



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



**EVALUACION DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DE  
REFERENCIA MEDIANTE ECUACIONES BASADAS EN  
TEMPERATURA CALIBRADAS BAJO CONDICIONES  
CLIMÁTICAS DE LA CUENCA ILAVE**

**TESIS**

**PRESENTADA POR:**

**Bach. CARLOS ANDRES AGUILAR TUESTA**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO AGRÍCOLA**

**PUNO – PERÚ**

**2023**



## Reporte de similitud

NOMBRE DEL TRABAJO

**EVALUACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACION DE REFERENCIA MEDIANTE ECUACIONES BASADAS EN TEMPERATURA CALIBRADAS BAJO CONDICIONES CLIMÁTICAS DE LA CUENCA ILAVE**

AUTOR

**CARLOS ANDRES AGUILAR TUESTA**

RECuento DE PALABRAS

**18062 Words**

RECuento DE CARACTERES

**85504 Characters**

RECuento DE PÁGINAS

**85 Pages**

TAMAÑO DEL ARCHIVO

**2.1MB**

FECHA DE ENTREGA

**May 30, 2023 12:41 PM GMT-5**

FECHA DEL INFORME

**May 30, 2023 12:42 PM GMT-5**

### ● 13% de similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos

- 12% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 6% Base de datos de trabajos entregados
- 2% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

### ● Excluir del Reporte de Similitud

- Material bibliográfico
- Material citado
- Material citado
- Coincidencia baja (menos de 15 palabras)



Firmado digitalmente por MAMANI  
LUQUE Oscar Raul FAU  
20145496170 soft  
Motivo: Soy el autor del documento  
Fecha: 28.05.2023 21:45:04 -05:00

Resumen



## DEDICATORIA

Gracias a Dios, por haber puesto en mi camino a aquellas personas que me acompañaron y acompañan hasta hoy, y por permitirme haber llegado hasta este momento tan importante de mi formación profesional.

A mi padre, Andrés Aguilar Ramos porque siempre creyó en mi en todo momento hasta sus últimos días Dios lo tenga en su gloria. Por la motivación constante de mi madre Margarita Tuesta de Aguilar que me ha permitido ser una persona de bien, pero más que nada por su inmenso amor

A mis hermanos Verónica, Silvana y Guillermo a mis tíos y tías Margarita, Eustaquio y Rosario que me apoyaron en todo momento con los que comparto lo que aprendo y de quienes sigo aprendiendo

A todos espero no defraudarlos y espero contar siempre con su valioso apoyo sincero e incondicional

***CARLOS ANDRES AGUILAR TUESTA***



## AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional del Altiplano de Puno, Facultad de Ingeniería Agrícola, Escuela Profesional de Ingeniería Agrícola por permitirme ser profesional.

A todos los docentes de la Facultad de Ingeniería Agrícola quienes impartieron sus conocimientos durante mi formación profesional.

A los miembros del jurado calificador M.Sc Isidro Alberto Pilares Hualpa, Ing. Esteban Moisés Vilca Pérez y Ing. Héctor Alfredo Huamán Gutiérrez al haber sometido esta investigación a una continua y exhaustiva revisión.

Al M.Sc. Oscar Raúl Mamani Luque por su apoyo como director, de la investigación.

A mis queridos amigos y compañeros de estudios quienes de alguna manera contribuyeron para culminar mi investigación.

***CARLOS ANDRES AGUILAR TUESTA***



# ÍNDICE GENERAL

**DEDICATORIA**

**AGRADECIMIENTOS**

**ÍNDICE GENERAL**

**ÍNDICE DE TABLAS**

**ÍNDICE DE FIGURAS**

**ÍNDICE DEACRONIMOS**

**RESUMEN ..... 12**

**ABSTRACT..... 13**

## **CAPÍTULO I**

### **INTRODUCCION**

**1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA ..... 14**

**1.2. FORMULACION DEL PROBLEMA..... 15**

1.2.1. Problema general ..... 15

1.2.2. Problemas específicos ..... 15

**1.3. HIPOTESIS DE LA INVESTIGACION ..... 16**

1.3.1. Hipótesis general ..... 16

**1.4. JUSTIFICACION DEL ESTUDIO ..... 16**

**1.5. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACION ..... 17**

1.5.1. Objetivo general ..... 17

1.5.2 Objetivos específicos..... 17

## **CAPÍTULO II**

### **REVISION DE LITERATURA**

**2.1. ANTECEDENTES ..... 18**



2.1.1. A nivel nacional.....	18
2.1.2. A nivel internacional .....	18
2.1.3. A nivel regional .....	24
<b>2.2. MARCO TEORICO.....</b>	<b>25</b>
2.2.1. Cuenca hidrográfica .....	25
2.2.2. Elementos meteorológicos .....	26
2.2.3. Evaporación.....	29
2.2.4. Transpiración.....	30
2.2.5. Evapotranspiración.....	31
2.2.6. Evapotranspiración de referencia .....	32

### CAPÍTULO III

#### MATERIALES Y METODOS

<b>3.1. UBICACIÓN DEL AREA DE ESTUDIO.....</b>	<b>37</b>
<b>3.2. TIPO DE INVESTIGACION.....</b>	<b>39</b>
<b>3.3. POBLACION Y MUESTRA .....</b>	<b>39</b>
3.3.1. Población .....	39
<b>3.4. PROCEDIMIENTO METODOLOGICO .....</b>	<b>39</b>
3.4.1. Recopilación de información meteorológica.....	39
3.4.2. Evapotranspiración de referencia método Penman Monteith.....	39
3.4.3. Evapotranspiración de referencia método de Hargreaves y Samani .....	40
3.4.4. Calibración del exponente HE de Hargreaves y Samani.....	41
3.4.5. Evaluación de parámetros. ....	42

### CAPÍTULO IV

#### RESULTADOS Y DISCUSION

<b>4.1. RESULTADOS.....</b>	<b>43</b>
-----------------------------	-----------



4.1.1. Evapotranspiración de referencia método de Penman Monteith.....	43
4.1.2. Evapotranspiración de referencia método Hargreaves y Samani .....	57
4.1.3. Calibración del coeficiente HE de la ecuación de Hargreaves y Samani....	58
4.1.4. Evapotranspiración de referencia método Hargreaves y Samani calibrado	60
4.1.4. Análisis estadístico .....	62
<b>4.2. DISCUSION DE RESULTADOS. ....</b>	<b>68</b>
4.2.1. Evapotranspiración de referencia. ....	68
4.2.2. Coeficiente HE de la ecuación de Hargreaves y Samani .....	68
4.2.3. Correlación lineal .....	70
<b>V. CONCLUSIONES .....</b>	<b>71</b>
<b>VI. RECOMENDACIONES .....</b>	<b>72</b>
<b>VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>73</b>
<b>ANEXO .....</b>	<b>79</b>

**Área** : Ingeniería y tecnología

**Línea** : Recursos hídricos

**FECHA DE SUSTENTACIÓN:** 02 de junio de 2023



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Temperatura máxima promedio mensual (°C) – Cuenca Ilave.....	44
Tabla 2.	Temperatura mínima promedio mensual (°C) – Cuenca Ilave. ....	45
Tabla 3.	Humedad relativa promedio mensual (%) – Cuenca Ilave. ....	46
Tabla 4.	Velocidad del viento promedio mensual (m/s) – Cuenca Ilave. ....	48
Tabla 5.	Horas de sol promedio mensual (horas/día) – Cuenca Ilave.....	49
Tabla 6.	Evapotranspiración de referencia (mm) – Estación Mazo cruz. ....	51
Tabla 7.	Evapotranspiración de referencia (mm) – Estación Laraqueri. ....	52
Tabla 8.	Evapotranspiración de referencia (mm) – Estación Juli. ....	53
Tabla 9.	Evapotranspiración de referencia (mm) – Estación Ilave. ....	54
Tabla 10.	Evapotranspiración de referencia (mm) – Estación Puno.....	55
Tabla 11.	Resumen de evapotranspiración de referencia (mm) - Penman Monteith...	56
Tabla 12.	Evapotranspiración de referencia (mm)- Método Hargreaves y Samani.....	58
Tabla 13.	Coefficiente HE de la ecuación Hargreaves y Samani – cuenca Ilave.....	59
Tabla 14.	Evapotranspiración de referencia (mm) - Hargreaves y Samani calibrado .	61
Tabla 15.	Resultados del análisis estadístico modelo lineal .....	62



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Esquema de evapotranspiración de referencia. ....	33
Figura 2.	Ubicación geográfica e hidrográfica del río Ilave.....	38
Figura 3.	Variación mensual de la temperatura máxima (°C) – Cuenca Ilave.....	43
Figura 4.	Variación mensual de la temperatura mínima (°C) – Cuenca Ilave.....	45
Figura 5.	Variación mensual de la humedad relativa (%) – Cuenca Ilave. ....	47
Figura 6.	Variación mensual de la velocidad del viento (m/s) – Cuenca Ilave. ....	48
Figura 7.	Variación mensual de horas de sol (horas/día) – Cuenca Ilave. ....	50
Figura 8.	Variación mensual de la evapotranspiración de referencia-Penman Monteith .....	57
Figura 9.	Variación mensual del coeficiente HE de Hargreaves y Samani.....	60
Figura 10.	Variación mensual de la ETo Hargreaves y Samani calibrado.....	61
Figura 11.	Modelo lineal entre ETo Penman Monteith y ETo Hargreaves y Samani – Estación Mazo cruz.....	63
Figura 12.	Modelo lineal entre ETo Penman Monteith y ETo Hargreaves y Samani – Estación Laraqueri. ....	63
Figura 13.	Modelo lineal entre ETo Penman Monteith y ETo Hargreaves y Samani – Estación Juli. ....	64
Figura 14.	Modelo lineal entre ETo Penman Monteith y ETo Hargreaves y Samani – Estación Ilave.....	64
Figura 15.	Modelo lineal entre ETo Penman Monteith y ETo Hargreaves y Samani – Estación Puno.....	65
Figura 16.	Modelo lineal entre ETo Penman Monteith y ETo Hargreaves y Samani calibrado – Estación Mazo cruz. ....	66



Figura 17. Modelo lineal entre ETo Penman Monteith y ETo Hargreaves y Samani calibrado – Estación Laraqueri .....	66
Figura 18. Modelo lineal entre ETo Penman Monteith y ETo Hargreaves y Samani calibrado – Estación Juli .....	67
Figura 19. Modelo lineal entre ETo Penman Monteith y ETo Hargreaves y Samani calibrado – Estación Ilave.....	67
Figura 20. Modelo lineal entre ETo Penman Monteith y ETo Hargreaves y Samani calibrado – Estación Puno.....	68



## ÍNDICE DE ACRONIMOS

PM	: Penman Monteith
HS	: Hargreaves y Samani
ET	: Evapotranspiración
ET <sub>o</sub>	: Evapotranspiración de referencia
FAO	: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
TDPS	: Titicaca Desaguadero Poopo Salar de Coipasa
SENAMHI	: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología



## RESUMEN

La investigación se realizó en el ámbito de la cuenca Ilave y tiene como objetivo evaluar de la evapotranspiración de referencia mediante ecuaciones basadas en temperatura calibradas bajo condiciones climáticas de la cuenca Ilave. La metodología a utilizar es de determinar la evapotranspiración de referencia mediante los métodos de Penman Monteith y Hargreaves y Samani, Calibrar el coeficiente empírico HE de Hargreaves y Samani para cada estación, realizar el análisis estadístico con el modelo de regresión lineal. Los resultados de la investigación son: Coeficiente HE para la estación Mazo cruz es de 0.49, 0.52 para Laraqueri, 0.59 para Juli, 0.55 para Ilave y 0.58 para Puno; la evapotranspiración de referencia estimada con la ecuación calibrada es de 1269.64 en Mazo cruz, 1322.54 en Laraqueri, 1292.5 mm en Juli, 1317.74 en Ilave y 1373.4 mm en Puno; el coeficiente de determinación entre ETo Penman Monteith y ETo Hargreaves y Samani calibrada, en las cinco estaciones es mayor de 0.99 el que nos indica que hay una alta correlación entre las dos variables. Se concluye que la ecuación de Hargreaves y Samani calibrada se puede usar como un método válido para determinar la evapotranspiración de referencia y la evapotranspiración real mensual de los cultivos, con datos de temperatura en la cuenca Ilave.

**Palabras clave:** Evapotranspiración de referencia, Calibración, Coeficiente, Hargreaves y Samani, Penman Monteith



## ABSTRACT

The research was carried out in the area of the Ilave basin and its objective is to evaluate the reference evapotranspiration through equations based on temperature calibrated under climatic conditions of the Ilave basin. The methodology to be used is to determine the reference evapotranspiration through the methods of Penman Monteith and Hargreaves and Samani, Calibrate the empirical HE coefficient of Hargreaves and Samani for each station, perform the statistical analysis with the linear regression model. The results of the investigation are: HE coefficient for the Mazo Cruz station is 0.49, 0.52 for Laraqueri, 0.59 for Juli, 0.55 for Ilave and 0.58 for Puno; the estimated reference evapotranspiration with the calibrated equation is 1269.64 in Mazo Cruz, 1322.54 in Laraqueri, 1292.5 mm in Juli, 1317.74 in Ilave and 1373.4 mm in Puno; the coefficient of determination between ETo Penman Monteith and ETo Hargreaves and Samani calibrated, in the five stations is greater than 0.99, which indicates that there is a high correlation between the two variables. It is concluded that the calibrated Hargreaves and Samani equation can be used as a valid method to determine the reference evapotranspiration and the real monthly evapotranspiration of the crops, with temperature data in the Ilave basin.

**Keywords:** Reference evapotranspiration, Calibration, Coefficient, Hargreaves and Samani, Penman Monteith



# CAPÍTULO I

## INTRODUCCION

### 1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La evapotranspiración de referencia es un componente clave en los estudios hidrológicos, se utiliza para la planificación agrícola, la programación de riego, estudios de balance de agua y en zonificación agroclimática (Samani, 2000).

Las estimaciones de la evapotranspiración de referencia se utilizan ampliamente en ingeniería de riego para determinar las necesidades de agua de los cultivos. Estas estimaciones se utilizan en el proceso de planificación de los sistemas de riego a ser desarrollados, y también en el manejo de la distribución de agua en los sistemas existentes (Droogers & Allen, 2002).

Dentro de los modelos simples para el cálculo de la se encuentra el de Priestley y Taylor (P-T) que es una versión simplificada del modelo Penman Monteith (PMF-56), Hargreaves y Samani (H-S) también presentan un modelo simple para el cálculo de la evapotranspiración de referencia, el cual solo requiere datos de temperatura y latitud del lugar (Samani, 2000).

Comprender el uso del agua de los cultivos, en particular las necesidades de agua netos y brutos para riego, ha sido durante mucho tiempo una preocupación de ingenieros, diseñadores, gerentes y agricultores. Los consumos de agua de un cultivo o necesidades hídricas, se corresponden con su evapotranspiración (ET) en un determinado ambiente y bajo un manejo concreto del mismo; dicha ET es la suma de dos procesos, la transpiración de la cubierta vegetal y la evaporación de agua desde el suelo que la soporta (Pereira et al., 2010).



La eficiencia en el uso del agua en los sistemas de producción se está volviendo clave resolver el control de su optimización. Estos sistemas basan su accionar en diversos procesos, entre los cuales la evapotranspiración en el sistema suelo-planta-atmósfera. (Hillel, 1990)

Determinar la cantidad de agua disponible para un cultivo adecuado en el perfil del suelo, esto será posible al estimar con precisión la cantidad de agua que se pierde en la atmósfera en forma de ET. Una medición directa de la ET (mediante lisímetros y tanques evaporímetros), podría implicar acumulación de errores en los datos (producto de la observación y el método) y altos costos de recursos (Sánchez, 2001).

## **1.2. FORMULACION DEL PROBLEMA**

### **1.2.1. Problema general**

¿Determinar es la evapotranspiración de referencia estimada mediante la ecuación de Hargreaves y Samani calibrada para las condiciones climáticas de la cuenca del río Ilave?

### **1.2.2. Problemas específicos**

¿Cuánto es la evapotranspiración de referencia estimados mediante las ecuaciones de Hargreaves y Samani y Penman Monteith, para las localidades de Mazo cruz, Laraqueri, Juli, Ilave y Puno?

¿Cuál es el valor de los coeficientes de la ecuación de Hargreaves y Samani, calibrado con los resultados de la ecuación del Penman Monteith, para las condiciones climáticas de la cuenca del río Ilave?.



### **1.3. HIPOTESIS DE LA INVESTIGACION**

#### **1.3.1. Hipótesis general**

La evapotranspiración de referencia se evalúa mediante ecuaciones basadas en temperatura calibradas bajo condiciones climáticas de la cuenca Ilave.

### **1.4. JUSTIFICACION DEL ESTUDIO**

Para la calibración de la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) se va a utilizar los resultados del método de Penman Monteith, dado que es un método estandarizado a nivel mundial, tal como menciona Allen et al, (2006). La estimación de ET<sub>o</sub> con la ecuación de Hargreaves y Samani sólo requiere datos de temperatura máxima y mínima, usualmente disponibles en las estaciones meteorológicas (Campos, 2005).

La ecuación de Hargreaves y Samani proporciona estimaciones confiables para intervalos de tiempo semanal o mensual y los resultados se pueden mejorar haciendo ajustes regionales a sus coeficientes (Droogers y Allen, 2002; Hargreaves y Allen, 2003).

Determinación de las necesidades de riego de los cultivos en base a estimaciones de evapotranspiración de referencia precisa (ET<sub>o</sub>) para cada zona específica y viceversa, las alternativas potenciales estimadas están restringidas por información limitadas y condiciones climáticas, el método de Hargreaves y Samani presenta un potencial porque solo utiliza información sobre temperaturas máximas y mínimas del aire; sin embargo, necesita calcular los parámetros de ajuste climático para cada región.

El aporte de la investigación es generar la ecuación de Hargreaves y Samani calibrada para las condiciones climáticas de la cuenca del río Ilave, la misma que nos



permitirá obtener valores confiables de evapotranspiración de referencia, basado solo en datos observados de temperatura del aire. La evapotranspiración conseguida mejorará la estimación de las necesidades hídricas de los cultivos en la cuenca hidrográfica Ilave.

Con la investigación se busca un aporte del conocimiento científico y tecnológico para la determinación de la evapotranspiración de referencia y las necesidades hídricas de los cultivos para las localidades de Mazo cruz, Laraqueri, Juli, Ilave y Puno; así mismo, los resultados de la investigación se socializará con las autoridades locales del agua, autoridades de los gobiernos distritales y provinciales y autoridades comunales, los mismos serán de utilidad para los agricultores del ámbito de la cuenca del río Ilave

## **1.5. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACION**

### **1.5.1. Objetivo general**

Determinar de la evapotranspiración de referencia mediante ecuaciones basadas en temperatura calibradas bajo condiciones climáticas de la cuenca Ilave

### **1.5.2 Objetivos específicos**

Estimar la evapotranspiración de referencia mediante las ecuaciones de Penman Monteith y Hargreaves y Samani, para las localidades de Mazo cruz, Laraqueri, Juli, Ilave y Puno.

