



CTSCAFE PARA CIUDADANOS.....

<http://www.ctscafe.pe>

ISSN 2521-8093



Volumen III- N° 7 Marzo 2019

<http://www.ctscafe.pe>

Lima - Perú

VARIABLES CLIMÁTICAS Y LA EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL DE HARGREAVES CALIBRADA PARA LA ZONA ANDINA DEL PERÚ



Lic. Alfredo Rubén Bernal Marcelo
Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión
Correo Electrónico: Alfredor@gmail.com



Lic. Benito Filemón Buendía Quispe
Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión
Correo Electrónico: bbuendiaq@gmail.com

Lic. Marino Bautista Vargas
Universidad Nacional de Huancavelica
Correo Electrónico: Marinovargas@gmail.com

Lic. Otto Mendiolaza Zuñiga
Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión



Lic. Juan Quispe Rodríguez
Universidad Nacional del Centro del Perú
Correo Electrónico: juaquiro52@gmail.com

Dr. Guillermo Gamarra Astuhuaman
Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión
Correo Electrónico: gmogamarra@gmail.com

22

Resumen: El método de Hargreaves recomendado por la FAO, es el más usado en la bibliografía cuando solo se dispone de un mínimo de datos, comúnmente a disposición en la mayoría de estaciones meteorológicas para la estimación de la evapotranspiración de referencia. La investigación tuvo como objetivo la determinación de la ecuación de Hargreaves (ETP) modificada utilizando variables climáticas de temperatura y humedad, calibrada con la evapotranspiración lisimétrica (ETL) y ajuste del factor de corrección (EC). La calibración se realizó comparándose con la evapotranspiración lisimétrica (ETL) y la evapotranspiración (ETP) estimada con datos históricos de 20 a 30 años (1986 - 2015) de registro y consecuentemente el ajuste del factor de corrección por altitud (EC). En el análisis estadístico se analizaron los indicadores de error R, regresiones cuadrática y exponencial, ANOVA, coeficiente de correlación R^2 y desviación standard. Los resultados indican una mejora en la estimación de evapotranspiración potencial (ETP), buena correlación entre ambos y una reducción significativa en la sobrestimación o subestimación producida por EC. Concluyéndose que el modelo de Hargreaves es adecuada para la zona andina del Perú y se sugiere las formulas determinadas en base a la ecuación siguiente:

$$ETP = MF * T * CH * EC$$

Palabras claves: Evapotranspiración potencial/ Lisímetro/ Hargreaves/ Factor de corrección EC.

Abstract: The Hargreaves method recommended by FAO is the most used in the literature when only a minimum of data is available, commonly available in most meteorological stations for the estimation of reference evapotranspiration. The present research deals with the determination of the modified Hargreaves equation (ETP) using temperature and humidity climatic variables, calibrated with lysimeter evapotranspiration (ETL) and correction factor (EC) adjustment. The calibration was performed by comparing with the lysimeter evapotranspiration (ETL) and estimated (ETP) evapotranspiration with historical data from 20 to 30 years (1986 - 2015) of registry and consequently the adjustment of the correction factor by altitude (EC). The statistical analysis analyzed the error indicators R, quadratic and exponential regressions, ANOVA, correlation coefficient R^2 and standard deviation. The results indicate an improvement in the estimation of potential evapotranspiration (ETP), good correlation between both and a significant reduction in the overestimation or underestimation produced by EC. Concluding that the model of Hargreaves is suitable for the Andean zone of Peru and it is suggested the formulas determined based on the following equation:

$$ETP = MF * T * CH * EC$$

Keywords: Potential evapotranspiration/ Lysimeter/ Hargreaves/ EC correction factor

Résumé : La méthode de Hargreaves recommandée par la FAO est la plus utilisée dans la bibliographie lorsque seul un minimum de données est disponible, couramment disponible dans la plupart des stations météorologiques pour l'estimation de l'évapotranspiration de référence. L'objectif de la recherche était de déterminer l'équation modifiée de Hargreaves (ETP) à l'aide de variables climatiques de température et d'humidité, calibrées avec une évapotranspiration lysimétrique (ETL) et un ajustement du facteur de correction (EC). La calibration a été réalisée en comparaison de l'évapotranspiration lysimétrique (ETL) et de l'évapotranspiration (ETP) estimée avec des données historiques de 20 à 30 ans (1986-2015) d'enregistrement et, par conséquent, de l'ajustement du facteur de correction d'altitude (EC). Dans l'analyse statistique, les indicateurs d'erreur R, les régressions quadratiques et exponentielles, l'ANOVA, le coefficient de corrélation R^2 et l'écart type ont été analysés. Les résultats indiquent une amélioration de l'estimation de l'évapotranspiration potentielle (ETP), une bonne corrélation entre les deux et une réduction significative de la surestimation ou de la sous-estimation produite par EC. Nous concluons que le modèle de Hargreaves convient à la zone andine du Pérou et suggère les formules déterminées à partir de l'équation suivante:

$$ETP = MF * T * CH * EC$$

Mots-clés: L'évapotranspiration potentielle / Le lysimètre / L'hargreaves / Le facteur de correction EC.

1. Introducción

El conocimiento del requerimiento hídrico de los cultivos es de gran importancia para la planificación, operación de los proyectos de riego, programación de riegos, estudios de balance de agua y en la zonificación agroclimática. Conceptualmente, la ETo se define como la tasa de evapotranspiración de una superficie cultivada de césped verde extenso, de unos 8 a 12 cm de altura, bien desarrollado y uniforme, que cubre totalmente el suelo y tiene un crecimiento activo, estando siempre bien regado (Pruitt and Doorembos, 1977).

La evapotranspiración se estima mediante métodos directos e indirectos, dentro de los métodos indirectos se usan datos meteorológicos que incluyen ecuaciones de balance de energía que requieren un número mayor de variables climáticas o ecuaciones simples con mínimo de variables climáticas (Hargreaves et al, 1985), la evapotranspiración es un componente fundamental del balance hidrológico y un factor clave en la interacción de la superficie terrestre y la atmósfera. Su cuantificación se hace necesaria en contextos tan diferentes como la producción vegetal, la planificación y la gestión de recursos o estudios ambientales y ecológicos (Torres y Vásquez, 2013).

