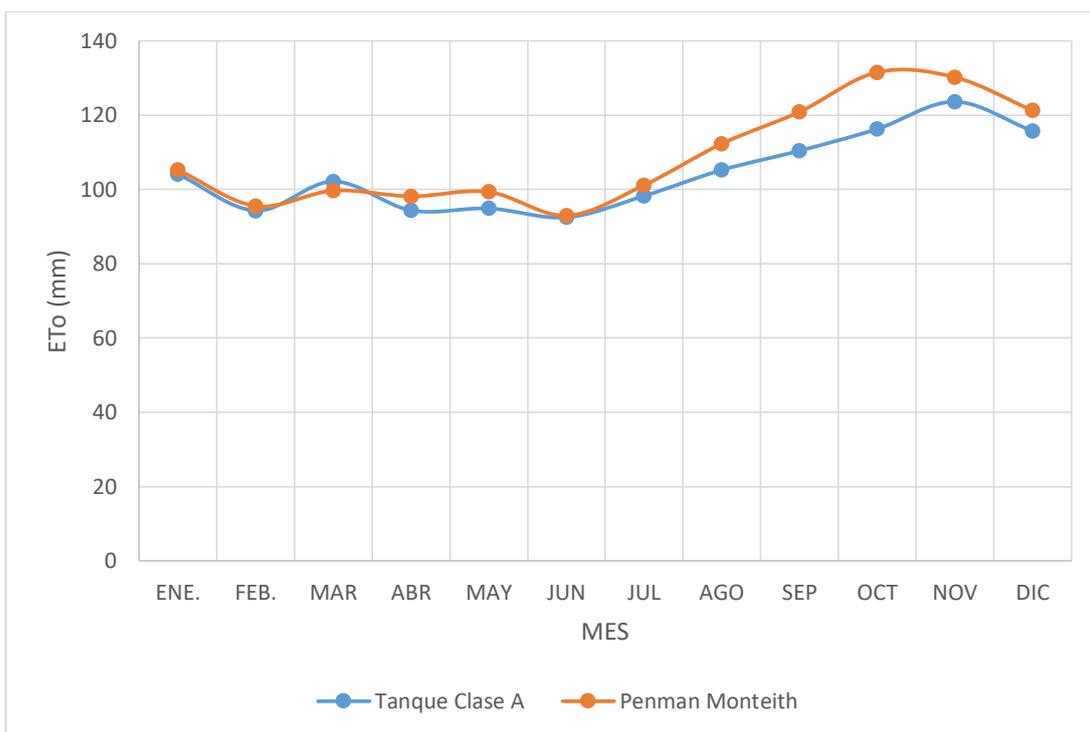
**Figura 47.** Variación mensual de la evapotranspiración de referencia (mm) Estación Puno.