Estimar el valor de los coeficientes de la ecuación de Hargreaves y Samani, calibrado con los resultados de la ecuación de Penman Monteith, para las condiciones climáticas de la cuenca del río Ilave.



## CAPÍTULO II

### REVISION DE LITERATURA

#### 2.1. ANTECEDENTES

En este apartado se describe los antecedentes a nivel nacional e internacional sobre s la calibración de los exponentes de la ecuación de Hargreaves y Samani a nivel nacional e internacional.

##### 2.1.1. A nivel nacional

Lujano A., Quispe J y Lujano E. (2019) realizaron una investigación sobre métodos alternativos de estimación de evapotranspiración de referencia en la Estación Yauri - Cusco, Perú; e indican que los resultados del método HS\_Berti son alentadores porque estadísticamente, tiene el mejor rendimiento en comparación con otros métodos, con  $RMSE=0,22$  mm/día,  $PE=3,24\%$ ,  $d=0,29$ ,  $r=0,95$  y  $c=0,27$ . Se concluyó que el método HS\_Berti tiene un mejor rendimiento y se puede utilizar para estimar la ETo con datos meteorológicos limitados.

##### 2.1.2. A nivel internacional

Tabari y Talaee (2011) efectuaron una calibración de la ecuación de Hargreaves en regiones de clima árido y frío de Iran, y propusieron valores de HC (0.0031) para clima árido y (0.0028) para clima frío. Por tanto, una alternativa para mejorar la estimación de ETo mediante Hargreaves y Samani consiste en la calibración regional del método usando valores meteorológicos locales.



Tabari y Talae (2011) calibraron la ecuación de Hargreaves- en regiones de clima seco y frío de Irán; los valores de HC recomendados (0.0031) para clima seco (0.0028) para clima frío; por lo tanto, una alternativa es mejorar la estimación de ETo. El método de Hargreaves y Samani implica la calibración regional del método, utilizando un valor del coeficiente para condiciones climáticas locales.

De Sousa et al (2013) realizaron la calibración de la ecuación de Hargreaves-Samani para estimar la evapotranspiración de referencia en la región subhúmeda de Brasil. Este estudio tuvo como objetivo determinar la ETo por el método de Hargreaves-Samani en la cuenca experimental de la finca “Riacho do Papagaio”, en el municipio de São João, en el noreste de Brasil, utilizando datos de 2011 y 2012. Evapotranspiración de referencia estimada por el método Hargreaves-Samani no calibrado (EToHS) se sobrestimó en todos los meses (RMSE = 1,43 mm/d), principalmente en los meses de menor demanda evaporativa (de mayo a julio).

Hargreaves y Samani desarrollaron un enfoque alternativo para estimar la ETo donde solo se requieren la temperatura media máxima y media mínima del aire y la radiación extraterrestre (Hargreaves-Samani, HS). Debido a que la radiación extraterrestre se puede calcular para un determinado día y lugar, solo las temperaturas mínima y máxima son los parámetros que requieren observación (Sentelhas et al, 2010)

Trajkovic (2007) realizó un estudio cuyo objetivo es investigar la posibilidad de calibrar la ecuación en la región de los Balcanes Occidentales, Sudeste de Europa mediante el ajuste del exponente de Hargreaves HE. Datos de



Palic, Sarajevo y Nis se han utilizado para estimar la HE ajustada. Se propone un valor de 0.424 en lugar del 0.5 original como uno que debería utilizarse en la ecuación ajustada de Hargreaves AHARG para las ubicaciones de los Balcanes Occidentales. Los valores de ETo estimados por AHARG se compararon con estimaciones de PM de FAO-56 para ocho lugares húmedos Varazdin, Zagreb, Bihac, Novi Sad, Negotin, Kragujevac, Nis y Vranje. Las estimaciones de AHARG coincidieron estrechamente con las estimaciones de PM de la FAO-56 en la mayoría de los lugares. El SEE varió de 0,17 mm /día para Varazdin a 0,24 mm /día para Vranje, con un promedio de 0,21 mm /día. La sobreestimación promedio fue de alrededor del 1%.

Cadro et al (2017) validaron métodos de cálculo y 21 versiones ajustadas localmente de las mismas ecuaciones contra el método FAO-PM ETo. Se utilizaron datos climáticos diarios, registros de temperatura del aire máxima y mínima (°C), precipitación (mm), mínima y máxima humedad relativa (%), velocidad del viento (m/s) y horas de sol (h) para el período 1961-2015 (55 años) y se promediaron cada mes. Los resultados, confirman que de acuerdo a los indicadores estadísticos, el método más adecuado y confiable para el cálculo mensual de ETo en Bosnia y Herzegovina es el método Trajkovic ajustado, el método de Hargreaves-Samani ajustado fue el segundo método con mejor rendimiento.

Xu et al (2012) indican que la ecuación de Hargreaves-Samani (HS) que estima la evapotranspiración de referencia (ETo) utilizando solo la temperatura como entrada, debería ser más adecuado para la predicción ETo basada sobre los datos de pronóstico del tiempo. En el estudio actual, la ecuación HS se calibra



con ETo diario mediante la ecuación de Penman-Monteith y se evalúa para comprobar la posibilidad de predicción de ETo diaria basada en datos de pronóstico del tiempo. Es probable que la ecuación HS pueda sobreestimar la ETo diaria en las regiones húmedas de China. Se calculan los coeficientes a y c como 0,00138 y 0,5736 de acuerdo con la calibración local. La ecuación HS calibrada funciona considerablemente mejor que el original.

Dejaman et al, (2016) efectuaron una investigación con el objetivo de evaluar, calibrar y validar seis ecuaciones para estimar ETo ((Trabert, Mahringer, Penman1948, Albrecht, Valiantzas1 y Valiantzas2 ). De acuerdo a los resultados las seis ecuaciones mostraron una buena concordancia con el PM-ETo ( $R^2 > 0.60$ ) para las estimaciones diarias de ETo, la ecuación de Valiantzas2 fue el mejor modelo para el Delta del río Senegal y tuvo la diferencia de raíz cuadrada media (RMSE) más baja de 0.45 mm/día y el porcentaje más bajo de error de estimación (PE) alrededor de 7,1%.

Xu et al, (2013) efectuaron un estudio que tiene como objetivo mejorar el rendimiento de métodos simples para la estimación de la evapotranspiración de referencia diaria (ETo) en el este de China húmedo, los métodos son: Penman – Monteith de la FAO-56 ecuación (FAO-56 PM), Priestley – Taylor 1972 (P-T 1972), Hargreaves – Samani 1985 (H-S 1985) y Turc 1961 (TU 1961). Estos métodos fueron evaluados y calibrados en base a experimentos con lisímetro de césped bien regado. El Penman – Monteith de la FAO-56 ecuación (FAO-56 PM) es el mejor método y los métodos basados en radiación (TU 1961 y P-T 1972) funcionan mucho mejor que los basados en temperatura, método (H-S 1985).



Trajkovic et al (2020) efectuaron una investigación con el objetivo principal de comparar los enfoques de ETo calibrados basados en la temperatura con la ecuación de PM estándar utilizando datos meteorológicos de quince estaciones CLIMWAT ubicadas en la cuenca de Pannonia. Se evaluaron doce ecuaciones basadas en la temperatura de acuerdo con el método de PM. La ecuación de Hargreaves (HT) calibrada regionalmente dio el RMSE más bajo en siete sitios y el segundo RMSE más bajo en tres sitios. El nuevo enfoque Thornthwaite (TT) calibrado regionalmente arrojó el RMSE más bajo tres veces y el segundo RMSE más bajo siete veces. Los resultados generales muestran la ventaja del enfoque HT excepto en algunas estaciones del sureste donde predomina el enfoque TT. Se puede concluir que los enfoques basados en la temperatura calibrados regionalmente (HT y TT) son los más adecuados para estimar la ETo en la cuenca de Pannonia

Quej et al (2019), Indican que la estimación de la evapotranspiración de referencia (ETo) utilizando la temperatura del aire es particularmente atractiva para lugares donde los datos de la radiación solar, velocidad del viento y la humedad del aire no están disponibles. En este estudio, siete modelos basados en temperatura (TET) y el modelo estandarizado. Usando solo datos de temperatura de la península de Yucatán, México, se utilizó el modelo de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) -Penman-Monteith (PMT) para estimar ETo como estándar.

Xu y Sing (2002) efectuaron estudios de cinco ecuaciones de evapotranspiración potencial empírica, Hargreaves y Blaney-Criddle (basado en la temperatura), Makkink y Priestley-Taylor (basado en radiación) y Rohwer



(basado en transferencia de masa) fueron evaluados y comparados con Ecuación de Penman-Monteith utilizando datos meteorológicos diarios de la estación de Changins en Suiza. Los cálculos de la ecuación de Penman-Monteith siguieron el procedimiento recomendado por FAO (Allen et al., 1998). La comparación se realizó primero utilizando los valores constantes originales involucrados en cada ecuación empírica y luego se hace usando los valores constantes recalibrados.

Toro et al (2015) realizaron una investigación en la zona Norte del eje bananero del Urabá Antioqueño, Colombia con el objeto de evaluar la confiabilidad para calcular la Eto de los métodos: Hargreaves y radiación (Eto-PM-Samani), con respecto al método de PM. Se generaron coeficientes de Angstrom-Prescott para estimar la radiación solar (coeficientes estacionales), en donde  $a=0.25$ ,  $b=0.50$ ,  $a=0.2$ ,  $b=0.52$ ,  $a=0.29$ ,  $b=0.42$ , con dos métodos. Se estimaron la radiación solar mediante coeficientes  $a_p$  y  $b_p$ . Se obtuvieron valores del error cuadrático medio de la raíz (RSME) y el error relativo (RE) bajos, seguido por el método de Frere1978. El mejor estimado de evapotranspiración se obtuvo con EtoHS1985 porque RSME y RE fueron las más baja; los valores de  $R^2$  más altos; mientras que los métodos EtoHargreaves y Eto PM-Samani tienen RSME y RE similares y el primero es mejor y se ajusta al modelo lineal entre Eto PM y EtoHS1985 con error reducido y  $R^2 > 0.8$ .

Tabari (2010) indica que la evapotranspiración es uno de los elementos más importantes para cuantificar agua disponible, ya que generalmente constituye el componente más grande de la tierra en el ciclo del agua. Este estudio evaluó cuatro modelos (Makkink, Turc, Priestley – Taylor y Hargreaves) comúnmente utilizado para estimar la evapotranspiración mensual del cultivo de



referencia (ET<sub>o</sub>) valores. El objetivo principal de este estudio fue determinar el modelo utilizado para estimar ET<sub>o</sub> con pequeños requisitos de datos y alta precisión para doce estaciones sinópticas en cuatro climas de Irán. Los resultados mostraron que el modelo Turc era el más adecuado modelo en la estimación de ET<sub>o</sub> para clima frío, húmedo y seco. El modelo de Hargreaves fue reconocido como el modelo más preciso en climas cálidos, húmedos y semiáridos.

Bachour et al (2013) mencionan que la evapotranspiración (ET) es un componente importante del ciclo hidrológico, especialmente para la agricultura de regadío. Métodos directos de estimar la ET de referencia es difícil o requiere muchas variables meteorológicas que no siempre están disponibles en todas las estaciones meteorológicas. La ecuación de Hargreaves (HG) requiere solo datos medidos de temperatura del aire diaria y radiación extraterrestre calculada para las estimaciones de ET. A menos que sea regionalmente calibrada, la HG tiende a sobrestimar o subestimar sistemáticamente la ET. Esta ecuación fue evaluada en condiciones semiáridos en el valle de Bekaa del Líbano utilizando 16 años de datos climáticos diarios completos de la estación meteorológica de Terbol. Los resultados de HG se compararon con estimaciones de ET obtenidas de la ecuación de Penman Monteith (PM) de FAO56, que se utilizó como estándar. El HG original sobreestimó la ET en un 23, 17 y 12 % para la ET diaria, semanal y mensual, respectivamente, en comparación con la PM.

### **2.1.3. A nivel regional**

Charaja (2017) realizó una investigación cuya problemática era 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. 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.

Alfaro (2023) Realizo una investigación que fue determinar una fórmula semiempírica que relacione la evapotranspiración de referencia con el déficit de presión de vapor, velocidad del viento, rango de temperatura y radiación extraterrestre utilizando datos de la estación meteorológica de Puno. En la calibración se aplicó regresión lineal múltiple y luego se validó la fórmula comparando sus resultados con el método del tanque clase A, Penman-Monteith, Hargreaves y Serruto. Los coeficientes de regresión lineal múltiple son estadísticamente significativos ( $p < 0,05$ ), se determinó un coeficiente de correlación del 84% y determinación del 71%.

## **2.2. MARCO TEORICO**

### **2.2.1. Cuenca hidrográfica**

Según Vásquez A., Mejía A., Faustino J., Terán R., Vásquez I., Díaz J., Vásquez C., Castro A., Tapia M. y Alcántara J. (2016), una cuenca hidrológica se define como un área o unidad territorial delimitada por límites topográficos (divortium acuario) que recoge las precipitaciones y descarga las escorrentías en un colector común denominado río principal.



Según Faustino (2006), la cuenca hidrográfica es 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).

Villon (2002) define a la cuenca de drenaje de un río, como el área de terreno donde todas las aguas caídas por precipitación, se unen para formar un solo curso de agua, el mismo que desemboca a una vertiente o un lago

### **2.2.2. Elementos meteorológicos**

#### **a. precipitación**

Vásquez et al. (2016) mencionan que la precipitación ocurre cuando las diminutas gotitas de agua que forman las nubes se enfrían y se condensan, lo que permite que las diminutas gotitas de agua se combinen para formar gotitas más grandes y pesadas, que finalmente caen a la superficie de la tierra. Los tipos de precipitación son lluvia, granizo, nieve, niebla (niebla) y rocío.

Según Pérez (2015), la precipitación es toda forma de humedad, que originándose en las nubes, llega hasta la superficie terrestre. Según esta definición, la lluvia, el granizo, la aguanieve y la nevada son formas diferentes del mismo fenómeno de precipitación; la precipitación, también llamada agua, cae de la humedad de la atmósfera a la superficie, principalmente en forma líquida, como lluvia o en forma sólida, como escarcha, nieve y granizo.

Fattorelli y Fernández (2011) mencionaron que las nubes son transportadas por el viento, algunas se quedan sobre el océano y otras se



trasladan a los continentes. Durante estos movimientos, pueden enfriarse y de esta manera, las gotas que forman las nubes pueden crecer a medida que se comprimen o se acumulan en partículas que flotan en la atmósfera. A medida que asciende las gotas se agrandan, las gotas de agua caen a la superficie de la tierra por su propio peso, provocando la precipitación.

Villon (2002) indica que la altura de precipitación que cae en un sitio dado, difiere de la que cae en los alrededores, aunque sea en sitios cercanos. Para muchos problemas hidrológicos, es necesario conocer la precipitación media de una región, que puede referirse a la precipitación diaria, mensual, anual, media mensual y media anual.

#### b. Temperatura

Allen et al. (2006) mencionan que la radiación solar absorbida por la atmósfera y el calor desprendido por la tierra elevan la temperatura del aire. El calor sensible del aire circundante transfiere energía al cultivo; por lo tanto, controla hasta cierto punto la tasa de evaporación. En los días cálidos y soleados, se pierde más agua por evaporación que en los días fríos y nublados. Para utilizar el método para determinar la evapotranspiración de referencia, se requiere información sobre la temperatura máxima y mínima diaria (promedio) en grados Celsius.

La temperatura es una medida del movimiento de traslación medio de las moléculas en un sistema, en nuestro caso el aire. Para evitar perturbaciones por la incidencia directa de los rayos solares sobre los termómetros, se colocan



dentro de un abrigo meteorológico, que permite el paso del aire a través de unas rendijas que forman parte de las paredes (Breña y Jacobo, 2006)

#### c. Humedad relativa

Breña y Jacobo (2006) indican que el contenido de humedad en la atmósfera se caracteriza a través del parámetro humedad relativa, el cual se define como la relación de la densidad del vapor de agua en un volumen de aire dividido por la densidad de vapor de agua en condiciones de saturación.

La humedad relativa es la parte de la atmósfera que consiste en vapor de agua, es muy pequeña en comparación con los otros componentes, pero es muy importante porque determina las condiciones climáticas del momento. El contenido de humedad del aire es también un factor significativo en el proceso de evaporación local, por lo tanto es necesario que el hidrólogo esté al corriente de lo que ocurre en la atmósfera y comprender los efectos termodinámicos de la humedad atmosférica (Guevara y Cartaya, 2004).

#### d. Radiación solar

Allen et al. (2006) mencionan que la radiación solar, la fuente de energía más importante de la Tierra, convierte grandes cantidades de agua líquida en vapor; por lo tanto, afecta el proceso de evapotranspiración. La cantidad potencial de radiación que puede alcanzar una superficie de evaporación o una superficie de evaporación determinada por su ubicación y época del año. A la hora de determinar el efecto de la radiación solar sobre la evapotranspiración, también se debe tener en cuenta que no toda la energía disponible se utiliza para



la evaporación del agua. Parte de la energía solar se utiliza para calentar la atmósfera y la tierra.

e. Velocidad del viento

Allen et al. (2006) indicaron que el proceso de eliminación de vapor depende en gran medida del viento y la turbulencia del aire, que transportan grandes volúmenes de aire a la superficie de evaporación. Con esto en mente, el aire sobre la superficie de evaporación se satura gradualmente con vapor de agua. Si este espacio de aire se reemplaza por aire más seco, la tasa de eliminación de vapor de agua disminuye así como la tasa de evaporación.

Breña y Jacobo (2006) muestran que el viento se produce cuando existe una diferencia de temperatura o un cambio en la presión atmosférica entre puntos geográficos cercanos. Por lo tanto, se producen fuertes cambios en ciertos lugares en cortos intervalos de tiempo. Las montañas se enfrían más rápido que las tierras bajas circundantes, por lo que el viento tiende a bajar por la noche; por la mañana, la situación cambia, cuando la cima recibe primero el sol, creando un viento ascendente.

### **2.2.3. Evaporación**

Vásquez A., Vásquez I., Vásquez C. y Cañamero M., (2017) definen a la evaporación como el proceso físico por el cual el agua cambia de un estado líquido a un estado gaseoso. La evaporación es una fase del ciclo hidrológico que está influenciada por varios factores, incluidos el viento, la temperatura, la humedad relativa y la radiación solar.



Pérez (2015) define a la evaporación como el proceso por el cual, el agua pasa del estado líquido en que se encuentra en los almacenamientos, en el suelo y en las capas cercanas a la superficie, al estado gaseoso en condiciones naturales y se transfiere a la atmósfera.