Otros autores definen a la evapotranspiración ET, como la demanda de agua que tienen los diferentes cultivos y plantaciones para un óptimo desarrollo agrícola o forestal, la formulación de Hargreaves se considera apropiada para el balance de agua y energía a una escala diaria debido a su simplicidad de aplicación una vez que los valores distribuidos de temperatura están disponibles (Aguilar y Polo, 2011). Esto permite una adecuada gestión de los recursos hídricos y económicos necesarios para la construcción de obras de irrigación y la planificación del riego (Valenzuela y Ferreira, 1985; Hargreaves, 1994; Comisión Nacional de Riego, 1997; Droogers & Allen, 1998; López-Moreno et al., 2009).

Por método directo, es con el uso de lisímetros, consistente en un cajón cerrado lateralmente construido y enterrado en el suelo, dentro del cual se limitan las condiciones del cultivo y del suelo natural que lo rodea, se conoce la evapotranspiración ETo, por medio de una ecuación de balance hídrico, conociendo el excedente de infiltración (I) y de escorrentía (Es) que se presentan después de una precipitación (P) artificial o natural que ha sido debidamente medida mediante un pluviómetro. Para calcular el cambio de almacenamiento (ΔA) se acostumbra medir la humedad del suelo para calcular una lámina de agua equivalente (Maderey, 2005), donde los resultados obtenidos y observados en la adecuación de los diferentes métodos existentes permitirán ser utilizados en estudios de cálculo de necesidades de agua aplicados a los diferentes cultivos (Soto et al., 2016).

Entre los años 1980 a 1986 en el marco de las acciones del convenio, Instituto de Investigación y Promoción Agraria – Proyecto especial de pequeñas y medianas irrigaciones (INIPA – PEPMI) se desarrolló un programa de investigación con fin de contribuir al mejoramiento de la práctica del riego en el Perú, principalmente en la sierra, fruto de ello se obtuvo resultados de evapotranspiración lisimétrica ETL, con el uso de lisímetros de drenaje para el cultivo de referencia (Rye gras), determinada para la zona del valle del Mantaro a 3313 msnm. (Quispe y Garay, 1986).

En consecuencia, se logró ajustar los modelos originales de Hargreaves para estimar la evapotranspiración de referencia (ETo) modificando la ecuación de Hargreaves (ETP) con uso de variables climáticas de temperatura (T) y humedad (H) calibrada con la evapotranspiración lisimétrica (ETL) para la zona andina del Perú y con ajuste del factor EC por altitud, a fin de mejorar la precisión en la determinación de la

evapotranspiración de referencia, porque se demuestra que Existen factores que afectan a la ET, los cuales pueden ser agrupados en parámetros climáticos, que expresan la demanda evaporativa de la atmósfera, los asociados al cultivo, que expresan el comportamiento de éste y parámetros de manejo y ambientales, que tienen que ver con la disponibilidad de agua en el suelo (Maffei, 2012).

2. Material y métodos

La investigación fue del tipo básico no experimental, porque se busca generar una nueva ecuación de ETP Hargreaves modificada en base a datos climáticos históricos de los años 1986 al año 2015, con uso de parámetros matemáticos que serán utilizados en la planificación de riego y los balances hídricos en la zona andina del Perú, busca el conocimiento por el conocimiento mismo, más allá de sus posibles aplicaciones prácticas (Cazau, 2006).

El nivel de investigación fue el descriptivo transversal, por cuanto se busca especificar propiedades, características y rasgos importantes de cualquier fenómeno que se analice, describe tendencias de un grupo o población (Hernández et al, 2006), o se seleccionan una serie de conceptos y variables y se mide cada una de ellas independientes de las otras con el fin de describirlas, buscando especificar las propiedades importantes de cualquier otro fenómeno (Cazau, 2006)

La población del estudio estuvo conformada por los datos climáticos históricos de 23 estaciones meteorológicas ubicadas en los 5 departamentos de la zona andina central del Perú, presentan climas de frío a templado subhúmedo (INRENA, 2004). Región yunga a quechua con temperaturas que van de 10 a 17°C. y precipitación media anual de 600 a 750 mm. Pulgar (1996) Zonas con aptitud agrícola y áreas bajo riego, distribuidas en los departamentos de: Junín (6), Huánuco (4), Pasco (2), Huancavelica (5) y Ayacucho (6) Para el presente estudio de investigación la muestra estuvo constituida por información climática de temperatura y humedad relativa de las 6 estaciones meteorológicas que se encuentran asentadas en la zona andina central del Perú, ubicadas en los departamentos de: Junín (2), Huánuco (1), Pasco (1), Huancavelica (1) y Ayacucho (1) tal como se muestra en la tabla 1.

Tabla N°1: Descripción de las estaciones meteorológicas consideradas en el estudio con años de registro

N°	Código	Estación	Cate- goría	Región	Provincia	Latitud	Longitud	Elevación (msnm)	Años de registro
01	155266	Huayao	Con.	Junín	Chupaca	12°02'18"	75°20'17"	3360	30
02	112170	Santa Ana	Aut.	Junín	Huancayo	12°00'15"	75°13'15"	3295	26
03	000404	Amarilis	Con.	Huánuco	Huánuco	09°57'07"	76°14'55"	1947	30
04	4725D79C	Oxapampa	Aut.	Pasco	Oxapampa	10°35'39"	75°23'03"	1860	26
05	000659	Acobamba	Con.	Huancavelica	Acobamba	12°51'11"	74°33'37"	3236	30
06	472AD10E	INIA-Canaán	Aut.	Ayacucho	Huamanga	13°10'42"	74°12'23"	2780	20

Fuente: Elaboración propia

Los datos del estudio provienen de los registros climáticos del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología SENAMHI del Perú, Instituto Geofísico del Perú IGP. y Gobierno Regional de Ayacucho. Datos de temperatura media mensual y humedad relativa media mensual de los años 1986 a 2015 de 6 estaciones meteorológicas en 5 departamentos del Perú. Los materiales y equipos que se utilizaron: Registro de datos del SENAMHI, IGP Huayao, GRR. Servicio de internet y equipo informático.