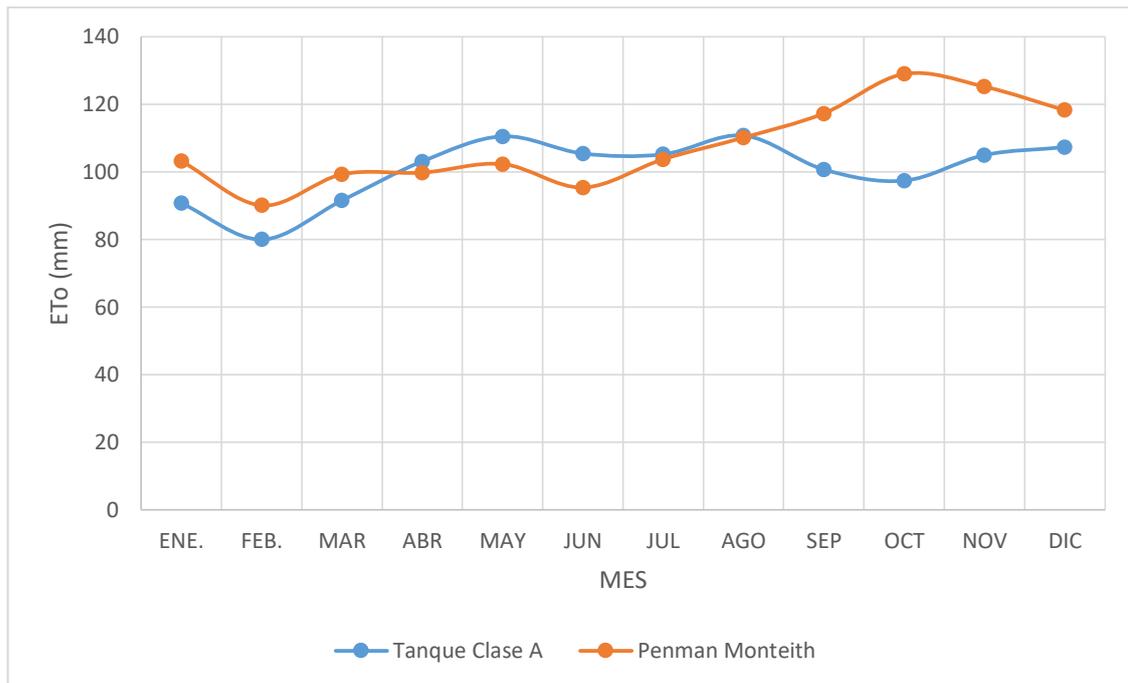
**Figura 48.** Variación mensual de la evapotranspiración de referencia (mm) Estación Putina.



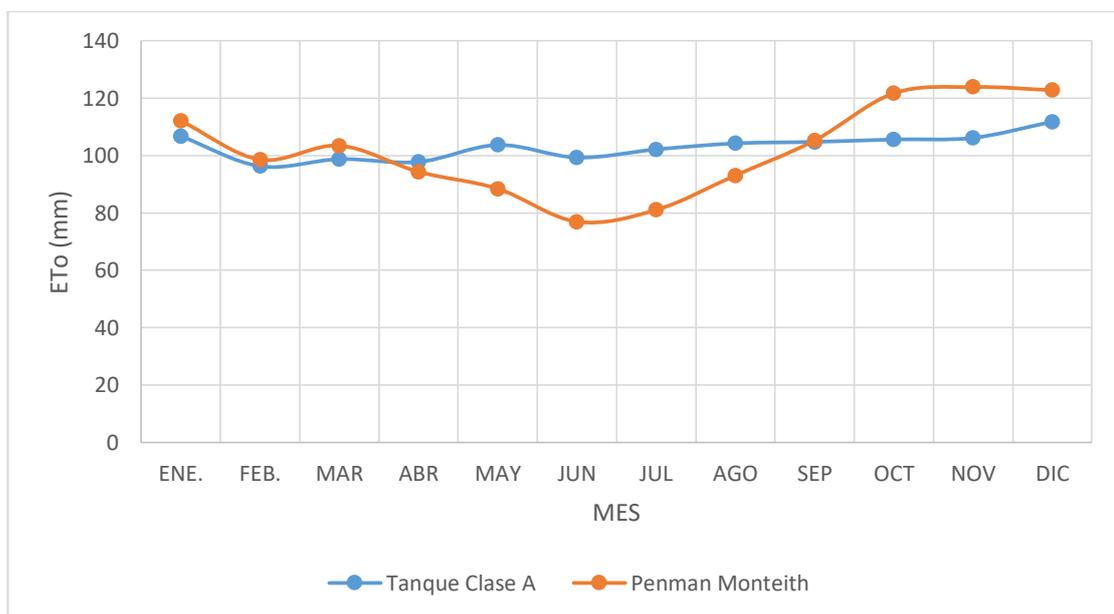
**Figura 49.** Variación mensual de la evapotranspiración de referencia (mm) Estación Santa Lucia.



**Figura 50.** Variación mensual de la evapotranspiración de referencia (mm) Estación Santa Rosa



**Figura 51.** Variación mensual de la evapotranspiración de referencia (mm) Estación Taraco



**Figura 52.** Variación mensual de la evapotranspiración de referencia (mm) Estación Yunguyo.