Según Breña y Jacobo (2010), la evaporación es un fenómeno causado por el calor de los rayos del sol en las superficies líquidas de los océanos, lagos y ríos, así como en el suelo húmedo, que convierte el agua en vapor mientras la atmósfera no está saturada de vapor a temperatura ambiente. En este fenómeno, el agua absorbe calor de su entorno, por lo que la evaporación siempre va acompañada del enfriamiento de la superficie líquida o del suelo.

Allen et al. (2006) definieron la evaporación como el proceso por el cual el agua líquida se convierte en vapor de agua y se elimina de las superficies que se evaporan. El agua se evapora de varias superficies como lagos, ríos, carreteras, suelo y vegetación húmeda para cambiar el estado de las moléculas de agua de líquido a energía gaseosa.

#### **2.2.4. Transpiración**

La transpiración es el proceso por el cual el agua se evapora de los espacios de aire de las hojas de las plantas. Como tales, están esencialmente controlados por los mismos factores que dominan el proceso de evaporación, como la radiación solar, la temperatura, la velocidad del viento y los gradientes de presión de vapor. Además, la transpiración se ve afectada en alguna medida por el tipo de planta y su densidad (Allen et al., 2006)



La transpiración ocurre casi en su totalidad en el día bajo la radiación solar. Por la noche los poros o estomas de las plantas se cierran y un porcentaje muy pequeño de humedad se libera desde la superficie de la planta (Wilson, 1990).

### **2.2.5. Evapotranspiración**

Según Vásquez et al. (2017), la evapotranspiración es el proceso por el cual el agua ingresa a la atmósfera a partir de la evaporación del suelo y la transpiración de las plantas. Es complejo y depende no solo de los factores físicos (climáticos) que afectan la evaporación, sino también de las características morfológicas y fisiológicas de la cubierta vegetal, el suelo y su contenido de humedad.

Pérez (2015) define a la evapotranspiración como la suma de las cantidades de agua evaporada desde el suelo y la transpirada por las plantas (Evaporación + Transpiración).

Según Fattorelli y Fernández (2011), los parámetros más importantes de medir en agricultura (sobre todo en cálculos para irrigación) es la combinación de la evaporación del suelo más la transpiración de la vegetación. En diseño o cálculos agrícolas se usan ecuaciones adecuadas que calculan la evapotranspiración en base a factores climáticos (temperatura, viento, radiación solar) o aplicando factores de cultivo a la evaporación del tanque tipo A.

Gámez (2010) define a la evapotranspiración como la cantidad de agua utilizada por las plantas para realizar sus funciones de transpiración, más el agua que se evapora de la superficie del suelo en el cual se desarrolla.



Allen et al. (2006) afirman que la evaporación y la transpiración ocurren simultáneamente y no hay una manera sencilla de distinguir entre estos dos procesos. Además de la disponibilidad de agua en la capa superficial, la evaporación del suelo cultivado depende principalmente de la proporción de radiación solar que alcanza la superficie del suelo.

### **2.2.6. Evapotranspiración de referencia**

Vázquez et al. (2017) se refieren a la evapotranspiración potencial o de referencia como la cantidad de evaporación que ocurre cuando un cultivo enano (generalmente una gramínea) está creciendo activamente y cubre toda la superficie del suelo con un suministro adecuado y continuo de agua. El Comité Técnico de Requisitos de Riego de la Sociedad Estadounidense de Ingenieros Civiles (ASCE) ha utilizado la alfalfa como pasto estándar para calcular la evapotranspiración potencial. Existen varios métodos para determinar la evapotranspiración potencial, entre ellas se tienen: lisímetro, tanque de evaporación, balance de agua, balance de energía y fórmulas empíricas.

Allen et al. (2006) definen a la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) como la tasa de evapotranspiración de una superficie de referencia, que ocurre sin restricciones de agua.

La superficie de referencia corresponde a un hipotético cultivo de pasto con características específicas: una altura hipotética de 0,12 m, una resistividad superficial fija de 70 s/m y un albedo de 0,23; también debe tenerse en cuenta que el único factor que influye a la evapotranspiración de referencia son los parámetros climáticos.



Figura 1. Esquema de evapotranspiración de referencia.

Fuente: Allen *et al.* (2006)

Según Allen *et al.* (2006), los métodos para medir o estimar la evapotranspiración de referencia son: métodos directos o de lisímetros, método del tanque evaporímetro y los métodos indirectos o uso de fórmulas empíricas.

#### a. Método directo

Vázquez *et al.* (2017) mencionaron que el método del lisímetro es un método directo y preciso para medir la evaporación potencial o de referencia durante un período de tiempo desde un dispositivo o estructura llamado lisímetro. Dentro del lisímetro hay cultivos estándar o pastos que se someten a análisis de agua de evaporación o transpiración. Este método generalmente se usa en trabajos de investigación y rara vez se usa para estudiar los requisitos de agua de los cultivos en proyectos de riego en curso.

Los lisímetros están diseñados para recolectar agua de drenaje, mientras que los instrumentos de pesaje (que son mucho más caros que los medidores de drenaje) están diseñados para calcular la evapotranspiración. El lisímetro de pesada se apoya sobre un sistema hidráulico o una balanza de precisión. Los lisímetros de drenaje tienen una salida en el fondo, de manera que el agua que se infiltra es recogida en un recipiente que se pueda aforar (Tuñón, 2000).



La gran diferencia entre los lisímetros de drenaje y pesada es que los de drenaje miden la evapotranspiración de forma indirecta, resolviendo la ecuación de balance del suelo, mientras en los de pesada la evaporación se mide directamente y según la exactitud de la balanza puede dar precisiones de hasta 0,1 mm (Gee & Hillel, 1988).

b. Método del tanque evaporímetro.

Allen et al. (2006) mencionan que el tanque evaporímetro 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 la evapotranspiración de referencia.

Según Goehring Hube (1989), el método de evaporación del tanque de agua es uno de los métodos más utilizados para la medición directa de la evaporación del agua. Existen diferentes tipos de vaporizadores, también conocidos como bandejas, cubetas, tanque de evaporación. El tanque evaporador más utilizado es el llamado Clase A, el cual es de forma redonda con un diámetro de 122 cm y una profundidad de 25 cm. Es de hierro galvanizado (calibre 22) y se sitúa sobre una plataforma de madera de 15 cm de altura sobre el suelo.

c. Métodos indirectos

**Método de Penman Monteith.**

Según Allen et al. (2006), el método Penman Monteith fue estandarizado por investigadores de la Organización de las Naciones Unidas para la



Alimentación y la Agricultura (FAO), la ecuación de Penman-Monteith expresa de forma clara, precisa y sencilla los factores físicos y fisiológicos que regulan el proceso de evapotranspiración; en la ecuación se utilizan datos climatológicos sobre radiación solar, temperatura del aire, humedad y velocidad del viento.

### **Método de Hargreaves en base a temperatura.**

Según Vásquez et al. (2016), la ecuación matemática para determinar la evapotranspiración potencial o de referencia utilizando este método es:

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

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

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

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

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

Donde:

ETP : Evapotranspiración potencial (mm/mes).

MF : Factor mensual de latitud (Se obtiene de tablas)

TMF : Temperatura media mensual ( $^\circ F$ ).

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.).

### **Método de Hargreaves basado en la radiación solar**

Según Vásquez et al. (2016), la ecuación matemática para determinar la evapotranspiración potencial o de referencia utilizando este método es:

$$ETP = 0.0075 * RSM * TMF \dots(3)$$

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

$$RMM = Ra * DM$$

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

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

Donde:

ETP : Evapotranspiración Potencial en (mm/mes)

RSM : Radiación Solar equivalente en (mm/mes)

RMM : Radiación extraterrestre equivalente en (mm/mes)

Ra : Radiación extraterrestre 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



## CAPÍTULO III

### MATERIALES Y METODOS

#### 3.1. UBICACIÓN DEL AREA DE ESTUDIO

La ubicación geográfica, política e hidrográfica de la cuenca Ilave es:

##### **Ubicación geográfica:**

En coordenadas UTM (WGS84):

Este: 352.353,0 a 452.052,0

Sur: 8.104.770 a 8.248.751

Cambio de altitud de 3805 a 5400 msnm.

##### **Ubicación política.**

Región : Puno.

Provincias : Chucuito, El Collao y Puno

Distritos : Huacullani, Juli, Capaso, Mazocruz, Conduriri, Ilave, Acora, Platería, Chucuito, Laraqueri, Puno y San Antonio.

##### **Ubicación hidrográfica.**

Sistema : Titicaca–Desaguadero–Poopo–Salar de Coipasa (TDPS).

Vertiente : Lago Titicaca.

Cuenca : Rio Ilave

En la figura 2 se muestra la ubicación geográfica de la cuenca hidrográfica del río Ilave.



Figura 2. Ubicación geográfica e hidrográfica del río Ilave.

Fuente: Ministerio de Agricultura (2009).



### **3.2. TIPO DE INVESTIGACION**

La investigación es cuantitativa porque es continua y forma parte de una realidad concreta que se desarrolla en el tiempo y el espacio (cuenca Ilave).

### **3.3. POBLACION Y MUESTRA**

#### **3.3.1. Población**

Como la variable en estudio es la evapotranspiración de referencia, la misma que está en función de los parámetros meteorológicos de temperatura, velocidad del viento y evaporación, la población de la información meteorológica a considerar son 05 estaciones meteorológicas ubicadas en el ámbito de la cuenca del rio Ilave .

### **3.4. PROCEDIMIENTO METODOLOGICO**

El procedimiento metodológico para llegar a los objetivos específicos y general en la investigación se presenta en los siguientes ítems.

#### **3.4.1. Recopilación de información meteorológica**

Se obtuvo información meteorológica del Servicio Nacional de meteorología e Hidrología (SENAMHI), información media mensual de temperatura máxima, temperatura mínima, humedad relativa, velocidad del viento y horas de sol, de las estaciones meteorológicas de Mazo cruz, Laraqueri, Juli, Ilave y Puno.

#### **3.4.2. Evapotranspiración de referencia método Penman Monteith**

Según Allen et al. (2006) este método utiliza la siguiente ecuación:



$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)}$$

Donde:

$ET_0$ : Evapotranspiración de referencia (mm/ día)

$R_n$  : Radiación neta en la superficie del cultivo. (MJ m<sup>-2</sup> /día)

$R_a$  : Radiación extraterrestre (mm/ día)

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

$T$  : Temperatura media del aire a 2 m de altura (°C)

$u_2$  : Velocidad del viento a 2 m de altura (m/ s)

$e_s$  : Presión de vapor de saturación (kPa)

$e_a$  : Presión real de vapor (kPa)

$e_s - e_a$  : Déficit de presión de vapor (kPa)

$\Delta$  : Pendiente de la curva de presión de vapor (kPa /°C)

$\gamma$  : Constante psicrométrica (kPa /°C).

Para estimar la evapotranspiración de referencia mediante este método, se va a utilizar el programa CROPWAT desarrollado por la División de Desarrollo de Tierras y Aguas de la Organización para la Agricultura y la Alimentación (FAO) de las Naciones Unidas, es un software libre.

### 3.4.3. Evapotranspiración de referencia método de Hargreaves y Samani

Según Hargreaves et al. (2003), en 1975, Hargreaves publicó la siguiente fórmula para estimar la referencia de evaporación diaria en milímetros.



$$ET_O = 0.0135 R_S (T_{media} + 17.8)$$

Donde:

$R_S$  : Radiación solar que llega a nivel del suelo (mm/d)

$T_{media}$  : Temperatura media diaria (°C).

Hargreaves y Samani propusieron la siguiente expresión para la radiación solar que llega a nivel del suelo (Hargreaves et al., 2003):

$$R_S = \alpha R_a \sqrt{TD}$$

Donde:

$\alpha$  : Coeficiente empírico

$R_a$  : Radiación extraterrestre de la atmosfera (mm/d)

$TD$  : Diferencia entre la temperatura máxima y mínima (°C)

Finalmente los autores recomendaron que el coeficiente se incrementara a 0.0023. Con lo cual la ecuación ajustada es (Hargreaves et al., 2003):

$$ET_O = 0.0023 R_a (T_{media} + 17.8) \sqrt{TD}$$

#### 3.4.4. Calibración del exponente HE de Hargreaves y Samani

Para realizar la calibración del exponente HE de la ecuación de Hargreaves y Samani, se realizará mediante la igualdad de términos entre PM y HG propuesta por Trajkovic (2007) para predecir los valores de PM

$$PM = 0.0023 R_a \left( \frac{T_{max} + T_{min}}{2} + 17.8 \right) (T_{max} - T_{min})^{HE}$$

En esta investigación, la calibración del exponente HE se realizará mediante la siguiente ecuación que proviene de la ecuación anterior (PM).

$$HE = \frac{\log \left[ \frac{PM}{0.0023 R_d \left( \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} + 17.8 \right)} \right]}{\log \left[ T_{\max} - T_{\min} \right]}$$

### 3.4.5. Evaluación de parámetros.

Una vez obtenido el exponente HE calibrado por estación, con la ecuación HS calibrado se estima la evapotranspiración de referencia a intervalos mensuales. HS se calcula utilizando coeficientes originales para estimar el cambio porcentual entre los dos métodos y para medir la mejora sobre la estimación de PM

Acorde a lo recomendado por Allen *et al.* (2006), para definir la relación en la estimación de la evapotranspiración de referencia con el método de Penman Monteith y el método de Hargreaves y Samani calibrado para la cuenca del río Ilave, se realizó mediante el siguiente modelo lineal.

$$Y = a + b * X$$

$$ETo PM = a + b * ETo HS$$

Donde ETo es la evapotranspiración de referencia, PM se refiere al método Penman Monteith, HS al método Hargreaves y Samani, a y b son los parámetros de la ecuación lineal.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1. RESULTADOS.

##### 4.1.1. Evapotranspiración de referencia método de Penman Monteith

En la tabla 1, se presenta la información de temperatura máxima promedio mensual en el ámbito de la cuenca del río Ilave, registradas en las estaciones meteorológicas de Mazo cruz, Laraqueri, Juli, Ilave y Puno; en ella se puede apreciar que la variación de temperatura máxima mensual es de 12.8 – 19.2°C, correspondiente a julio y noviembre respectivamente; la temperatura máxima promedio anual es de 17.6 °C. En la figura 3, se muestra gráficamente la variación mensual de la temperatura máxima en las estaciones Mazo cruz, Laraqueri, Juli, Ilave y Puno.

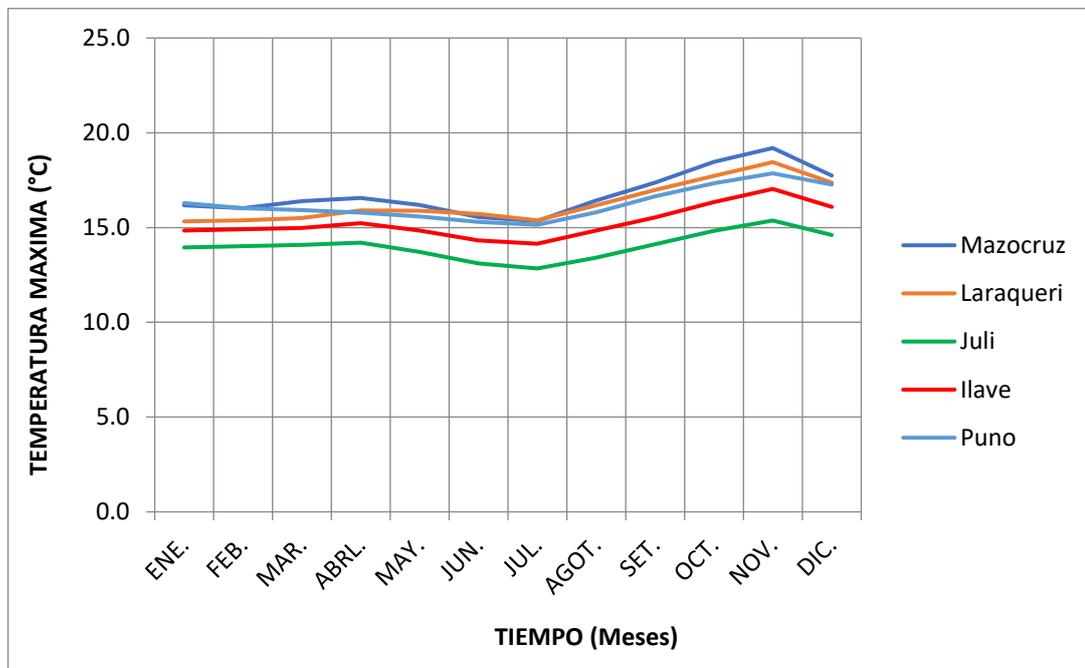


Figura 3. Variación mensual de la temperatura máxima (°C) – Cuenca Ilave.



Tabla 1. Temperatura máxima promedio mensual (°C) – Cuenca Ilave.

Mes	Mazo cruz	Laraqueri	Juli	Ilave	Puno	Promedio
Enero	16.2	15.3	14.0	14.9	16.3	15.3
Febrero	16.0	15.4	14.0	14.9	16.0	15.3
Marzo	16.4	15.5	14.1	15.0	15.9	15.4
Abril	16.6	15.9	14.2	15.2	15.8	15.5
Mayo	16.2	15.9	13.7	14.8	15.6	15.2
Junio	15.6	15.7	13.1	14.3	15.3	14.8
Julio	15.3	15.4	12.8	14.1	15.1	14.6
Agosto	16.4	16.2	13.4	14.9	15.8	15.3
Septiembre	17.4	17.0	14.1	15.5	16.6	16.1
Octubre	18.5	17.7	14.8	16.3	17.3	16.9
Noviembre	19.2	18.5	15.4	17.0	17.9	17.6
Diciembre	17.7	17.4	14.6	16.1	17.3	16.6
Promedio	16.8	16.3	14.0	15.3	16.2	15.7
Mínimo	15.3	15.3	12.8	14.1	15.1	14.6
Máximo	19.2	18.5	15.4	17.0	17.9	17.6

En la tabla 2, se presenta la información meteorológica de temperatura mínima promedio mensual, registradas en las estaciones meteorológicas de Mazo cruz, Laraqueri, Juli, Ilave y Puno; en ella se puede apreciar que los cambios de temperatura mínimos mensuales son -13.3 - 5.4 °C, correspondientes a julio y enero, respectivamente; la temperatura mínima promedio anual es - 0.2 °C. En la figura 4, se muestra gráficamente el comportamiento mensual de la temperatura mínima en las estaciones Mazo cruz, Laraqueri, Juli, Ilave y Puno.

Tabla 2. Temperatura mínima promedio mensual (°C) – Cuenca Ilave.