2.1. Procedimiento:

2.1.1. Ecuación de Hargreaves

La ETP se estimó una vez recolectados la información climática, procediéndose a realizar los cálculos respectivos de evapotranspiración potencial utilizando la ecuación desarrollada por el Dr. Hargreaves (1975) con factor mensual MF. Siendo:

$$ETP = MF * T * CH \quad (a.1)$$

Dónde:

ETP = Evapotranspiración de Hargreaves estimada (mm/día)

MF = Factor mensual por latitud desarrollada por el Dr. Hargreaves (1975), considerando 9°, 10°, 11°, 12° y 13° de latitud para el presente estudio

Tmed. = Temperatura media mensual en grados Fahrenheit (°F)

CH = Coeficiente empírico de Hargreaves por humedad relativa expresada en la ecuación: $CH = 0.166 (100 - H)^{1/2}$

Donde:

CH = Coeficiente empírico de Hargreaves

H = Humedad relativa media mensual expresada en porcentaje (%), cuando (H) es menor de 64% el valor es 1.

Según Hargreaves y Allen (2003) la ecuación Hargreaves ha sido empleado con muy buenos resultados en zonas climáticas diferentes a la zona donde se desarrolló y aconsejan abordar la ecuación de manera integrada y analizar como predice la ETo.

Salazar (1980) en un estudio sobre métodos para determinar la evapotranspiración potencial del cultivo de referencia ETo. y evaluación inicial para la sierra, evaluó varias ecuaciones de evapotranspiración con datos históricos de Cajamarca y Huancayo, determinando un coeficiente de corrección de 1.1 con la ecuación de Hargreaves y factor mensual MF

Quispe y Garay (1986) en un estudio de evapotranspiración potencial en el valle del Mantaro, realizaron calibraciones de varias ecuaciones: Hargreaves en base a temperatura y factor mensual MF, Hargreaves en base a radiación solar, Jensen Haise y tanque de evaporación con datos históricos del IGP. Huayao, determinando para el caso de la ecuación de Hargreaves con factor MF un coeficiente de corrección de 1.098.

Hargreaves indica además que esta ecuación debe ser mejor evaluada para lugares más cercanos al ecuador, también sugiere una corrección por altura, debido a que en las partes altas caso de las zonas andinas del Perú, la capa atmosférica es menor por lo que hay mayor intensidad de radiación y los cambios de temperatura generalmente son más bruscos. Propone una corrección EC de 8% por cada mil metros de elevación (Quispe y Garay, 1986) por lo que la ecuación (a.1) tomaría la forma siguiente:

$$ETP = MF * T * CH * EC \quad (a.2)$$

2.1.2. Datos lisimétricos

El método de lisimetría es un método directo para determinar la evapotranspiración de referencia ETo., por lo cual en el presente estudio se utilizó el resultado de evapotranspiración lisimétrica ETL (Tabla 2) realizado en el valle del Mantaro de la región Junín, a 3313 msnm a una latitud de 12° 02' 18.1" S. y longitud de 75° 19' 22" W. por 7 años consecutivos (1979 – 1985) por el convenio entre el PEPMI y el INIPA (Quispe y Garay, 1986), en donde se detallan la evapotranspiración lisimétrica en mm/mes de enero a diciembre.

Tabla N° 2: Datos de evapotranspiración lisimétrica en mm/mes

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
ETL	144	115	115	107	110	99	100	105	112	141	131	138

Fuente: Quispe y Garay (1986)

Se realizaron las calibraciones respectivas de la ecuación de Hargreaves a través de la regresiones cuadrática y exponencial, generándose las ecuaciones matemáticas y correlaciones respectivas con el ajuste del factor de corrección (EC) para elevaciones mayores a 1000 msnm utilizando la siguiente relación matemática: $EC = (ETP/MF * T * CH)$; Donde (EC) es el factor de corrección por altitud, (ETP) evapotranspiración potencial de Hargreaves calibrada y (MF*T*CH) son las variables climáticas que intervienen en la estimación de la evapotranspiración en cada localidad en estudio.

Finalmente, se obtiene la ecuación modificada de Hargreaves $ETP = MF * T * CH * EC$, siguiendo la secuencia lógica de la matriz de Operacionalización de las variables como se aprecia en la tabla 3.

Tabla N° 3: Matriz de Operacionalización de las variables

Variabes	Indicadores	Unidad	Instrumento	Fuente
Evapotranspiración potencial ETP	ETP calibrado	mm/mes	Excel y SPSS	Propia
	EC. Factor de corrección por altitud	mm/mes		
	ETP ecuación modificado			
Temperatura media (T)	Grado de temperatura	°F	Termómetros de máxima y mínima	6 estaciones meteorológicas de la zona andina del Perú
Humedad media (H)	Porcentaje de humedad relativa	%	Higrómetro	
MF	Factor dependiente de latitud				Tabla HG

Fuente: Elaboración propia

2.2. Análisis

Se compararon los resultados obtenidos con la ecuación de Hargreaves con los datos resultado de aplicar la ET lisimétrica, considerada como el de referencia, para una mejor comparación y siguiendo lo sugerido por Hargreaves (Quispe y Garay, 1986).

El análisis estadístico se realizó utilizando el software del SPSS y EXCEL en la determinación de los estadísticos descriptivos, las correlaciones entre ambos resultados de evapotranspiración, ANOVA y el coeficiente de determinación R^2 .

El modelo cuadrático aplicado en la relación de ET lisimétrica y ETP estimado nos dará el resultado significativo en la correlación y un coeficiente de determinación R^2 (el coeficiente de determinación es la relación que existe entre la suma de cuadrados de la regresión y la suma de cuadrados de Y) y que según la tabla de rangos para interpretación del coeficiente de determinación R^2 , la relación entre ambas variables, nos demostrara un buen ajuste o no de los datos del modelo de regresión

Para el contraste de la hipótesis “La ecuación de Hargreaves (ETP) modificada se determinó utilizando las variables de temperatura y humedad calibrada con la (ETL) lisimétrica para la zona andina del Perú” se utilizó el ANOVA, que nos muestra el valor calculado del estadístico “F” y su nivel de significación. El nivel de significación nos permitirá aceptar o rechazar la hipótesis nula (independencia entre las variables) sin necesidad de tener que comparar el valor de la “F” con su valor real de las tablas estadísticas de una “F” de Snedecor.

El valor que nos sirvió de referencia a la hora de aceptar o rechazar la hipótesis nula es el nivel de significación. Si el nivel de significación es mayor que 0,05, aceptaremos la hipótesis nula de independencia entre las variables, si el nivel de significación es menor que 0,05 rechazaremos la hipótesis nula y aceptaremos la hipótesis alternativa, es decir, concluiremos que existe una relación de dependencia entre las variables, y en este caso podremos decir que los distintos niveles del factor sí influyen sobre los valores de la variable cuantitativa (Vicéns et al., 2005).

3. Resultados

3.1. Determinación de la evapotranspiración de Hargreaves calibrada

Para la calibración de la ecuación de Hargreaves con factor mensual MF, se realizó con la metodología descrita en el capítulo II, con previa estimación de evapotranspiración por Hargreaves para las 6 estaciones consideradas en los departamentos de la zona andina y la mayoría monitoreadas por SENAMHI, los cálculos se realizaron mes a mes de todo el año y ésta a su vez se promedió por los años de registro que fueron de 20 a 30 años, los promedios fueron multianuales, tal como se muestra en la tabla 4.

Tabla N°4: Comparación de ETL y ETP calibrado por estación meteorológica (mm/mes)

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Año
ETL	144	115	115	107	110	99	100	105	112	141	131	138	1417
Huayao	140	120	120	108	95	82	87	103	120	140	146	150	1412
Santa Ana	140	117	115	103	100	86	92	108	124	145	150	145	1425
Amarilis	135	117	119	110	104	92	97	110	123	139	140	138	1425
Oxapampa	131	115	120	108	98	90	95	115	127	140	142	137	1417
Acobamba	133	108	113	104	100	88	93	108	125	147	153	145	1418
INIA-Canaán	134	108	105	100	95	87	97	117	130	152	154	131	1412

Fuente: Elaboración propia

Para la comparación entre valores medidos y estimados de evapotranspiración potencial ETP se realizaron por las regresiones cuadrática y exponencial, con los valores medidos (ETL) registrada por lisímetros y los valores estimados (ETP), adicionalmente se calcularon los estadísticos de coeficiente de correlación, desviación standard, ANOVA y coeficiente de determinación R².

A partir de los resultados analizados se procedió a buscar las ecuaciones de regresión mediante las cuales fuera posible obtener, para cada una de las estaciones estudiadas, una fórmula local que relacionara las tasas de ETo calculadas con las variables del clima y poder utilizarse en el futuro con fines de predicción de las necesidades hídricas de los cultivos en los departamentos de la zona andina central del Perú tal como se puede ver en la tabla 5.

En la misma tabla, se puede ver que los modelos cuadrático y exponencial aplicados en la relación de ET lisimétrica y la ETP obtienen una muy alta a alta correlación significativa de .94 a .83 (Sagaró & Macías 2005) y un coeficiente de determinación R² de .89 a .69, el coeficiente de determinación entre ambas variables es muy alta. Cuando R² es igual a 1, significa que existe un ajuste lineal perfecto entre las variables, del mismo modo cuando R² toma el valor de cero, indica que el modelo de regresión no explica nada de la variación total de la variable Y (Caballero, 1981), lo que nos demuestra un buen ajuste de los datos entre las variables del modelo de regresión para las zonas en estudio.

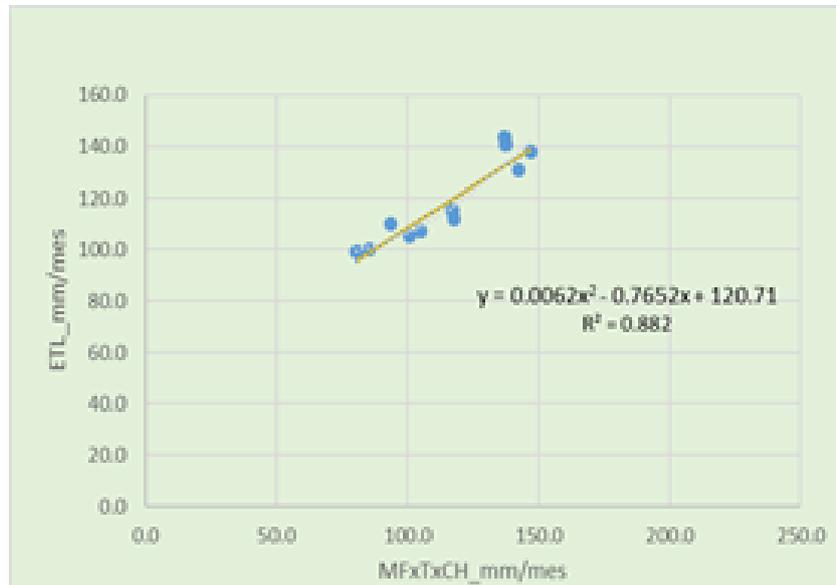
Tabla N° 5: Ecuaciones de regresión de ETP obtenidas entre las variables, correlaciones y coeficientes de determinación R² para las seis estaciones

Estación	Tendencia	Ecuación	R	R ²
Amarilis	Cuadrática	$ETP = 0.0082x^2 - 1.6416x + 180.77$	.94	.89
Huayao	Cuadrática	$ETP = 0.0062x^2 - 0.7652x + 120.71$	.94	.88
Santa Ana	Exponencial	$ETP = 59.624e^{0.006x}$	.94	.88
Acobamba	Exponencial	$ETP = 61.438e^{0.0059x}$	.90	.82
Oxapampa	Cuadrática	$ETP = 0.0196x^2 - 2.2755x + 165.39$	.88	.78
INIA Canaán	Exponencial	$ETP = 65.836e^{0.0049x}$	.83	.69

Fuente: Elaboración propia

Por regresión cuadrática y exponencial se determinaron las ecuaciones de ETP Hargreaves calibrada en base a la evapotranspiración estimada en relación a la evapotranspiración lisimétrica ETL, las ecuaciones matemáticas determinadas son como se observa en las figuras del 1 al 6, con definición de las ecuaciones correlacionadas y coeficientes de determinación más alto y significativo.