Mes	Mazocruz	Laraqueri	Juli	Ilave	Puno	Promedio
Enero	0.9	2.6	5.2	4.6	5.4	3.7
Febrero	1.1	2.6	5.2	4.8	5.3	3.8
Marzo	-0.4	1.6	4.9	4.3	5.1	3.1
Abril	-4.4	-0.5	3.6	2.4	3.4	0.9
Mayo	-9.9	-4.4	0.9	-1.0	0.8	-2.7
Junio	-12.9	-7.5	-0.5	-3.2	-0.6	-4.9
Julio	-13.3	-7.9	-0.9	-3.6	-1.2	-5.4
Agosto	-12.4	-5.8	0.1	-2.4	-0.1	-4.1
Septiembre	-9.5	-3.3	2.1	0.1	1.9	-1.7
Octubre	-7.3	-0.9	3.4	1.8	3.2	0.1
Noviembre	-5.3	0.8	4.5	2.9	4.4	1.5
Diciembre	-1.2	1.9	5.2	4.2	4.9	3.0
Promedio	-6.2	-1.7	2.8	1.2	2.7	-0.2
Mínimo	-13.3	-7.9	-0.9	-3.6	-1.2	-5.4
Máximo	1.1	2.6	5.2	4.8	5.4	3.8

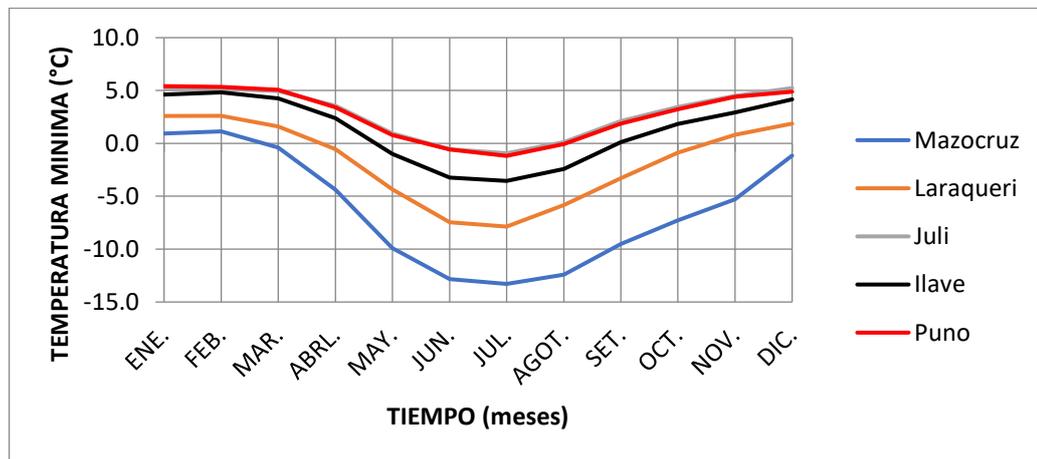


Figura 4. Variación mensual de la temperatura mínima (°C) – Cuenca Ilave.

En la tabla 3, se presenta la información meteorológica de humedad relativa promedio mensual en el ámbito de la cuenca del río Ilave, registradas en las estaciones meteorológicas de Mazo cruz, Laraqueri, Juli, Ilave y Puno; en



ella se puede apreciar que la variación mensual de la humedad relativa es de 50 a 75 % que corresponden a los meses de junio y febrero, respectivamente; la humedad relativa anual en promedio es de 59 %. En la figura 5, se muestra gráficamente el comportamiento mensual de la temperatura mínima en las estaciones Mazo cruz, Laraqueri, Juli, Ilave y Puno.

Tabla 3. Humedad relativa promedio mensual (%) – Cuenca Ilave.

Estación	Mazo cruz	Laraqueri	Juli	Ilave	Puno	Promedio
Enero	67	70	70	73	66	69
Febrero	68	70	71	75	68	70
Marzo	67	71	70	75	67	70
Abril	61	65	62	68	60	63
Mayo	54	56	53	57	52	54
Junio	55	56	50	55	47	53
Julio	46	53	51	56	47	51
Agosto	47	52	52	57	48	51
Septiembre	52	54	56	58	51	54
Octubre	48	51	54	57	53	53
Noviembre	49	53	57	57	52	54
Diciembre	59	60	64	64	59	61
Promedio	56	59	59	63	56	59
Mínimo	46	51	50	55	47	51
Máximo	68	71	71	75	68	70

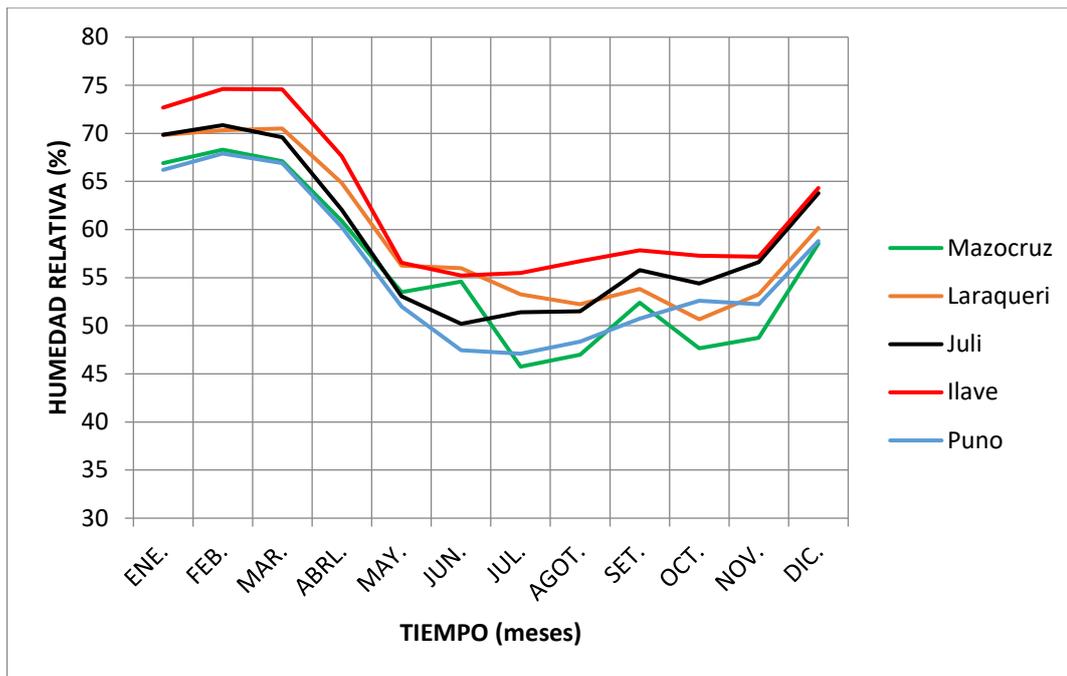


Figura 5. Variación mensual de la humedad relativa (%) – Cuenca Ilave.

En la tabla 4, se presenta la información meteorológica de velocidad del viento (m/s) promedio mensual en el ámbito en estudio, registradas en las estaciones meteorológicas de Mazo cruz, Laraqueri, Juli, Ilave y Puno; en ella se puede apreciar que la variación mensual de velocidad del viento entre 2.0 y 4.0 m/s correspondiente a junio y noviembre, respectivamente; la velocidad del viento anual en promedio es de 2.5 m/s. En la figura 6, se muestra gráficamente el comportamiento mensual de la velocidad del viento en las estaciones Mazo cruz, Laraqueri, Juli, Ilave y Puno.

Tabla 4. Velocidad del viento promedio mensual (m/s) – Cuenca Ilave.

Mes	Mazocruz	Laraqueri	Juli	Ilave	Puno	Promedio
Enero	1.7	2.6	2.4	3.4	2.5	2.5
Febrero	1.8	2.4	2.3	3.4	2.4	2.5
Marzo	1.7	2.4	2.1	3.2	2.3	2.4
Abril	1.6	2.4	2.2	3.2	2.2	2.3
Mayo	1.7	2.3	2.2	3.4	2.1	2.3
Junio	1.7	2.3	2.2	3.4	2.0	2.3
Julio	1.9	2.4	2.5	3.7	2.1	2.5
Agosto	1.8	2.5	2.5	3.8	2.2	2.6
Septiembre	2.2	2.7	2.8	3.8	2.5	2.8
Octubre	2.1	2.9	2.9	3.9	2.5	2.8
Noviembre	2.0	2.7	2.9	4.0	2.5	2.8
Diciembre	1.9	2.8	2.8	3.8	2.5	2.8
Promedio	1.8	2.5	2.5	3.6	2.3	2.5
Mínimo	1.6	2.3	2.1	3.2	2.0	2.3
Máximo	2.2	2.9	2.9	4.0	2.5	2.8

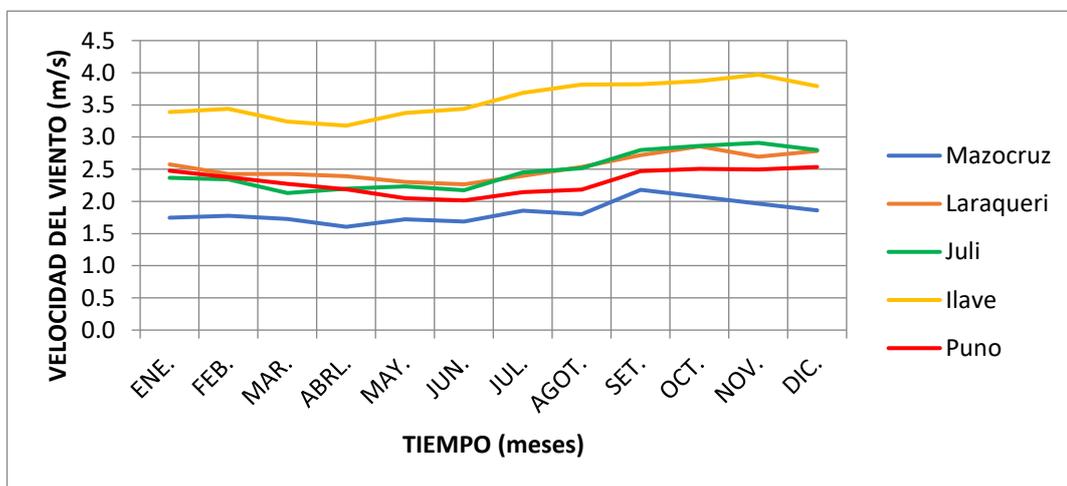


Figura 6. Variación mensual de la velocidad del viento (m/s) – Cuenca Ilave.

En la tabla 5, se presenta la información meteorológica de horas de sol (hr/día) promedio mensual en el ámbito en estudio, registradas en las estaciones meteorológicas de Mazo cruz, Laraqueri, Juli, Ilave y Puno; en ella se puede



apreciar que la variación mensual de las horas de sol es de 5.4 a 9.5 hr/día, que corresponden a los meses de enero y junio, respectivamente; las horas de sol anual en promedio es de 8.0 horas por día. En la figura 7, se muestra gráficamente el comportamiento mensual de las horas de sol en las estaciones Mazo cruz, Laraqueri, Juli, Ilave y Puno.

Tabla 5. Horas de sol promedio mensual (horas/día) – Cuenca Ilave.

Mes	Mazocruz	Laraqueri	Juli	Ilave	Puno	Promedio
Enero	5.4	6.4	6.5	6.3	6.2	6.2
Febrero	6.5	6.7	7.1	6.7	6.6	6.7
Marzo	5.9	7.0	7.1	6.8	7.0	6.8
Abril	5.7	7.7	8.4	7.6	7.8	7.4
Mayo	8.0	8.9	9.2	8.9	9.0	8.8
Junio	8.8	9.2	9.1	9.4	9.5	9.2
Julio	9.3	9.1	9.2	9.5	9.3	9.3
Agosto	9.3	9.1	9.3	9.3	9.2	9.3
Septiembre	8.4	8.6	9.1	8.9	8.7	8.7
Octubre	7.6	8.6	8.7	8.6	8.7	8.4
Noviembre	8.2	8.4	8.8	8.8	8.4	8.5
Diciembre	6.9	7.4	7.6	7.4	7.2	7.3
Promedio	7.5	8.1	8.4	8.2	8.1	8.0
Mínimo	5.4	6.4	6.5	6.3	6.2	6.2
Máximo	9.3	9.2	9.3	9.5	9.5	9.3

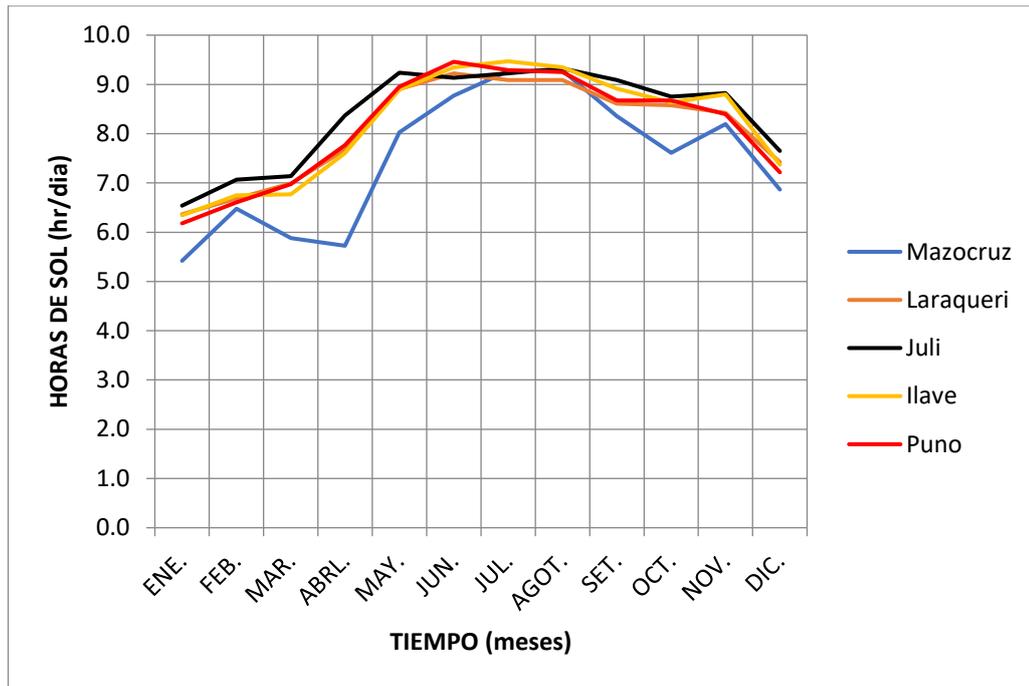


Figura 7. Variación mensual de horas de sol (horas/día) – Cuenca Ilave.

La Tabla 6 muestra los resultados de la estimación de la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) utilizando el método de Penman Montheit en el área de la estación Mazo cruz; entre ellos, se puede observar que la evapotranspiración de referencia mensual oscila entre 82.4 y 133.09 mm, correspondientes a junio y noviembre, y la evapotranspiración de referencia media anual es de 1269,2 mm.

Tabla 6. Evapotranspiración de referencia (mm) – Estación Mazo cruz.

Mes	Temp	Temp	Humedad	Viento	Insolación	Rad	ETo
	Min	Max					
	°C	°C	%	m/s	horas	MJ/m <sup>2</sup> /día	mm/mes
Enero	0.9	16.2	67.0	1.7	5.4	18.9	107.2
Febrero	1.1	16.0	68.0	1.8	6.5	20.3	100.0
Marzo	-0.4	16.4	67.0	1.7	5.9	18.2	102.3
Abril	-4.4	16.6	61.0	1.6	5.7	16.1	90.3
Mayo	-9.9	16.2	54.0	1.7	8.0	17.0	92.1
Junio	-12.9	15.6	55.0	1.7	8.8	16.8	82.4
Julio	-13.3	15.3	46.0	1.9	9.3	17.9	92.0
Agosto	-12.4	16.4	47.0	1.8	9.3	20.0	103.6
Septiembre	-9.5	17.4	52.0	2.2	8.4	21.1	114.4
Octubre	-7.3	18.5	48.0	2.1	7.6	21.5	128.7
Noviembre	-5.3	19.2	49.0	2.0	8.2	23.2	133.1
Diciembre	-1.2	17.7	59.0	1.9	6.9	21.3	123.1
Promedio	-6.2	16.8	56.0	1.8	7.5	19.4	1269.2

En la Tabla 7 se muestran los resultados de la estimación de la evapotranspiración de referencia regional en la estación Laraqueri, los cuales muestran que la evapotranspiración de referencia mensual oscila entre 88.51 y 136.46 mm correspondientes a junio y noviembre, respectivamente, y la evapotranspiración de referencia promedio anual es de 1322.55 mm.

Tabla 7. Evapotranspiración de referencia (mm) – Estación Laraqueri.

Mes	Temp	Temp	Humedad	Viento	Insolación	Rad	ET <sub>o</sub>
	Min	Max					
	°C	°C	%	m/s	horas	MJ/m <sup>2</sup> /día	mm/mes
Enero	2.6	15.3	70.0	2.6	6.4	20.5	111.2
Febrero	2.6	15.4	70.0	2.4	6.7	20.6	99.8
Marzo	1.6	15.5	71.0	2.4	7.0	20.0	105.3
Abril	-0.5	15.9	65.0	2.4	7.7	18.9	98.7
Mayo	-4.4	15.9	56.0	2.3	8.9	18.3	98.2
Junio	-7.5	15.7	56.0	2.3	9.2	17.4	88.5
Julio	-7.9	15.4	53.0	2.4	9.1	17.8	94.0
Agosto	-5.8	16.2	52.0	2.5	9.1	19.8	107.1
Septiembre	-3.3	17.0	54.0	2.7	8.6	21.5	116.9
Octubre	-0.9	17.7	51.0	2.9	8.6	23.1	136.2
Noviembre	0.8	18.5	53.0	2.7	8.4	23.5	136.5
Diciembre	1.9	17.4	60.0	2.8	7.4	22.1	130.3
Promedio	-1.7	16.3	59.0	2.5	8.1	20.3	1322.6

En la tabla 8 se muestran los resultados de la estimación de la evapotranspiración de referencia regional en la estación Juli, los cuales muestran que la evapotranspiración de referencia mensual oscila entre 83,86 y 128,65 mm, correspondientes a junio y noviembre, respectivamente y la evapotranspiración de referencia media anual es de 1267,62 mm.

Tabla 8. Evapotranspiración de referencia (mm) – Estación Juli.

Mes	Temp	Temp	Humedad	Viento	Insolación	Rad	ET <sub>o</sub>
	Min	Max					
	°C	°C	%	m/s	horas	MJ/m <sup>2</sup> /día	mm/mes
Enero	5.2	14.0	70.0	2.4	6.5	20.6	109.2
Febrero	5.2	14.0	71.0	2.3	7.1	21.3	98.8
Marzo	4.9	14.1	70.0	2.1	7.1	20.1	103.4
Abril	3.6	14.2	62.0	2.2	8.4	19.9	98.9
Mayo	0.9	13.7	53.0	2.2	9.2	18.7	94.6
Junio	-0.5	13.1	50.0	2.2	9.1	17.3	83.9
Julio	-0.9	12.8	51.0	2.5	9.2	17.9	89.7
Agosto	0.1	13.4	52.0	2.5	9.3	20.1	101.0
Septiembre	2.1	14.1	56.0	2.8	9.1	22.2	111.1
Octubre	3.4	14.8	54.0	2.9	8.7	23.3	127.2
Noviembre	4.5	15.4	57.0	2.9	8.8	24.1	128.7
Diciembre	5.2	14.6	64.0	2.8	7.6	22.4	121.3
Promedio	2.8	14.0	59.0	2.5	8.3	20.7	1267.6

En la tabla 9 se muestran los resultados de la estimación de la evapotranspiración de referencia regional en la estación de Ilave, los cuales muestran que la evapotranspiración de referencia mensual oscila entre 92,68 y 136,76 mm, correspondientes a junio y noviembre, respectivamente, y la evapotranspiración de referencia media anual es de 1317,50 mm.