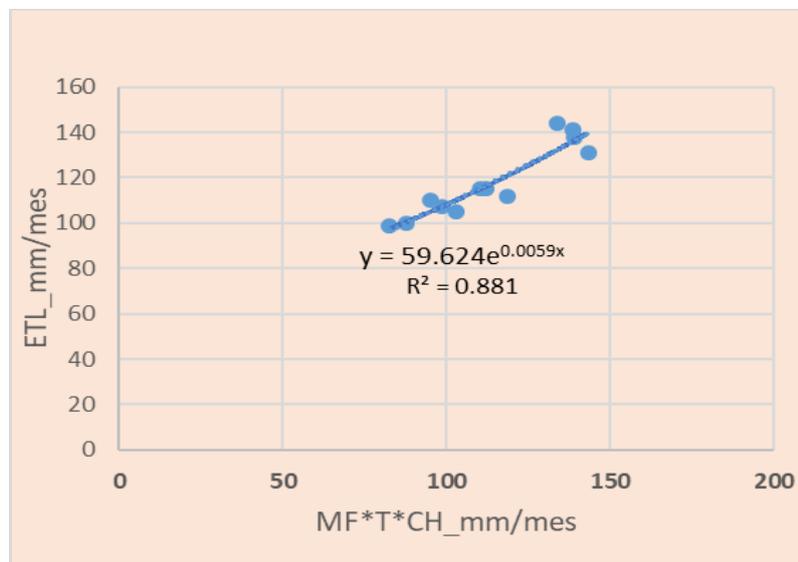
Figura N°1: Relación de ETP y ETL calibrada por regresión cuadrática para Huayao



Fuente: Elaboración propia

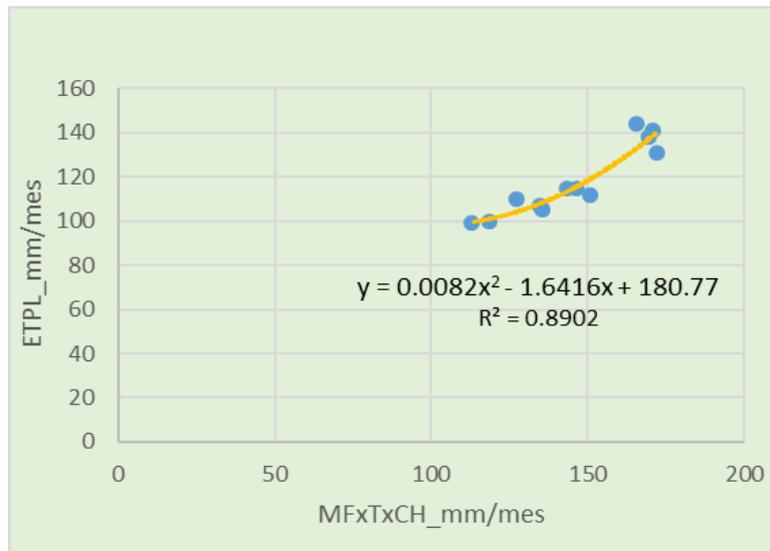
30

Figura N°2: Relación de ETP y ETL calibrada por regresión exponencial para Santa Ana



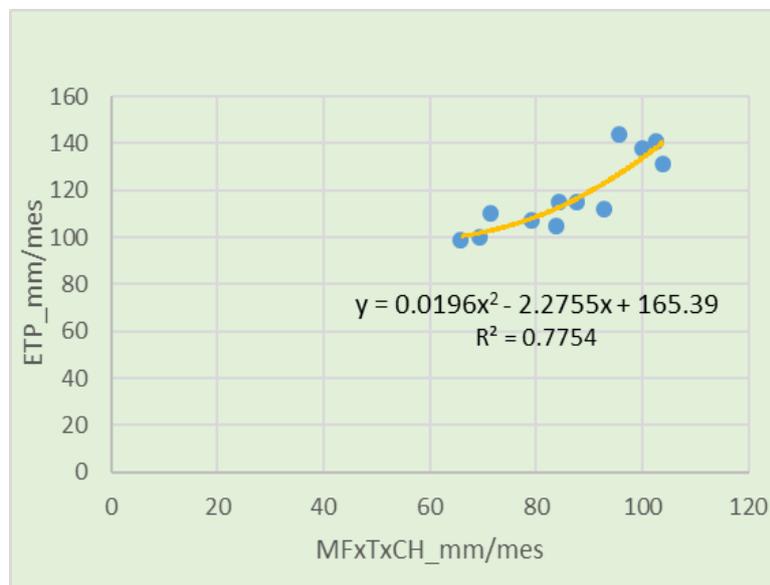
Fuente: Elaboración propia

Figura N°3: Relación de ETP y ETL calibrada por regresión cuadrática para Amarilis



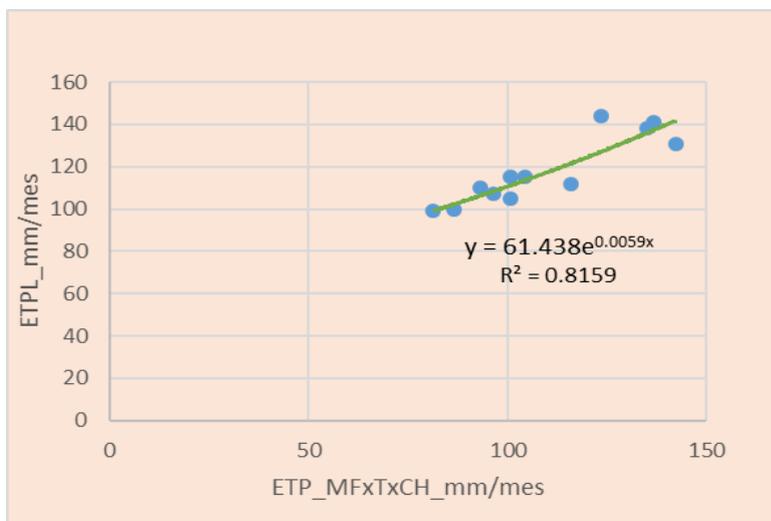
Fuente: Elaboración propia

Figura N° 4: Relación de ETP y ETL calibrada por regresión cuadrática para Oxapampa



Fuente: Elaboración propia

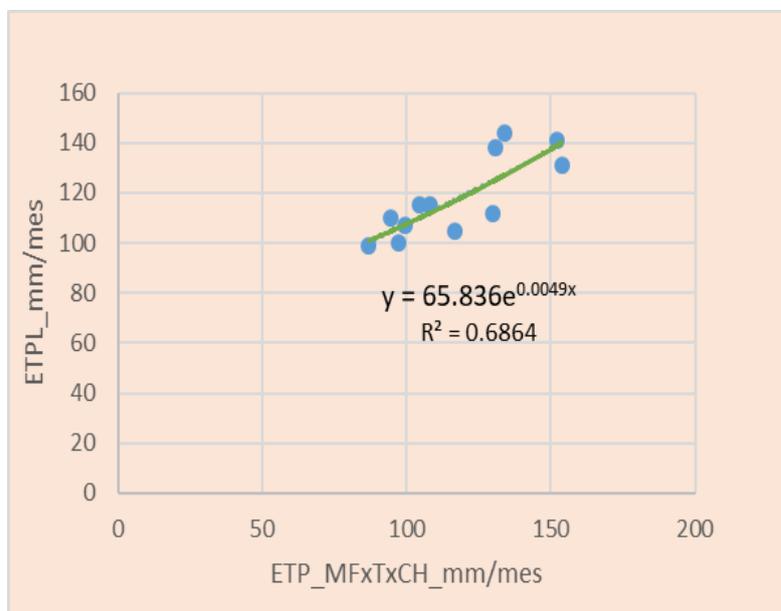
Figura N°5: Relación ETP y ETL calibrada por regresión exponencial para Acobamba



Fuente: Elaboración propia

32

Figura N°6: Relación ETP y ETL calibrada por regresión exponencial para INIA - Canaán



Fuente: Elaboración propia

En la tabla 6, se puede apreciar que el porcentaje de error resultante de la evapotranspiración estimada de Hargreaves ETP, nos indica una variación en valores absolutos desde - 3.15% a - 26.85% siendo las estaciones de Huayao, Santa Ana,

Huancavelica y el INIA - Canaán las que subestiman en un promedio absoluto de - 3.9%, se sobreestima en la estación Amarilis con un porcentaje de 23.3% y se subestima en la estación Oxapampa en - 26.85% la cual se debe a las altas temperaturas registradas en dichas estaciones.

Del mismo modo, en la misma tabla en referencia a la comparación anterior, esta vez con la ecuación de Hargreaves calibrada, el porcentaje de error resultante de la evapotranspiración calibrada ETP con la ET lisimétrica, nos indica una variación en valores absolutos bastante reducidos desde .08% a - 1.02% siendo las de menor variación, la estación Santa Ana con .08%, Oxapampa con .09% y Acobamba con -.41%, resultados que nos indican que hay necesidad en lo posible de hacer la determinación de evapotranspiración potencial ETP calibrada para las diferentes condiciones del País, en especial para la zona andina.

Tabla N° 6: Porcentaje promedio anual de error ETP estimada y ETP calibrada frente a la ET lisimétrica

Estación	ETP Hargreaves estimada	Error	ETP Hargreaves calibrada	Error
ETL		.0		.0
Amarilis	1746.28	23.28	1424.84	.52
Huayao	1380.84	- 3.15	1411.81	- 1.02
Santa Ana	1363.44	- 4.24	1425.20	.08
Acobamba	1317.04	- 7.44	1418.39	- .41
Oxapampa	1036.29	- 26.85	1417.45	.09
INIA - Canaán	1408.20	- .90	1411.99	- .77

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, para la contrastación de nuestra hipótesis, el valor que nos sirve de referencia a la hora de aceptar o rechazar la hipótesis nula es el nivel de significación. Si el nivel de significación es mayor que 0.05, aceptaremos la hipótesis nula (H_0) de independencia entre las variables (no existen efectos diferenciales entre los tratamientos). Si es menor que 0.05 rechazaremos la hipótesis nula (H_0) y aceptaremos la hipótesis alternativa (H_1) es decir, concluiremos que existe una relación de dependencia entre las variables, y podremos decir que los distintos niveles del factor influyen en los valores de la variable cuantitativa (Vicéns et al., 2005).

En nuestro caso de acuerdo a la contrastación de hipótesis con el ANOVA nos indica que el valor del nivel de significación F va de .000 a.001 en todas las estaciones evaluadas, y este valor es menor que .05, por lo tanto, aceptaremos la hipótesis alterna (H_1) porque existe una fuerte relación de dependencia entre las variables, y concluimos que las variables climáticas de temperatura y humedad relativa si influyen en la determinación de la evapotranspiración potencial de Hargreaves modificada para la zona andina del Perú.

3.2. Determinación del factor de corrección EC

Para la obtención del factor de corrección (EC) se utilizaron datos de ETP calibrada de Hargreaves por regresión y las variables climáticas (MF*T*CH), utilizando la siguiente ecuación matemática sugerida por el Dr. Hargreaves a fin hallar el factor de corrección por altitud para zonas por encima de los 1000 msnm. hasta los 3350 msnm. (Hargreaves, 1975) denominada como zona andina central del Perú.

$$EC = \frac{ETP}{MF*T*CH} \quad (a.3)$$

Donde:

EC : Factor de corrección por altitud,

ETP : Evapotranspiración de Hargreaves calibrada y

MF*T*CH: Variables climáticas de temperatura y humedad, tomadas en cuenta de las 6 estaciones consideradas en el presente estudio

En la tabla 7, se resume los cálculos realizados para la determinación del factor de corrección por altitud EC para cada una de las estaciones meteorológicas analizadas y por regiones de la zona andina central del Perú.