Tabla 9. Evapotranspiración de referencia (mm) – Estación Ilave.

Mes	Temp Min	Temp Max	Humedad	Viento	Insolación	Rad	ETo
	°C	°C	%	m/s	horas	MJ/m <sup>2</sup> /día	mm/mes
Enero	4.6	14.9	73.0	3.4	6.3	20.3	108.6
Febrero	4.8	14.9	75.0	3.4	6.7	20.6	96.5
Marzo	4.3	15.0	75.0	3.2	6.8	19.7	101.8
Abril	2.4	15.2	68.0	3.2	7.6	18.8	97.8
Mayo	-1.0	14.8	57.0	3.4	8.9	18.3	101.5
Junio	-3.2	14.3	55.0	3.4	9.4	17.7	92.7
Julio	-3.6	14.1	56.0	3.7	9.5	18.3	97.9
Agosto	-2.4	14.9	57.0	3.8	9.3	20.1	108.6
Septiembre	0.1	15.5	58.0	3.8	8.9	21.9	116.4
Octubre	1.8	16.3	57.0	3.9	8.6	23.1	132.5
Noviembre	2.9	17.0	57.0	4.0	8.8	24.1	136.8
Diciembre	4.2	16.1	64.0	3.8	7.4	22.0	126.5
Promedio	1.2	15.3	63.0	3.6	8.2	20.4	1317.5

En la tabla 10 se muestran los resultados de la evaluación de la evapotranspiración de referencia regional de la estación Puno, donde se observa que la evapotranspiración de referencia mensual oscila entre 88,26 y 135,96 mm, correspondientes a junio y noviembre, respectivamente, y la evapotranspiración de referencia promedio anual es de 1332,35 mm.

Tabla 10. Evapotranspiración de referencia (mm) – Estación Puno.

Mes	Temp Min	Temp Max	Humedad	Viento	Insolación	Rad	ETo
	°C	°C	%	m/s	horas	MJ/m <sup>2</sup> /día	mm/mes
Enero	5.4	16.3	66.0	2.5	6.2	20.2	116.9
Febrero	5.3	16.0	68.0	2.4	6.6	20.5	103.1
Marzo	5.1	15.9	67.0	2.3	7.0	19.9	109.6
Abril	3.4	15.8	60.0	2.2	7.8	19.0	100.9
Mayo	0.8	15.6	52.0	2.1	9.0	18.3	97.3
Junio	-0.6	15.3	47.0	2.0	9.5	17.6	88.3
Julio	-1.2	15.1	47.0	2.1	9.3	17.9	93.3
Agosto	-0.1	15.8	48.0	2.2	9.2	19.8	106.2
Septiembre	1.9	16.6	51.0	2.5	8.7	21.5	117.7
Octubre	3.2	17.3	53.0	2.5	8.7	23.2	133.4
Noviembre	4.4	17.9	52.0	2.5	8.4	23.5	136.0
Diciembre	4.9	17.3	59.0	2.5	7.2	21.8	129.8
Promedio	2.7	16.2	56.0	2.3	8.1	20.3	1332.4

La Tabla 11 muestra un resumen de los resultados de la estimación de la evapotranspiración de referencia utilizando el método de Penman Monteith, en el ámbito de la cuenca del río Ilave y en la figura 8, se muestra gráficamente el comportamiento mensual de la evapotranspiración de referencia en las estaciones Mazo cruz, Laraqueri, Juli, Ilave y Puno.

Tabla 11. Resumen de evapotranspiración de referencia (mm) - Penman  
Monteith.

Mes	Mazo cruz	Laraqueri	Juli	Ilave	Puno	Promedio
Enero	107.18	111.19	109.18	108.60	116.92	110.61
Febrero	100.02	99.81	98.77	96.52	103.07	99.64
Marzo	102.29	105.25	103.41	101.81	109.56	104.46
Abril	90.34	98.72	98.92	97.80	100.89	97.33
Mayo	92.09	98.20	94.57	101.53	97.29	96.74
Junio	82.40	88.51	83.86	92.68	88.26	87.14
Julio	91.96	93.97	89.68	97.87	93.28	93.35
Agosto	103.55	107.10	100.98	108.60	106.17	105.28
Septiembre	114.44	116.88	111.09	116.37	117.71	115.30
Octubre	128.65	136.17	127.20	132.50	133.44	131.59
Noviembre	133.09	136.46	128.65	136.76	135.96	134.18
Diciembre	123.14	130.30	121.33	126.46	129.80	126.21
Total	1269.15	1322.56	1267.64	1317.50	1332.35	1301.84

En la tabla 11 se puede apreciar que la evapotranspiración de referencia anual estimado con la ecuación de Penman Monteith, en la estación de Mazo cruz es 1269.15 mm, en la estación Laraqueri es de 1322.56 mm, en Juli 1267.64 mm, en Ilave 1317.50 mm y en Puno 1322.35; en promedio para la cuenca del río Ilave es de 1301.84 mm. En la figura 8. Se muestra gráficamente la variación mensual de la evapotranspiración de referencia-Penman Monteith.

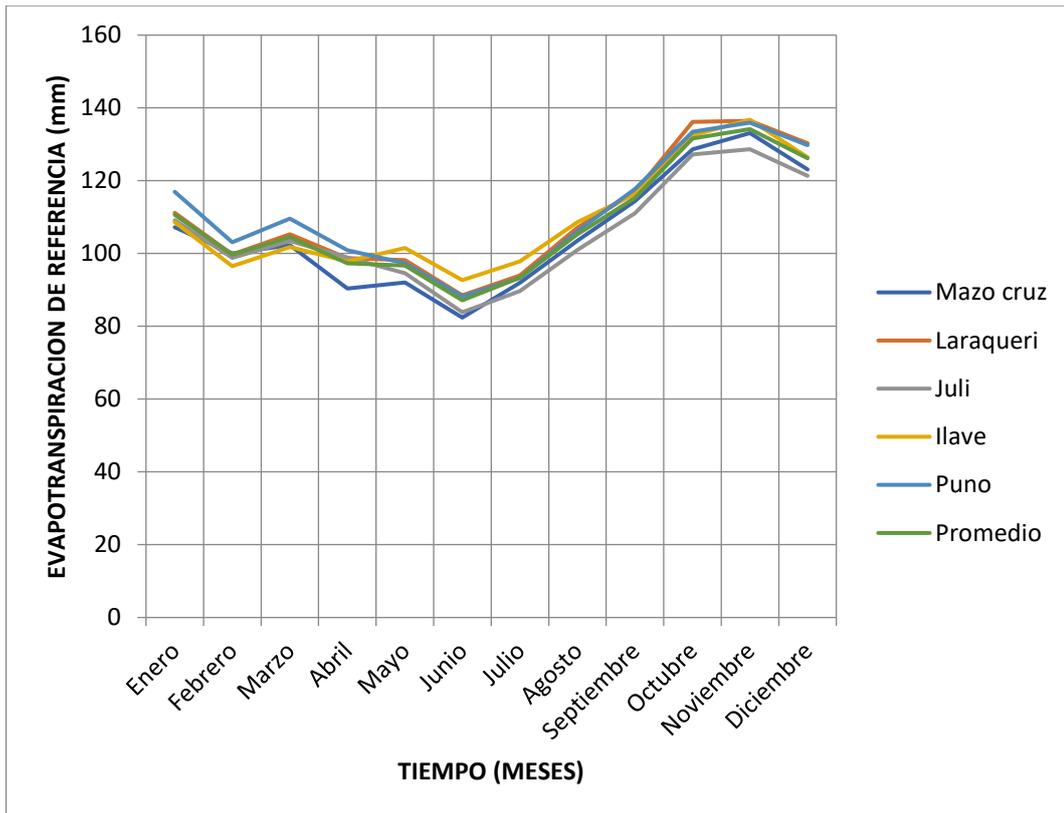


Figura 8. Variación mensual de la evapotranspiración de referencia-Penman Monteith

#### 4.1.2. Evapotranspiración de referencia método Hargreaves y Samani

La Tabla 12 muestra los resultados de la estimación comparativa de la evapotranspiración de referencia utilizando el método de Hargreaves y Samani, en el ámbito de la cuenca del río Ilave, en ella se puede apreciar que la evapotranspiración de referencia mensual varía de 64.8 mm que corresponde al mes de junio de la estación Juli y 140.2 mm que corresponde al mes de noviembre de la estación Mazo cruz y la evapotranspiración de referencia promedio anual de la cuenca Ilave es de 1170.10 mm.

Tabla 12. Evapotranspiración de referencia (mm)- Método Hargreaves y Samani.

Mes	Mazo cruz	Laraqueri	Juli	Ilave	Puno
Enero	123.4	114.1	97.7	104.7	105.0
Febrero	106.2	100.1	86.0	92.3	91.1
Marzo	114.5	106.4	89.4	97.1	93.7
Abril	101.2	95.4	80.7	87.9	84.3
Mayo	88.4	87.7	73.5	83.5	77.9
Junio	75.4	77.8	64.8	73.6	68.6
Julio	78.8	81.5	68.0	77.6	72.9
Agosto	94.6	96.1	78.5	89.3	85.0
Septiembre	112.0	110.3	87.9	99.3	96.6
Octubre	133.8	127.2	101.9	111.7	111.2
Noviembre	140.2	132.2	103.1	112.8	113.5
Diciembre	135.6	129.4	102.4	111.6	113.1
Anual	1304.0	1258.1	1034.1	1141.3	1112.9

#### 4.1.3. Calibración del coeficiente HE de la ecuación de Hargreaves y Samani

En la tabla 13 se presentan los resultados de la calibración del coeficiente HE de la ecuación de Hargreaves y Samani, en el ámbito de la cuenca del río Ilave y en la figura 8, se muestra gráficamente el comportamiento mensual de la evapotranspiración de referencia en las estaciones Mazo cruz, Laraqueri, Juli, Ilave y Puno. En la figura 9, se muestra gráficamente el comportamiento mensual del coeficiente HE de la ecuación de Hargreaves y Samani



Tabla 13. Coeficiente HE de la ecuación Hargreaves y Samani – cuenca Ilave

Mes	Mazo cruz	Laraqueri	Juli	Ilave	Puno
Enero	0.45	0.49	0.55	0.51	0.55
Febrero	0.48	0.50	0.57	0.52	0.56
Marzo	0.46	0.50	0.57	0.52	0.57
Abril	0.46	0.51	0.60	0.54	0.60
Mayo	0.51	0.54	0.61	0.57	0.60
Junio	0.53	0.54	0.62	0.58	0.61
Julio	0.55	0.54	0.61	0.58	0.61
Agosto	0.53	0.54	0.60	0.57	0.60
Septiembre	0.51	0.52	0.61	0.56	0.59
Octubre	0.49	0.52	0.60	0.57	0.59
Noviembre	0.48	0.51	0.60	0.57	0.58
Diciembre	0.47	0.50	0.58	0.56	0.56
Promedio	0.49	0.52	0.59	0.55	0.58

En la tabla 13 se puede apreciar que el coeficiente HE de la ecuación de Hargreaves y Samani, en la estación Mozo cruz varia de 0.45 a 0.55, en la estación Laraqueri de 0.49 a 0.54, en Juli de 0.55 a 0.62, en Ilave de 0.51 a 0.58 y en Puno de 0.55 a 0.61. y en promedio para la cuenca Ilave es de 0.55.

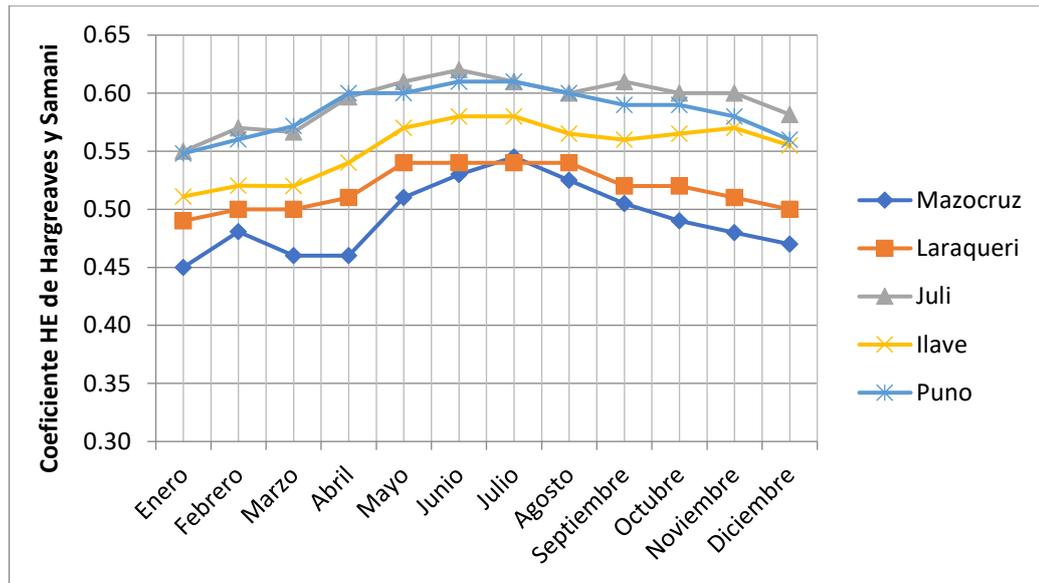


Figura 9. Variación mensual del coeficiente HE de Hargreaves y Samani

#### 4.1.4. Evapotranspiración de referencia método Hargreaves y Samani calibrado

La Tabla 14 muestra los resultados de la evaluación de la evapotranspiración de referencia usando el método de Hargreaves y Samani calibrado para el ámbito de la cuenca del río Ilave, en ella se puede apreciar que la evapotranspiración de referencia mensual varía de 64.8 mm que corresponde al mes de junio de la estación Juli y 140.2 mm que corresponde al mes de noviembre de la estación Mazo cruz y la evapotranspiración de referencia promedio anual es de 1315.17mm. y en la figura 10, se muestra gráficamente el comportamiento mensual de la evapotranspiración de referencia en las estaciones Mazo cruz, Laraqueri, Juli, Ilave y Puno.

Tabla 14. Evapotranspiración de referencia (mm) - Hargreaves y Samani calibrado

Estación	Mazo cruz	Laraqueri	Juli	Ilave	Puno
Enero	107.72	111.32	109.09	107.50	117.15
Febrero	100.89	100.17	100.35	96.87	104.34
Marzo	102.38	106.47	103.72	101.97	110.24
Abril	89.65	98.19	101.72	97.56	107.51
Mayo	91.46	98.99	97.26	101.94	101.22
Junio	83.46	88.32	88.63	93.03	92.26
Julio	91.70	92.53	90.58	98.24	98.20
Agosto	103.00	108.80	101.59	107.83	111.08
Septiembre	113.95	117.20	115.45	117.10	122.05
Octubre	129.62	134.96	130.02	132.52	139.93
Noviembre	131.62	136.13	130.85	135.28	138.71
Diciembre	124.21	129.45	123.28	127.90	130.72
Anual	1269.64	1322.54	1292.54	1317.74	1373.41

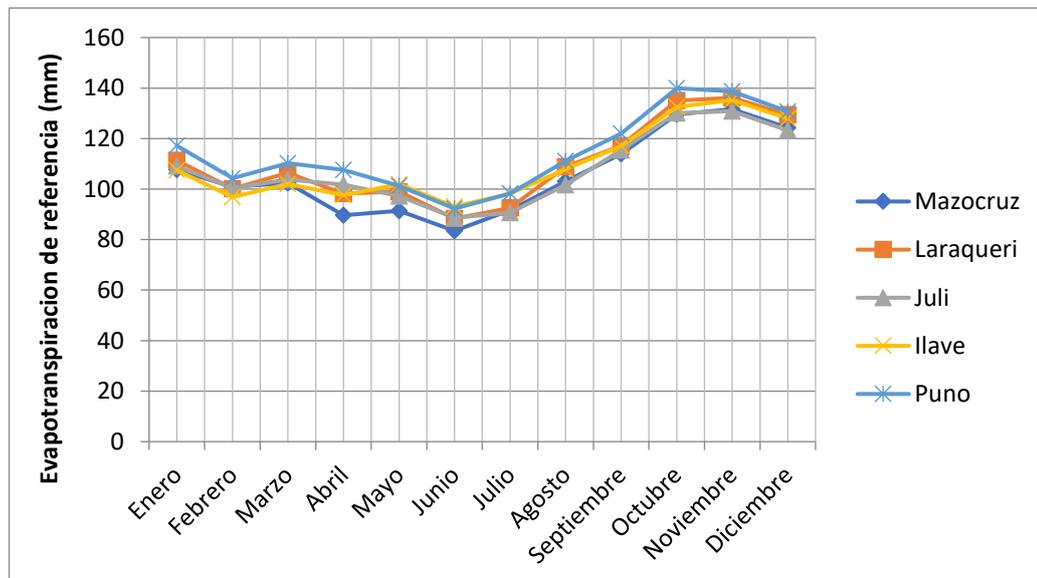


Figura 10. Variación mensual de la ETo Hargreaves y Samani calibrado

#### 4.1.4. Análisis estadístico

En la tabla 15 se presentan los resultados de la estimación del coeficiente de determinación entre los resultados de ETo Penman Monteith y ETo Hargreaves y Samani, en ella se puede apreciar que los coeficientes de correlación varía de 0.7725 que corresponde a la estación Ilave y 0.9467 que corresponde a la estación Puno; así mismo, en esta tabla se presentan las ecuaciones lineales correspondientes. En las figuras 11 al 15, se muestra gráficamente la correlación entre los resultados de las estimaciones de la evapotranspiración de referencia mediante el método de Penman Monteith y el método de Hargreaves y Samani.