34

Tabla N°7: Determinación del factor de corrección EC. de ETP Hargreaves calibrada para las seis estaciones en estudio

Estación	Altura (msnm)	ETP (mm)	MF*T*CH (mm)	EC
Huayao	3 350	1411.81	1380.84	1.0224
Santa Ana	3 295	1425.20	1363.44	1.0453
Amarilis	1 947	1424.84	1746.28	0.8159
Oxapampa	1 850	1417.45	1036.29	1.3678
Acobamba	3 236	1418.39	1317.04	1.0770
INIA - Canaán	2 780	1411.99	1408.20	1.0027

Fuente: Elaboración propia

3.3. Determinación de la ecuación de ETP Hargreaves modificada

Se determinaron seis ecuaciones de ETP Hargreaves modificada, previo el ajuste y determinación del factor de corrección EC por altura, las que podrán ser utilizadas para cada zona en estudio, y con posibilidades de ser utilizados también en zonas parecidas a lo estudiado con fin de determinar la evapotranspiración referencial ETo, tal como se muestra en la tabla 8, y que estas puedan en adelante aplicarse con cierta confiabilidad en los cálculos de planeamiento de riego y balances hídricos

Tabla N°8: Ecuación modificada de ETP Hargreaves para las seis estaciones en estudio

Estación	Ecuación de ETP Hargreaves inicial	Ecuación de ETP Hargreaves modificada
Huayao	$ETP = MF * T * CH$	$ETP = MF * T * CH * 1.022$
Santa Ana	$ETP = MF * T * CH$	$ETP = MF * T * CH * 1.045$
Amarilis	$ETP = MF * T * CH$	$ETP = MF * T * CH * 0.816$
Oxapampa	$ETP = MF * T * CH$	$ETP = MF * T * CH * 1.368$
Acobamba	$ETP = MF * T * CH$	$ETP = MF * T * CH * 1.077$
INIA - Canaán	$ETP = MF * T * CH$	$ETP = MF * T * CH * 1.363$

Fuente: Elaboración propia

En resumen, en virtud a las estadísticas obtenidas podemos apreciar que existe una correlación significativa al 95%, la ecuación de Hargreaves calibrada y modificada para los datos de las seis estaciones de la zona central andina del Perú, es de aplicación para estimar la evapotranspiración de referencia en aquellas estaciones próximas cuando no se cuenten con datos para la aplicación de otras ecuaciones que requieren de muchas más variables climáticas como el PM ni cuando no hay posibilidad de realizarlos a través de lisímetros en forma directa, este resultado es coincidente con los resultados de Salazar (1980) y Quispe y Garay (1986).

4. Discusión

El término evapotranspiración es el más difícil de entender y un tanto complejo de estimar a una escala regional, esta consideración es importante en la planificación y gestión de los recursos de agua. La evapotranspiración potencial es la que se utiliza, habitualmente, como información del suministro de agua, requerido en el diseño de sistemas de riego. Por lo mismo es importante determinar la evapotranspiración potencial calibrada con la evapotranspiración lisimétrica (referencial) para la zona andina del Perú.

Debido a ello es que al inicio de la investigación nos propusimos lograr el objetivo de determinar la ecuación de evapotranspiración potencial de Hargreaves ETP modificada utilizando variables climáticas de temperatura y humedad, calibrada con la evapotranspiración lisimétrica y ajuste del factor de corrección EC por altitud para la zona andina del Perú, el análisis de los resultados obtenidos en la determinación de la evapotranspiración potencial modificada, nos ha permitido verificar y evaluar nuestra hipótesis de investigación y los objetivos establecidos al contrastar los resultados con las conclusiones de los trabajos de investigación y con las afirmaciones y fundamentos de diversas teorías que nos permiten afirmar lo siguiente:

El método de Hargreaves es el más adecuado para la determinación de datos de ETP referencial para zonas andinas con variables de temperatura y humedad cuando no se dispone de datos meteorológicos necesarios para su determinación por otros métodos que requieren mayor información climática como el de PM-FAO, siendo oportuno una calibración local y estacional precisa, con periodos de estudios largos y preferentemente contrastados con algún método directo de medición de ET como los lisímetros (Enrique, 2014.; Marín, 2010.; Bono, 2014.; Quispe y Garay, 1986.; Almorox et al, 2012).

Según la prueba estadística por análisis de regresión al que se sometieron los datos de las seis estaciones relacionadas a la ETP Hargreaves y la ET lisimétrica, se aprecia la estrecha relación y el alto grado de ajuste que existe entre los valores estimados por el

método de Hargreaves y lo determinado por la ET lisimétrica, así como el alto valor de los coeficientes de determinación (R^2), del mismo modo con respecto al ANOVA de los análisis de varianza para las diferentes estaciones muestran con un nivel de confianza al 95%, el nivel de significación es .000 a .001 menor al 0.05, en consecuencia, existe una relación significativa entre el método de Hargreaves y la ET lisimétrica.

Los resultados del estudio sobre la determinación de ETP calibrada y modificada con ajuste del factor de corrección EC por altitud iguales de .816 a 1.368 son similares con lo observado con investigaciones previas realizadas sobre estudios de evaluación de varias ecuaciones de evapotranspiración, la ecuación de ETP Hargreaves resultó con un coeficiente EC de 1.1 (Salazar, 1980) para las zonas de Cajamarca y Huancayo y de 1.098 (Quispe y Garay, 1986) para la zona del valle del Mantaro, el presente estudio muestra una asociación más significativa probablemente por la disponibilidad de información climática con datos históricos de 20 a 30 años de registro y el análisis de regresión cuadrática y exponencial con un coeficiente de determinación alto.

Finalmente, después de haber realizado los cálculos respectivos de ETP y habiendo sido calibrada para cada una de las estaciones estudiadas se obtuvieron los respectivos coeficientes del factor de corrección EC por altitud, la misma que modifica la ecuación de Hargreaves para las regiones de la zona andina del Perú y se aproximan adecuadamente al método lisimétrico y que en adelante podrían ser utilizadas con confiabilidad para la determinación de la evapotranspiración de referencia en aquellos lugares con solo datos de temperatura y humedad.