Tabla 15. Resultados del análisis estadístico modelo lineal

Estación	Sin Calibrar		Con calibración	
	Ecuación lineal	Coefficiente correlación	Ecuación lineal	Coefficiente correlación
Mazo cruz	$Y = 1.8445 X - 22.9500$	0.8393	$Y = 1.0004 X - 0.0818$	0.9973
Laraqueri	$Y = 0.1074 X - 13.5280$	0.9185	$Y = 1.0124 X - 1.3697$	0.9968
Juli	$Y = 0.8864 X - 7.4642$	0.8931	$Y = 0.9858X + 1.3333$	0.9939
Ilave	$Y = 0.7879 X + 8.6104$	0.7725	$Y = 1.0075 X - 0.8441$	0.9971
Puno	$Y = 0.9576 X - 13.57$	0.9467	$Y = 1.0077 X - 0.7711$	0.9983

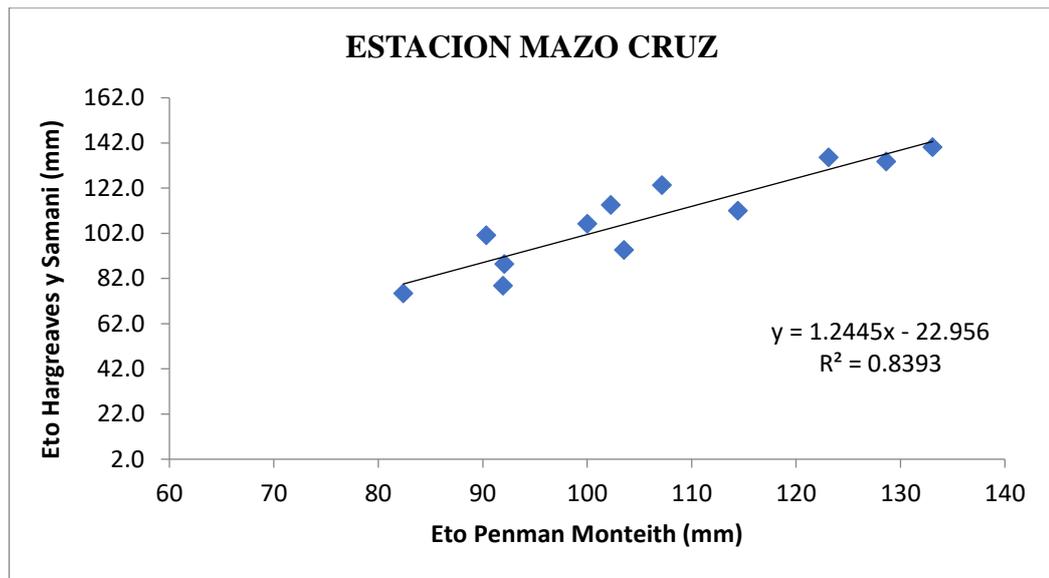


Figura 11. Modelo lineal entre ETo Penman Monteith y ETo Hargreaves y Samani – Estación Mazo cruz.

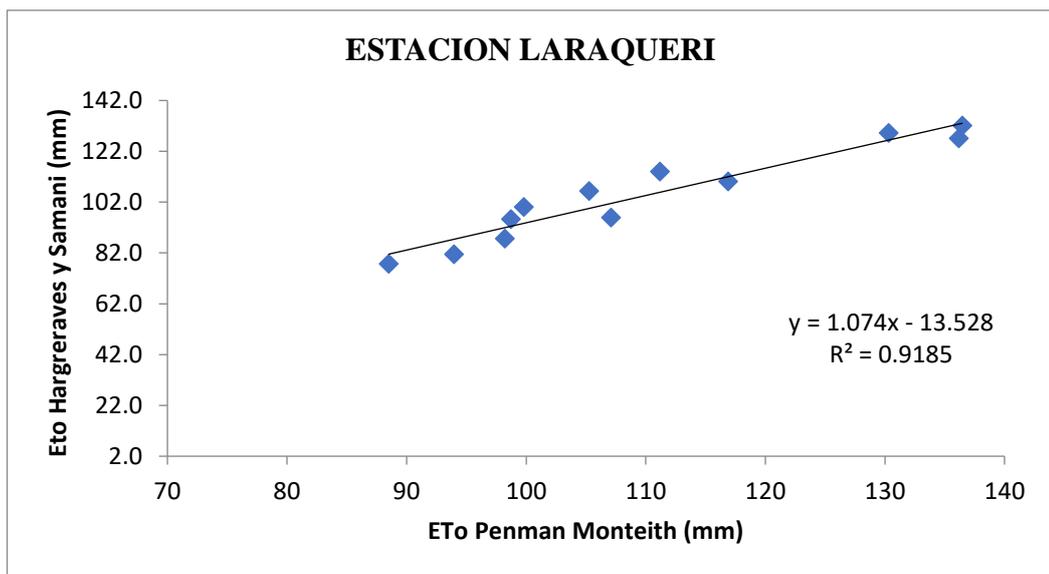


Figura 12. Modelo lineal entre ETo Penman Monteith y ETo Hargreaves y Samani – Estación Laraqueri.

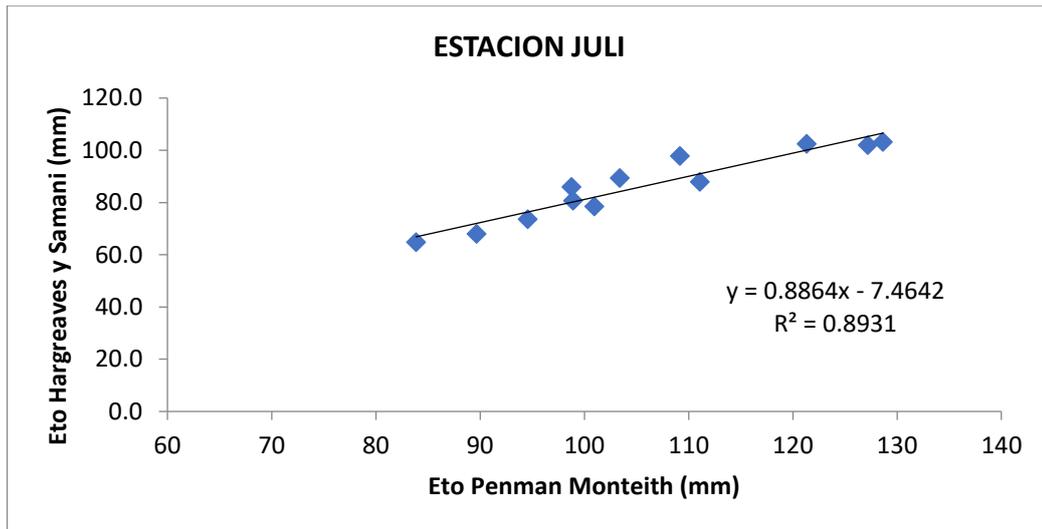


Figura 13. Modelo lineal entre ETo Penman Monteith y ETo Hargreaves y Samani – Estación Juli.

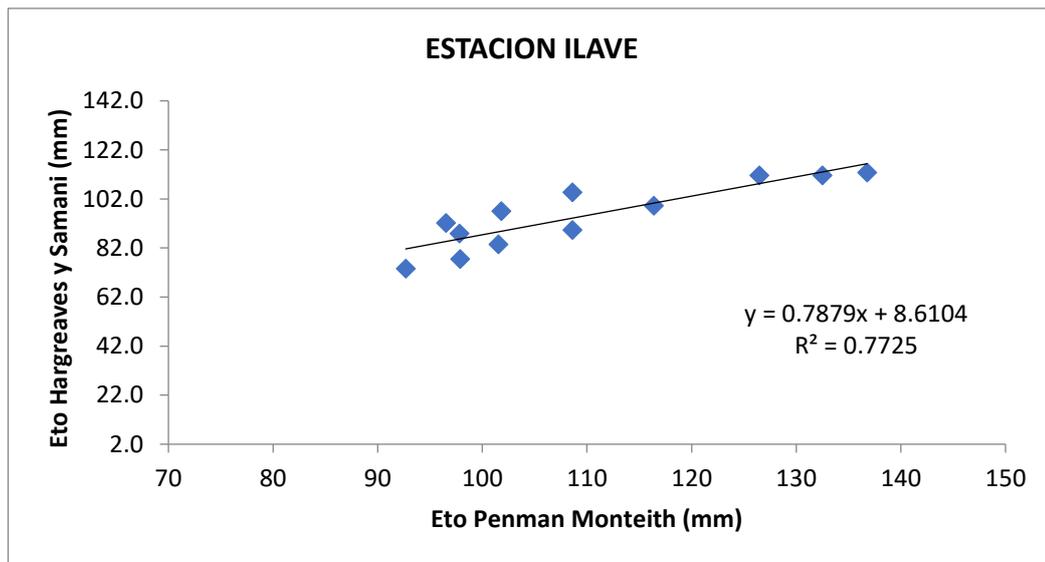


Figura 14. Modelo lineal entre ETo Penman Monteith y ETo Hargreaves y Samani – Estación Ilave.

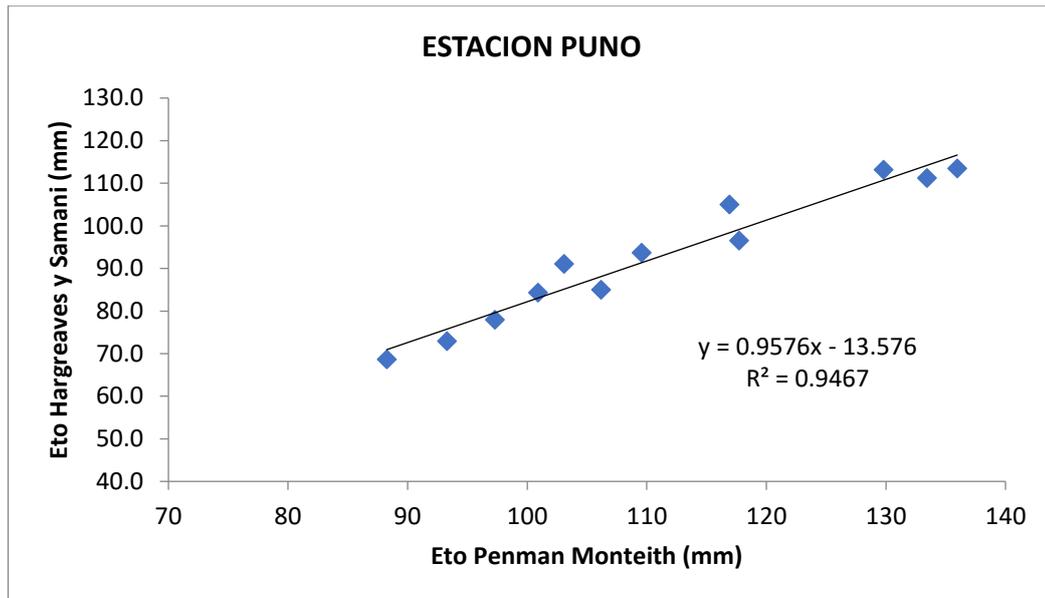


Figura 15. Modelo lineal entre ETo Penman Monteith y ETo Hargreaves y Samani – Estación Puno.

En la tabla 15 se presentan los resultados de la estimación del coeficiente de determinación entre los resultados de ETo Penman Monteith y ETo Hargreaves y Samani calibrado, para el ámbito de la cuenca Ilave, en ella se puede apreciar que los coeficientes de correlación varía de 0.9968 que corresponde a la estación Laraqueri y 0.9983 que corresponde a la estación Puno; así mismo, en esta tabla se presentan las ecuaciones lineales correspondientes. En las figuras 16 al 20, se muestra gráficamente la correlación entre los resultados de evapotranspiración de referencia estimado mediante el método de Penman Monteith y el método de Hargreaves y Samani calibrado, para el ámbito de la cuenca Ilave.

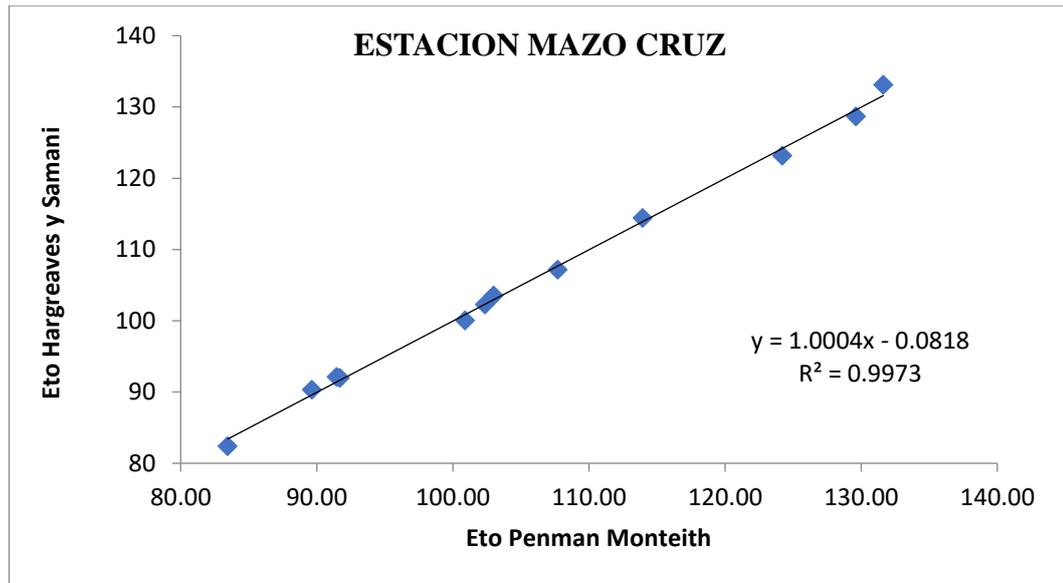


Figura 16. Modelo lineal entre ETo Penman Monteith y ETo Hargreaves y Samani calibrado – Estación Mazo cruz.

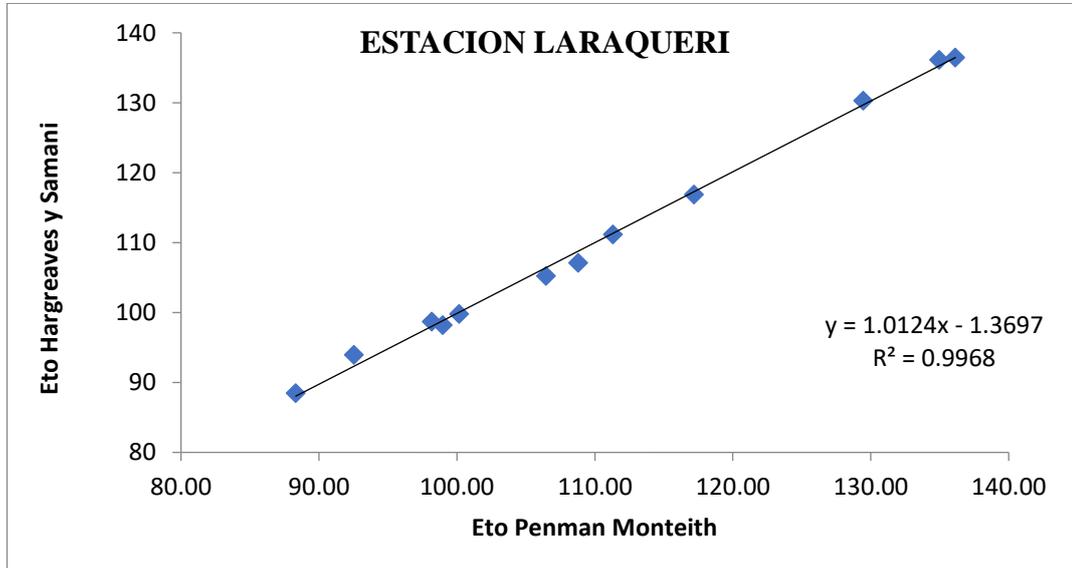


Figura 17. Modelo lineal entre ETo Penman Monteith y ETo Hargreaves y Samani calibrado – Estación Laraqueri

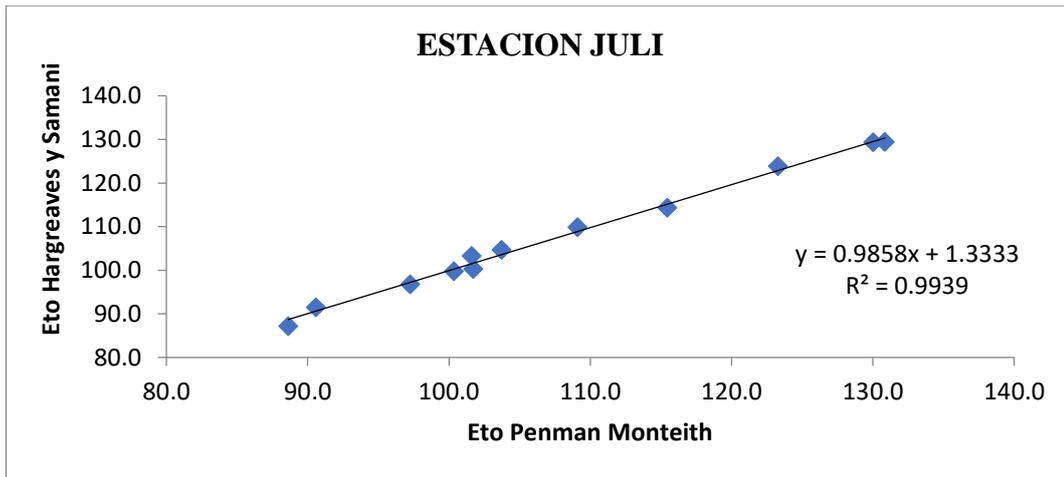


Figura 18. Modelo lineal entre ETo Penman Monteith y ETo Hargreaves y Samani calibrado – Estación Juli

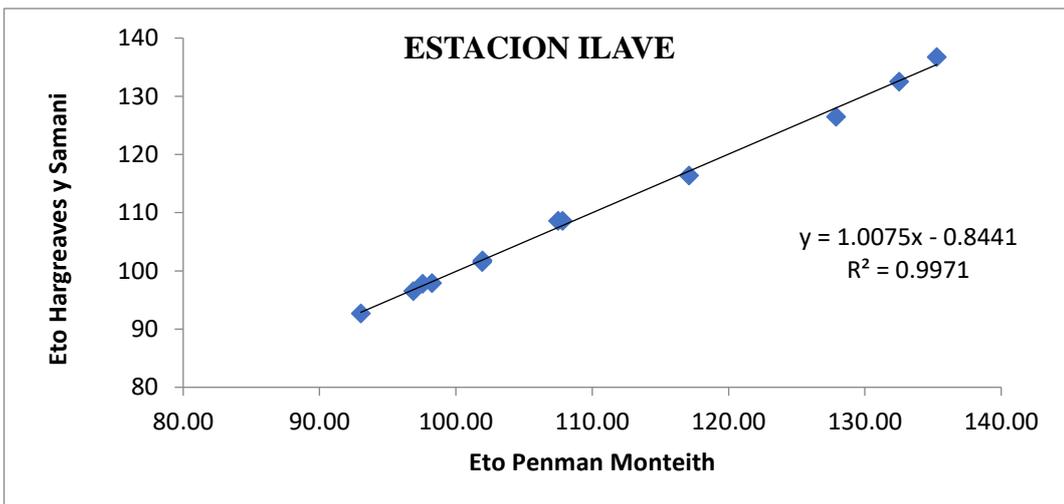


Figura 19. Modelo lineal entre ETo Penman Monteith y ETo Hargreaves y Samani calibrado – Estación Ilave.

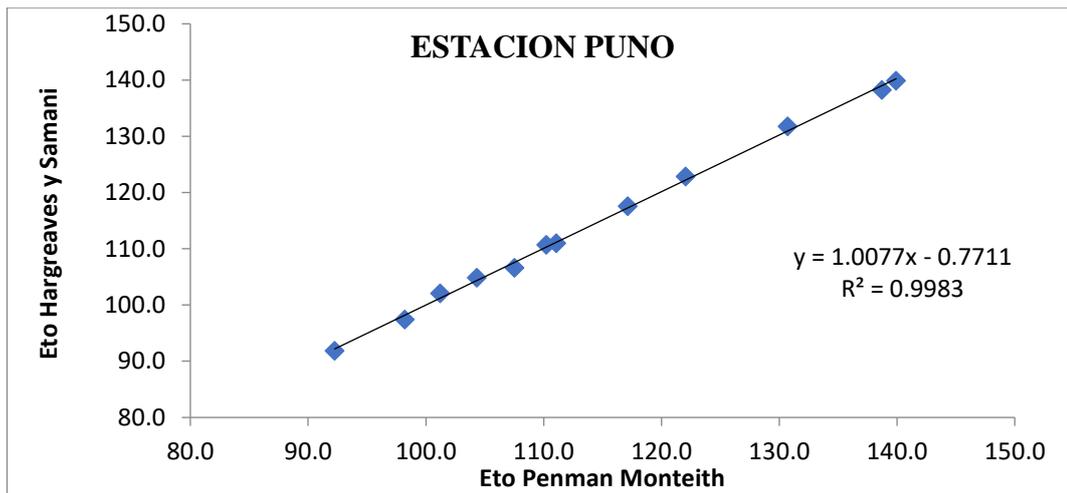


Figura 20. Modelo lineal entre ETo Penman Monteith y ETo Hargreaves y Samani calibrado – Estación Puno.

## 4.2. DISCUSION DE RESULTADOS.

### 4.2.1. Evapotranspiración de referencia.

Los resultados de evapotranspiración de referencia anual estimado mediante la ecuación de Hargreaves y Samani calibrada en la investigación es de 1269.64 para la estación Mazo cruz, 1322.54 para Laraqueri, 1292.5 mm para la estación juli, 1317.74 para Ilave y 1373.4 para Puno, el mismo es concordante con lo manifestado por los investigadores Charaja (2017) quien obtuvo un valor de 1,262.9 mm para la cuenca del lago Titicaca zona peruana, Huaccoro (2017) determino un valor de 1485.7 mm al año en la cuenca del rio Huancané, y Cauna (2019) para la provincia de Puno obtiene el valor de 1378.42 mm.

### 4.2.2. Coeficiente HE de la ecuación de Hargreaves y Samani

Los resultados de la estimación del coeficiente empírico HE promedio anual de la ecuación de Hargreaves y Samani son: 0.49 para Mazo cruz, 0.52 para Laraqueri, 0.59 para Juli, 0.55 para Ilave y 0.58 para Puno, todos son



mayores a 0.5 que es el coeficiente original a excepción de la estación Mazo cruz que es menor en 0.1; el coeficiente HE varía de acuerdo al lugar y clima, Entre los investigadores que realizaron la calibración de la ecuación de Hargreaves y Samani se puede mencionar a Tabari y Talaei (2011) proponen un valor de  $HE = 0.0028$  para un clima frío de Iran, Kelso-Bucio (2012) concluyen en que los resultados indican una mejora significativa en la estimación ETo en los estados de Chiapas, Oaxaca, Puebla y Veracruz, México. Almorox (2012) estima  $HE = 0.49$  para Coronel Dorrego, Argentina, De Sousa et al (2013) concluye que Evapotranspiración de referencia estimada por el método Hargreaves-Samani no calibrado sobrestima en todos los meses, Trajkovic (2007) para la región de los Balcanes Occidentales, Sudeste de Europa propone un valor de  $HE = 0.424$ , Čadro et al (2017) validaron que el método de Hargreaves-Samani ajustado es el método con mejor rendimiento, Xu et al (2012) mencionan que para regiones húmedas de China calibrada funciona considerablemente mejor que el original, Dejaman et al, (2016) de acuerdo a los resultados obtuvieron un coeficiente de determinación  $R^2 > 0.60$ , Trajkovic et al (2020) concluyen que la ETo calibrados basados en la temperatura con la ecuación de PM estándar son los más adecuados para estimar la ETo en la cuenca de Pannoni. Entre otros autores que utilizaron la ecuación de PM para calibrar la ecuación de HS, se mencionan a Quej et al (2019) en la península de Yucatán, México, Xu y Sing (2002) en la estación de Changins en Suiza, Toro et al (2015) en zona Norte del eje bananero del Urabá Antioqueño de Colombia, Kisi (2014) en la región mediterránea de Turquía, Tabari (2010) en cuatro climas de Irán



#### 4.2.3. Correlación lineal.

Los resultados de la comparación estadística entre ETo Penman Monteith y ETo Hargreaves y Samani mensual nos muestra que el coeficiente de determinación  $R^2$ , fue mayor a 0.99 para las estaciones Juli, Puno, Huancané y Azángaro, con un promedio de 0.995, al respecto se puede concluir que las dos variables tiene una alta correlación.



## V. CONCLUSIONES

- La evapotranspiración de referencia anual en la región de la cuenca del río Ilave calculada mediante el método Penman Monteith es de 1269.15 mm en Mazo cruz, 1322.56 mm en Laraqueri, 1267.64 en Juli, 1317.50 en Ilave y 1332.35 en Puno y con el método de Hargreaves y Samani calibrada es de 1269.64 mm en Mazo cruz, 1322.54 mm en Laraqueri, 1292.54 en Juli, 1317.74 en Ilave y 1373.41 en Puno.
- En la investigación se ha logrado calibrar la ecuación de Hargreaves y Samani de manera satisfactoria, llegando a obtener el coeficiente HE promedio de 0.49 para la estación Mazocruz, 0.52 para Laraqueri, 0.59 para Juli y 0.58 para Puno.
- Existe una alta correlación entre ETo Penman Monteith y ETo Hargreaves y Samani calibrada, dado que el coeficiente de determinación  $R^2$  es mayor a 0.99 en las 05 estaciones estudiadas.
- La ecuación de Hargreaves y Samani calibrada se puede usar en la cuenca Ilave como un método válido para determinar la evapotranspiración de referencia y las necesidades hídricas de los cultivos a escala mensual sólo con datos de temperatura.



## VI. RECOMENDACIONES

Se recomienda:

- Realizar investigaciones sobre calibración del coeficiente HE de la ecuación de Hargreaves y Samani para otras cuencas de la región Puno para determinar la evapotranspiración de referencia utilizando solo datos meteorológicos de temperatura.
- Realizar investigaciones sobre calibración del coeficiente HE de la ecuación de Hargreaves y Samani utilizando métodos directos para su calibración.



## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alfaro. R. (2023). Determinación de una formula semiempirica para estimar la evapotranspiración de referencia en la estación meteorológica Puno, Perú. Published International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology ISO 3297:2007 Certified □ □ Impact Factor 7.12 □ □ Vol. 10, Issue 2, February 2023 DOI: 10.17148/IARJSET.2023.10206
- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., y Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo. *Estudio FAO Riego y Drenaje No. 56*. Roma, Italia.
- Almorox, J.; Aguirrea, M.; Elisei, V.; Commegna, M. (2012). Calibración del modelo de Hargreaves para la estimación de la evapotranspiración de referencia en Coronel Dorrego. *Rev. FCA UNCUYO*. 2012. 44(1): 101-109. ISSN impreso 0370-4661. ISSN (en línea) 1853-8665.
- Bachour, R., Walker, WR, Torres-Rua, AF y McKee, M. (2013). Assessment of Reference Evapotranspiration by the Hargreaves Method in the Bekaa Valley, Lebanon. *Irrigation and Drainage Engineering Journal*, 139 (11), 933–938. doi: 10.1061 / (asce) ir.1943-4774.0000646
- Breña, A. y Jacobo, M. (2006). Principios y fundamentos de la Hidrología Superficial. México D.F. Universidad Autónoma Metropolitana. [www.uamenlinea.uam.mx](http://www.uamenlinea.uam.mx)
- Čadro, S., Uzunović, M., Žurovec, J. y Žurovec, O. (2017). *Validación y calibración de varios métodos alternativos de evapotranspiración de referencia en las condiciones climáticas de Bosnia y Herzegovina. Investigación internacional sobre la conservación del suelo y el agua*, 5 (4), 309–324. doi: 10.1016 / j.iswcr.2017.07.002
- Campos D., F. (2005). Estimación empírica de la ETP en la república mexicana. *Ingeniería Hidráulica en México* 20 (3): 99-110.



- Campos D., F. 2005. Estimación empírica de la ETP en la república mexicana. *Ingeniería Hidráulica en México* 20 (3): 99-110.
- Cauna, D. (2019). Huella hídrica verde para producción de la papa y quinua para el periodo 2008 – 2017 en la provincia de puno. Tesis para optar el título profesional de: ingeniero agrícola. Universidad Nacional del Altiplano.
- Córdova M., M., Carrillo R., G., & Céleri, R. (2013). Errores en la estimación de la evapotranspiración de referencia de una zona de páramo andino debido al uso de datos mensuales, diarios y horarios. *Aqua-LAC*, 5, 14–22.
- Charaja, A. (2018). Evapotranspiración de los cultivos papa, quínuas y alfalfa estimados mediante métodos empíricos aplicados a la cuenca del lago Titicaca peruano. Tesis para optar grado académico de: magister scientiae en ingeniería de recursos hídricos. Universidad Nacional del Altiplano
- De Sousa, J.; Dantas, A.; Soares E.; Hammecker, C.; Gico, S.; Brayner de Oliveira C. (2013). Calibration of Hargreaves-Samani Equation for Estimating Reference Evapotranspiration in Sub-Humid Region of Brazil. *Journal of Water Resource and Protection*, 2013, 5, 1-5 Published Online December 2013 (<http://www.scirp.org/journal/jwarp>)  
<http://dx.doi.org/10.4236/jwarp.2013.512A001>
- Djaman, K., Tabari, H., Balde, AB, Diop, L., Futakuchi, K. e Irmak, S. (2016). Analyses, calibration and validation of evapotranspiration models to predict grass-reference evapotranspiration in the Senegal river delta. *Revista de hidrología: Estudios regionales*, 8, 82–94. doi: 10.1016 / j.ejrh.2016.06.003
- Droogers, P., and R. Allen G. (2002). Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions. *Irrig. Drain Syst.* 16 (1): 33-45.



- Gamez W. (2010). Texto básico de hidrología. Universidad Nacional Agraria, Managua. 150 pág.
- FAO. (2013). *Afrontar la escasez de agua. Un marco de acción para la Agricultura y la seguridad alimentaria*. Roma: FAO 2013. E-ISBN 978-92-5-307633-8. Obtenido de <http://www.fao.org/docrep/018/i3015s/i3015s.pdf>
- Fernández, M.D.; Orgaz, F.; López, J.C.; Cespedes, A.; Perez, J.; Bonachela, S.; Gallardo, M. (2001). Programación del riego de cultivos hortícolas bajo invernadero en el sudeste español. Editorial (Caja Rural de Almería y Málaga). 71 p.
- Gee, G., y Hillel, D. (1988). Groundwater recharge in arid regions: Review and critique of estimation methods. *Hydrology Processes*, n.2, p.255-266.
- George H. Hargreaves y Zohrab A. Samani. (1985). *Evapotranspiración del cultivo de referencia a partir de la temperatura. Ingeniería aplicada a la agricultura, 1* (2), 96–99. doi: 10.13031 / 2013.26773.
- Goehring Hube, M. R. (1989). *El Fenomeno de la Evapotranspiracion en la cuenca del Bío Bío*. Concepcion: Universidad de Concepcion. Tesis de Pregrado.
- Hargreaves, G.H., Samani, Z.A., (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Eng. in Agric.*, 1(2): 96-99
- Hillel, D. (1990). Role of irrigation in agricultural systems. *Irrigation of Agricultural Crop*. Edited by B. A. Stewart and D. R Nielsen. Agronomy No. 30,6-29.
- Huacoto, P. (2017). Determinación del método más eficiente para calcular la evapotranspiración potencial para un modelo lluvia - escorrentía en la cuenca Huancané. Tesis para obtener grado académico de ingeniero agrícola. Universidad Nacional del Altiplano Puno.



- Kelso-Bucio, Henry A., Bâ, Khalidou M., Sánchez-Morales, Saúl, & Reyes-López, Delfino. (2012). Calibración del exponente de la ecuación Hargreaves-ETo en los estados de Chiapas, Oaxaca, Puebla y Veracruz, México. *Agrociencia*, 46(3), 221-229. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1405-31952012000300002&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952012000300002&lng=es&tlng=es).
- Kisi, O. (2014). Comparison of different empirical methods for estimating daily reference evapotranspiration in Mediterranean climate. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. Submitted February 15, 2013; accepted August 20, 2013; posted ahead of print August 21, 2013. doi:10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000664
- Lujano A., Quispe J. y Lujano E. (2019). *Metodos alternativos de estimación de evapotranspiración de referencia en la estación Yauri – Cusca, Peru*. Revista de investigaciones altoandinas. Vol 21 no. 3 Puno Jul./set. 2019.
- Pereira, *et al.*, 2010, El Riego y sus Tecnologías, Centro Regional de Estudios del Agua Universidad de Castilla-La Mancha-España. 296 p.
- Pérez, G. (2015). Manual de hidrología aplicada. Lima, Peru. 227 pag.
- Quej VH, Almorox J, Arnaldo AJ, Moratiel M (2019) Evaluation of temperature-based methods for the estimation of reference evapotranspiration in the Yucatán Peninsula, Mexico. *Journal of Hydrologic Engineering* 24(2):5018029, DOI: 10.1061/(ASCE) HE.1943-5584.0001747
- Samani, Z. (2000). Estimating solar radiation and Evapotranspiration using minimum climatological data. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* , v.126, n.4, p.265-267.
- Sanchez Martinez, M. (2001). Métodos de estimación de la Evapotranspiración Utilizados en Chile. *Revista de Geografía Norte Grande*, 28, 3 – 10.



- Sentelhas, P. et al (2010). “Evaluation of FAO Penman-Monteith and Alternative Methods for Estimating Reference Evapotranspiration with Missing Data in Southern Ontario, Canada,” *Agricultural Water Management*, Vol. 97, No. 5, 2010, pp. 635-644. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2009.12.001>
- Tabari, H. (2010). Evaluation of Reference Crop Evapotranspiration Equations in Various Climates. *Water Resour Manage* (2010) 24:2311–2337 DOI 10.1007/s11269-009-9553-8
- Tabari, H., and P. Talaei H. 2011. Local of the Hargreaves and Priestley-Taylor equations for estimating reference evapotranspiration in arid and cold climates of Iran based on the Penman-Monteith model. *J. Hydrol. Eng.* 16 (10): 837-845
- Toro-Trujillo, A. María, Arteaga-Ramírez, Ramón, Vázquez-Peña, M. Alberto, & Ibáñez-Castillo, L. Alicia. (2015). Modelos para estimar la evapotranspiración de referencia en la zona norte bananera del Urabá Antioqueño (Colombia). *Agrociencia*, 49(8), 821-836. Recuperado en 18 de mayo de 2021, de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1405-31952015000800001&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952015000800001&lng=es&tlng=es).
- Tuñón, J. (2000). *Determinación experimental del balance hídrico del suelo y evaluación de la contaminación asociada a las prácticas agrícolas*. Departamento de Ciencias Experimentales, Universitat Jume I, Catellon. Tesis Doctoral
- Trajkovic, S. (2007). *Hargreaves versus Penman-Monteith en condiciones de humedad*. *Revista de ingeniería de riego y drenaje*, 133 (1), 38-42. doi: 10.1061 / (asce) 0733-9437 (2007) 133: 1 (38)
- Trajkovic, S., Gocic, M., Pongracz, R., Bartholy, J. y Milanovic, M. (2020). Assessment of Reference Evapotranspiration by Regionally Calibrated



Temperature-Based Equations. *KSCE Journal of Civil Engineering* DOI  
10.1007/s12205-020-1698-2.

Vásquez, A. Mejía, A., Faustino J., Terán R., Vásquez I., Díaz J., Vásquez C., Castro  
A., Tapia M. y Alcántara J. (2016). Manejo y gestión de cuencas hidrográficas.  
Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima-Perú. 707 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.

Wilson, E. M. (1990). *Engineering Hydrology*. Macmillan Press Ltd.