La ecuación de ETP modificada por estación fueron las siguientes:

36

Huayao: $ETP = MF * T * CH * 1.0224$; Santa Ana: $ETP = MF * T * CH * 1.0453$;

Amarilis: $ETP = MF * T * CH * 0.8159$; Oxapampa: $ETP = MF * T * CH * 1.3678$;

Acobamba: $ETP = MF * T * CH * 1.077$; y INIA – Canaán: $ETP = MF * T * CH * 1.3625$

5. Literatura Citada

Aguilar, C., & Polo, M. J. (2011). Generating reference evapotranspiration surfaces from the Hargreaves equation at watershed scale. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(8), 2495-2508. <https://doi.org/10.5194/hess-15-2495-2011>

Almorox, Javier; Aguirre, María Elena; Elisei, Víctor; Commegna, Marta. (2012). Calibración del modelo de Hargreaves para la estimación de la evapotranspiración de referencia en Coronel Dorrego Argentina. Coronel Dorrego - Argentina.

Bono Rapp, F. D. (2014). Comparación de cinco metodologías de estimación de la evapotranspiración para cuatro localidades de la pampa húmeda y semiárida, Universidad nacional de la Pampa. La Pampa, Argentina: Facultad de ciencias exactas y naturales

- Caballero, W.** (1981). Introducción a la estadística (1ra ed.). San José - Costa Rica: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura IICA
- Cazau, P.** (2006). Introducción a la investigación en ciencias sociales, 3ra.edicion. Argentina
- COMISIÓN NACIONAL DE RIEGO.** (1997) *Cálculo y cartografía de la evapotranspiración potencial en Chile*. Santiago: Comisión Nacional de Riego.
- Droogers, P. & Allen, R.G.** (2002) Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions. *Irrigation and Drainage Systems*, 16, p. 33-45
- Enrique Demin, P.** (2014). Calibración de la ecuación de Hargreaves para la determinación de la evapotranspiración de referencia en el valle central de Catamarca. *Revista de climatología*, 1 - 8.
- Hargreaves, G.** (1975) Water Requirements Manual for Irrigated Crops and Rainfed Agriculture, AID., Utah State University, USA
- Hargreaves, George H; Samani, Z A.** (1985). Reference crop evaporation from temperature. USA: App.Rng.Agric 1(2).
- Hargreaves, G. H.** (1994) Defining and using reference evapotranspiration. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE*, vol. 120, N° 6, p. 1132-1139.
- Hargreaves, G.H.; Allen, R.A.** (2003). History and evaluation of Hargreaves evapotranspiration equation, *J. Irrigation Draining, Eng. ASCE* 129 (1).
- Hernández Sampieri, Roberto; Fernández Collado, Carlos; Baptista Lucio, Pilar.** (2006). *Metodología de la investigación, cuarta edición*. México
- INRENA.** (2004). Cita fuente: INEI. Dirección ejecutiva de cartografía y geografía, IGN. Atlas del Perú. Elaboración INEI – ORSTAM
- Maderey, L.** (2005). Principios de Hidro geografía: estudio del ciclo hidrológico, Serie textos Universitarios, UNAM. México
- Maffei, M.** (2012). Desempeño de la ecuación de Hargreaves en la estimación de la evapotranspiración de referencia (ET_o) en una zona de páramo en Trujillo, Venezuela. *Rev. Fac. Agron.*, 17.
- Marin Valencia, V.** (2010). Evaluación de la relación entre la evapotranspiración potencial y la evaporación registrada en los departamentos de cundinamarca y el valle del cauca. Bogota: Universidad Javeriana.

- Lopez-Moreno, J. L.; Hess, T. M. & White, M.** (2009) Estimation of reference evapotranspiration in a mountainous mediterranean site using the Penman-Monteith equation with limited meteorological Data. *Pirineos*, N° 164, p. 7-31.
- Pruitt WO, Doorenbos J** (1977): Background and Development of Methods to Predict Reference Crop Evapotranspiration (ET₀). Appendix II en FAO Riego y Drenaje, 24:108.
- Pulgar, J.V.** (1996). Geografía del Perú, Décima edición, 302 p. PEISA, Lima
- Quispe y Garay** (1986). Evapotranspiración potencial en el valle del Mantaro. (M. d. Agricultura, Ed.) *Manual*, 1-39.
- Sagaro, N. & Macias, M.** (2005). Correlación y regresión, recuperado el 27 de 06 del 2017, de publicaciones científicas: <http://www.revistaciencias.com/publicaciones/EEFKLVFAIPSZMdFoNu.php>
- Salazar, LeRoy.** (1980) Requerimientos de riego en la Sierra, Métodos para determinar la evapotranspiración potencial del cultivo de referencia (Rye grass) ET₀ y evaluación inicial para la sierra, preparado para el Ministerio de Agricultura, Dirección General ejecutiva de Pequeñas y Medianas Irrigaciones, Lima Perú.
- Soto, M. D. S., Marti, V. P., Soriano, L. G.-E., & Palacios, J. L.** (2016). Comparación de los valores de evapotranspiración en la provincia de valencia utilizando diferentes modelos, 10.
- Torres Hernández, A., & Vásquez Vásquez, R.** (2013). Prospección de la estimación de la evapotranspiración de referencia, bajo las condiciones del valle de Chaca, Arica-Chile. *Idesia* (Arica), 31(2), 25-29. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292013000200004>
- Valenzuela, A. y Ferreira, V.** (1985) Variación de la evapotranspiración potencial en Chile. *Agro-Ciencia*, 1985, vol. 1, N° 1, p. 15-21
- Vicens Otero, José; Herrarte Sánchez, Ainhoa; Medina Moral, Eva.** (2005). *Análisis de la Varianza (ANOVA)*.

REVISTA DE INVESTIGACIÓN MULTIDISCIPLINARIA



<http://www.ctscafe.pe>

Volumen III- N° 7 marzo 2019

*Contáctenos en nuestro correo electrónico
revistactscafe@gmail.com*

137

Página Web:

www.ctscafe.pe

Blog:

<https://ctscafeparaciudadanos.blogspot.com/>

Facebook

<https://www.facebook.com/Revista-CTSCafe-1822923591364746/>