Xu, C. y Singh V. (2002). Cross Comparison of Empirical Equations for Calculating  
Potential Evapotranspiration with Data from Switzerland. *Water Resources  
Management* 16: 197–219, 2002. doi: 10.1023 / a: 1020282515975

Xu, J., Peng, S., Ding, J., Wei, Q. y Yu, Y. (2013). Evaluation and calibration of simple  
methods for daily reference evapotranspiration estimation in humid East  
China. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 59 (6), 845–858. doi: 10.1080 /  
03650340.2012.683425ANEXOS



## ANEXOS

Tabla 1. CALCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACION POTENCIAL METODO HARGREAVES Y SAMANI - ESTACION JULI

Variable	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
TEMPERATURA MAXIMA MENSUAL °C	13.90	13.90	13.90	14.10	13.50	12.80	12.50	13.10	13.80	14.70	15.00	14.50
TEMPERATURA MINIMA MENSUAL °C	4.90	4.80	4.60	3.20	0.80	-0.80	-1.10	0.00	1.90	3.30	4.20	4.80
TEMPERATURA MEDIA MENSUAL °C	9.4	9.4	9.3	8.7	7.2	6.0	5.7	6.6	7.9	9.0	9.6	9.7
RADIACION SOLAR EXTRA TERRESTRE	16.8	16.3	15.2	13.4	11.6	10.7	11.0	12.5	14.4	15.8	16.6	16.8
EVAPOTRANSPIRACION POTENCIAL (mm/dia)	3.15	3.07	2.88	2.69	2.37	2.16	2.19	2.53	2.93	3.29	3.44	3.30
DIAS DEL MES	31.0	28.0	31.0	30.0	31.0	30.0	31.0	31.0	30.0	31.0	30.0	31.0
EVAPOTRANSPIRACION POTENCIAL (mm/mes)	97.7	86.0	89.4	80.7	73.5	64.8	68.0	78.5	87.9	101.9	103.1	102.4

Tabla 2. CALCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACION POTENCIAL METODO HARGREAVES y SAMANI - ESTACION PUNO

Variable	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
TEMPERATURA MAXIMA MENSUAL °C	15.20	15.00	14.80	14.90	14.50	13.80	13.70	14.50	15.40	16.20	16.60	16.10
TEMPERATURA MINIMA MENSUAL °C	5.50	5.40	5.10	3.50	0.80	-0.90	-1.30	0.00	1.90	3.40	4.30	5.00
TEMPERATURA MEDIA MENSUAL °C	10.4	10.2	10.0	9.2	7.7	6.5	6.2	7.3	8.7	9.8	10.5	10.6
RADIACION SOLAR EXTRA TERRESTRE	16.8	16.3	15.2	13.4	11.6	10.7	11.0	12.5	14.4	15.8	16.6	16.8
EVAPOTRANSPIRACION POTENCIAL (mm/dia)	3.39	3.25	3.02	2.81	2.51	2.29	2.35	2.74	3.22	3.59	3.78	3.65
DIAS DEL MES	31.0	28.0	31.0	30.0	31.0	30.0	31.0	31.0	30.0	31.0	30.0	31.0
EVAPOTRANSPIRACION POTENCIAL (mm/mes)	105.0	91.1	93.7	84.3	77.9	68.6	72.9	85.0	96.6	111.2	113.5	113.1

Tabla 3. CALCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACION POTENCIAL METODO HARGREAVES Y - SAMANI - ESTACION ILAVE

Variable	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
TEMPERATURA MAXIMA MENSUAL °C	14.60	14.60	14.50	14.80	14.80	14.20	14.00	14.60	15.30	15.80	16.10	15.40
TEMPERATURA MINIMA MENSUAL °C	4.10	4.00	3.30	1.60	-2.20	-4.40	-5.00	-3.20	-0.10	2.00	2.90	3.60
TEMPERATURA MEDIA MENSUAL °C	9.4	9.3	8.9	8.2	6.3	4.9	4.5	5.7	7.6	8.9	9.5	9.5
RADIACION SOLAR EXTRA TERRESTRE	16.7	16.25	15.25	13.5	11.8	10.9	11.2	12.65	14.45	15.8	16.5	16.7
EVAPOTRANSPIRACION POTENCIAL (mm/dia)	3.4	3.3	3.1	2.9	2.7	2.5	2.5	2.9	3.3	3.6	3.8	3.6
DIAS DEL MES	31.0	28.0	31.0	30.0	31.0	30.0	31.0	31.0	30.0	31.0	30.0	31.0
EVAPOTRANSPIRACION POTENCIAL (mm/mes)	104.7	92.3	97.1	87.9	83.5	73.6	77.6	89.3	99.3	111.7	112.8	111.6

Tabla 4. CALCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACION POTENCIAL METODO HARGREAVES y SAMANI - ESTACION MAZO CRUZ

Variable	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
TEMPERATURA MAXIMA MENSUAL °C	16.20	16.00	16.40	16.60	16.20	15.60	15.30	16.40	17.40	18.50	19.20	17.70
TEMPERATURA MINIMA MENSUAL °C	0.9	1.1	-0.4	-4.4	-9.9	-12.9	-13.3	-12.4	-9.5	-7.3	-5.3	-1.2
TEMPERATURA MEDIA MENSUAL °C	8.6	8.6	8.0	6.1	3.2	1.4	1.0	2.0	4.0	5.6	7.0	8.3
RADIACION SOLAR EXTRA TERRESTRE	16.8	16.2	15.2	13.4	11.6	10.7	11.0	12.5	14.4	15.8	16.6	16.8
EVAPOTRANSPIRACION POTENCIAL (mm/dia)	4.0	3.8	3.7	3.4	2.9	2.5	2.5	3.1	3.7	4.3	4.7	4.4
DIAS DEL MES	31.0	28.0	31.0	30.0	31.0	30.0	31.0	31.0	30.0	31.0	30.0	31.0
EVAPOTRANSPIRACION POTENCIAL (mm/mes)	123.4	106.2	114.5	101.2	88.4	75.4	78.8	94.6	112.0	133.8	140.2	135.6

Tabla 5. CALCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACION POTENCIAL METODO HARGREAVES Y SAMANI - ESTACION LARAQUERI

Variable	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
TEMPERATURA MAXIMA MENSUAL °C	15.30	15.40	15.50	15.90	15.90	15.70	15.40	16.20	17.00	17.70	18.50	17.40
TEMPERATURA MINIMA MENSUAL °C	2.60	2.60	1.60	-0.50	-4.40	-7.50	-7.90	-5.80	-3.30	-0.90	0.80	1.90
TEMPERATURA MEDIA MENSUAL °C	9.0	9.0	8.6	7.7	5.8	4.1	3.8	5.2	6.9	8.4	9.7	9.7
RADIACION SOLAR EXTRATERRESTRE	16.8	16.2	15.2	13.4	11.6	10.7	11.0	12.5	14.4	15.8	16.6	16.8
EVAPOTRANSPIRACION POTENCIAL (mm/dia)	3.7	3.6	3.4	3.2	2.8	2.6	2.6	3.1	3.7	4.1	4.4	4.2
DIAS DEL MES	31.0	28.0	31.0	30.0	31.0	30.0	31.0	31.0	30.0	31.0	30.0	31.0
EVAPOTRANSPIRACION POTENCIAL (mm/mes)	114.1	100.1	106.4	95.4	87.7	77.8	81.5	96.1	110.3	127.2	132.2	129.4

Tabla 6. CALCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACION POTENCIAL METODO HARGREAVES Y SAMANI CALIBRADO - ESTACION JULI

Variable	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
TEMPERATURA MAXIMA MENSUAL °C	13.90	13.90	13.90	14.10	13.50	12.80	12.50	13.10	13.80	14.70	15.00	14.50
TEMPERATURA MINIMA MENSUAL °C	4.90	4.80	4.60	3.20	0.80	-0.80	-1.10	0.00	1.90	3.30	4.20	4.80
TEMPERATURA MEDIA MENSUAL °C	9.4	9.4	9.3	8.7	7.2	6.0	5.7	6.6	7.9	9.0	9.6	9.7
RADIACION SOLAR EXTRATERRESTRE	16.8	16.3	15.2	13.4	11.6	10.7	11.0	12.5	14.4	15.8	16.6	16.8
COEFICIENTE ECUACION HARGREAVES Y SAMANI	0.55	0.57	0.57	0.60	0.61	0.62	0.61	0.60	0.61	0.60	0.60	0.58
EVAPOTRANSPIRACION POTENCIAL (mm/dia)	3.52	3.58	3.35	3.39	3.14	2.95	2.92	3.28	3.85	4.19	4.36	3.98
DIAS DEL MES	31.0	28.0	31.0	30.0	31.0	30.0	31.0	31.0	30.0	31.0	30.0	31.0
EVAPOTRANSPIRACION POTENCIAL (mm/mes)	109.1	100.3	103.7	101.7	97.3	88.6	90.6	101.6	115.4	130.0	130.8	123.3

**Tabla 7, CALCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACION POTENCIAL METODO HARGREAVES y SAMANI CALIBRADO - ESTACION PUNO**

Variable	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
TEMPERATURA MAXIMA MENSUAL °C	15.20	15.00	14.80	14.90	14.50	13.80	13.70	14.50	15.40	16.20	16.60	16.10
TEMPERATURA MINIMA MENSUAL °C	5.50	5.40	5.10	3.50	0.80	-0.90	-1.30	0.00	1.90	3.40	4.30	5.00
TEMPERATURA MEDIA MENSUAL °C	10.4	10.2	10.0	9.2	7.7	6.5	6.2	7.3	8.7	9.8	10.5	10.6
RADIACION SOLAR EXTRATERRESTRE	16.8	16.3	15.2	13.4	11.6	10.7	11.0	12.5	14.4	15.8	16.6	16.8
COEFICIENTE ECUACION HARGREAVES Y SAMANI	HE	0.55	0.56	0.57	0.60	0.61	0.61	0.60	0.59	0.59	0.58	0.56
EVAPOTRANSPIRACION POTENCIAL (mm/dia)	Eto	3.78	3.73	3.56	3.58	3.27	3.17	3.58	4.07	4.51	4.62	4.22
DIAS DEL MES		31.0	28.0	31.0	30.0	31.0	31.0	31.0	30.0	31.0	30.0	31.0
EVAPOTRANSPIRACION POTENCIAL (mm/mes)	Eto	117.2	104.3	110.2	107.5	101.2	98.2	111.1	122.0	139.9	138.7	130.7

**Tabla 8, CALCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACION POTENCIAL METODO HARGREAVES y SAMANI CALIBRADO - ESTACION ILAVE**

Variable	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
TEMPERATURA MAXIMA MENSUAL °C	14.60	14.60	14.50	14.80	14.80	14.20	14.00	14.60	15.30	15.80	16.10	15.40
TEMPERATURA MINIMA MENSUAL °C	4.10	4.00	3.30	1.60	-2.20	-4.40	-5.00	-3.20	-0.10	2.00	2.90	3.60
TEMPERATURA MEDIA MENSUAL °C	9.4	9.3	8.9	8.2	6.3	4.9	4.5	5.7	7.6	8.9	9.5	9.5
RADIACION SOLAR EXTRATERRESTRE	Ro	16.7	16.25	15.25	13.5	11.8	10.9	11.2	12.65	14.45	15.8	16.5
COEFICIENTE ECUACION HARGREAVES Y SAMANI	HE	0.51	0.52	0.52	0.54	0.57	0.58	0.58	0.57	0.56	0.57	0.56
EVAPOTRANSPIRACION POTENCIAL (mm/dia)	Eto	3.47	3.46	3.29	3.25	3.29	3.10	3.17	3.48	3.90	4.27	4.51
DIAS DEL MES		31.0	28.0	31.0	30.0	31.0	31.0	31.0	30.0	31.0	30.0	31.0
EVAPOTRANSPIRACION POTENCIAL (mm/mes)	Eto	107.5	96.9	102.0	97.6	101.9	93.0	98.2	107.8	117.1	132.5	127.9

**Tabla 9. CALCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACION POTENCIAL METODO HARGREAVES y SAMANI CALIBRADO - ESTACION MAZO CRUZ**

Variable	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
TEMPERATURA MAXIMA MENSUAL °C	16.20	16.00	16.40	16.60	16.20	15.60	15.30	16.40	17.40	18.50	19.20	17.70
TEMPERATURA MINIMA MENSUAL °C	0.9	1.1	-0.4	-4.4	-9.9	-12.9	-13.3	-12.4	-9.5	-7.3	-5.3	-1.2
TEMPERATURA MEDIA MENSUAL °C	8.6	8.6	8.0	6.1	3.2	1.4	1.0	2.0	4.0	5.6	7.0	8.3
RADIACION SOLAR EXTRATERRESTRE	16.8	16.2	15.2	13.4	11.6	10.7	11.0	12.5	14.4	15.8	16.6	16.8
COEFICIENTE ECUACION HARGREAVES Y SAMANI	0.45	0.48	0.46	0.46	0.51	0.53	0.55	0.53	0.51	0.49	0.48	0.47
EVAPOTRANSPIRACION POTENCIAL (mm/dia)	3.47	3.60	3.30	2.99	2.95	2.78	2.96	3.32	3.80	4.18	4.39	4.01
DIAS DEL MES	31.0	28.0	31.0	30.0	31.0	30.0	31.0	31.0	30.0	31.0	30.0	31.0
EVAPOTRANSPIRACION POTENCIAL (mm/mes)	107.7	100.9	102.4	89.7	91.5	83.5	91.7	103.0	113.9	129.6	131.6	124.2

Tabla 10. CALCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACION POTENCIAL METODO HARGREAVES Y SAMANI CALIBRADO - ESTACION LARAQUERI

Variable	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
TEMPERATURA MAXIMA MENSUAL °C	15.30	15.40	15.50	15.90	15.90	15.70	15.40	16.20	17.00	17.70	18.50	17.40
TEMPERATURA MINIMA MENSUAL °C	2.60	2.60	1.60	-0.50	-4.40	-7.50	-7.90	-5.80	-3.30	-0.90	0.80	1.90
TEMPERATURA MEDIA MENSUAL °C	9.0	9.0	8.6	7.7	5.8	4.1	3.8	5.2	6.9	8.4	9.7	9.7
RADIACION SOLAR EXTRATERRESTRE	16.8	16.2	15.2	13.4	11.6	10.7	11.0	12.5	14.4	15.8	16.6	16.8
COEFICIENTE ECUACION HARGREAVES Y SAMANI	0.49	0.50	0.50	0.51	0.54	0.54	0.54	0.54	0.52	0.52	0.51	0.50
EVAPOTRANSPIRACION POTENCIAL (mm/dia)	3.59	3.58	3.43	3.27	3.19	2.94	2.98	3.51	3.91	4.35	4.54	4.18
DIAS DEL MES	31.0	28.0	31.0	30.0	31.0	30.0	31.0	31.0	30.0	31.0	30.0	31.0
EVAPOTRANSPIRACION POTENCIAL (mm/mes)	111.3	100.2	106.5	98.2	99.0	88.3	92.5	108.8	117.2	135.0	136.1	129.5

Tabla 11: Matriz de consistencia:

Interrogantes General y Específicas.	Hipótesis General	Objetivos General y Específicos	Variable dependiente	Variables independientes	Prueba estadística
<p>General: ¿Determinar la evapotranspiración de referencia estimada mediante la ecuación de Hargreaves y Samani calibrada para las condiciones climáticas de la cuenca del río Ilave?</p>	<p>La evapotranspiración de referencia se evalúa mediante ecuaciones basadas en temperatura calibradas bajo condiciones climáticas de la cuenca Ilave.</p>	<p>Determinar la evapotranspiración de referencia mediante ecuaciones basadas en temperatura calibradas bajo condiciones climáticas de la cuenca Ilave .</p>	<p>Evapotranspiración de referencia calibrado</p>	<p>Penman-Monteith. Hargreaves y Samani</p>	
<p>¿Cuánto es la evapotranspiración de referencia estimados mediante las ecuaciones de Hargreaves y Samani y Penman Monteith, para las localidades de Mazo cruz, Laraqueri, Juli, Ilave y Puno?</p>	<p>La evapotranspiración de referencia se estima mediante las ecuaciones del Penman Monteith y Hargreaves y Samani, para las localidades de Mazo cruz, Laraqueri, Juli, Ilave y Puno.</p>	<p>Estimar la evapotranspiración de referencia mediante las ecuaciones de Penman Monteith y Hargreaves y Samani, para las localidades de Mazo cruz, Laraqueri, Juli, Ilave y Puno.</p>	<p>Evapotranspiración de referencia</p>	<p>Temperatura máxima Temperatura mínima. Humedad relativa Velocidad del viento Radiación solar</p>	
<p>¿Cuál es el valor de los coeficientes de la ecuación de Hargreaves y Samani, calibrado con los resultados de la ecuación del Penman Monteith, para las condiciones climáticas de la cuenca del río Ilave?</p>	<p>El valor de los coeficientes de la ecuación de Hargreaves y Samani, se estima con la calibración con el método de Penman Monteith, para las condiciones climáticas de la cuenca del río Ilave.</p>	<p>Estimar el valor óptimo de los coeficientes de la ecuación de Hargreaves y Samani, calibrado con los resultados de la ecuación de Penman Monteith, para las condiciones climáticas de la cuenca del río Ilave</p>	<p>Coefficiente de Hargreaves y Samani (HE)</p>	<p>Penman-Monteith. Hargreaves y Samani</p>	<p>Correlacion lineal simple.</p>



## AUTORIZACIÓN PARA EL DEPÓSITO DE TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Por el presente documento, Yo Carlos Andres Aguilar Tzecita identificado con DNI 42258657 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional,  Programa de Segunda Especialidad,  Programa de Maestría o Doctorado

INGENIERIA SA AGRICOLA  
informo que he elaborado el/la  Tesis o  Trabajo de Investigación denominada:

" EVALUACION DE LA EVOTRANSPIRACION DE REFERENCIA MEDIANTE  
ECUACIONES BASADAS EN TEMPERATURA CALCULADAS BAJO CONDICIONES  
CLIMATICAS DE LA CUENCA JLAVE "

para la obtención de  Grado,  Título Profesional o  Segunda Especialidad.

Por medio del presente documento, afirmo y garantizo ser el legítimo, único y exclusivo titular de todos los derechos de propiedad intelectual sobre los documentos arriba mencionados, las obras, los contenidos, los productos y/o las creaciones en general (en adelante, los "Contenidos") que serán incluidos en el repositorio institucional de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno.

También, doy seguridad de que los contenidos entregados se encuentran libres de toda contraseña, restricción o medida tecnológica de protección, con la finalidad de permitir que se puedan leer, descargar, reproducir, distribuir, imprimir, buscar y enlazar los textos completos, sin limitación alguna.

Autorizo a la Universidad Nacional del Altiplano de Puno a publicar los Contenidos en el Repositorio Institucional y, en consecuencia, en el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto, sobre la base de lo establecido en la Ley N° 30035, sus normas reglamentarias, modificatorias, sustitutorias y conexas, y de acuerdo con las políticas de acceso abierto que la Universidad aplique en relación con sus Repositorios Institucionales. Autorizo expresamente toda consulta y uso de los Contenidos, por parte de cualquier persona, por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales de autor y derechos conexos, a título gratuito y a nivel mundial.

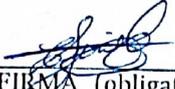
En consecuencia, la Universidad tendrá la posibilidad de divulgar y difundir los Contenidos, de manera total o parcial, sin limitación alguna y sin derecho a pago de contraprestación, remuneración ni regalía alguna a favor mío; en los medios, canales y plataformas que la Universidad y/o el Estado de la República del Perú determinen, a nivel mundial, sin restricción geográfica alguna y de manera indefinida, pudiendo crear y/o extraer los metadatos sobre los Contenidos, e incluir los Contenidos en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

Autorizo que los Contenidos sean puestos a disposición del público a través de la siguiente licencia:

Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. Para ver una copia de esta licencia, visita: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

En señal de conformidad, suscribo el presente documento.

Puno 30 de Mayo del 20 23

  
FIRMA (obligatoria)



Huella



## DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo CARLOS ANDRÉS AGUIAR TUESTO  
identificado con DNI 8253657 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional,  Programa de Segunda Especialidad,  Programa de Maestría o Doctorado

INGENIERIA AGRICOLA

informo que he elaborado el/la  Tesis o  Trabajo de Investigación denominada:

"EVALUACION DE LA EVAPOTRANSPIRACION DE REFERENCIA MEDIANTE  
ECUACIONES BASADAS EN TEMPERATURA CORREGIDAS BAJO CONDICIONES  
CLIMATICAS DE LA CUENCA ILDOVE"

Es un tema original.

Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y **no existe plagio/copia** de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales, de investigación o similares, en el país o en el extranjero.

Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no asumiré como tuyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o Internet.

Asimismo, ratifico que soy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento, así como de las connotaciones éticas y legales involucradas.

En caso de incumplimiento de esta declaración, me someto a las disposiciones legales vigentes y a las sanciones correspondientes de igual forma me someto a las sanciones establecidas en las Directivas y otras normas internas, así como las que me alcancen del Código Civil y Normas Legales conexas por el incumplimiento del presente compromiso

Puno 30 de MAYO del 2023

  
FIRMA (obligatoria)



Huella