

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL
DE HUAMANGA**

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



TESIS:

**Estimación satelital, validación y distribución espacial
de la evapotranspiración a través del clima en
la cuenca Cachi - Ayacucho - 2020**

Para optar el título profesional de:
INGENIERO AGRÍCOLA

PRESENTADO POR:

Bach. Hans Alexis RONDINEL ANCHAY

ASESOR:

Dr. Jorge Edmundo PASTOR WATANABE

AYACUCHO - PERÚ

2020

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA

**FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**

Tesis

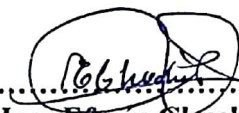
**Estimación satelital, validación y distribución espacial de la evapotranspiración a través
del clima en la cuenca Cachi - Ayacucho - 2020**

Expedito : 07 de agosto de 2020

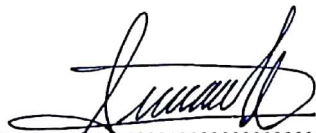
Sustentado : 10 de setiembre de 2020

Calificación : Muy bueno

Jurados :



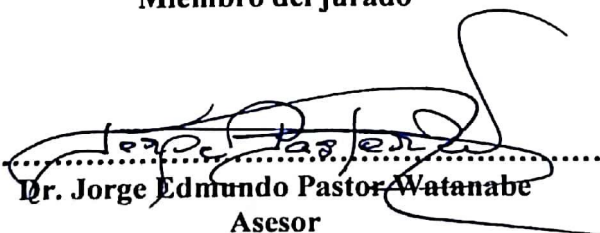
.....
Ing. Efraín Chuchón Prado
Presidente del jurado



.....
M. Sc. Juan Charapaqui Ancasi
Miembro del jurado



.....
M. Sc. Alex Lázaro Tineo Bermúdez
Miembro del jurado



.....
Dr. Jorge Edmundo Pastor Watanabe
Asesor

A Dios, por guiarme, darme el valor y la fuerza necesaria para afrontar los momentos más difíciles y por haberme dado salud para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor.

A mis padres Aquiles Rondinel Barboza y Delia Anchay Quispe, y gracias por todo su cariño, comprensión y confianza incondicional que me dan diariamente para seguir adelante en mi formación profesional. Quiero que este sea un pequeño reconocimiento a su gran esfuerzo.

A mis hermanos Joseph y Harold, por su comprensión, apoyo incondicional y por ser compañeros constantes de motivación y superación perenne, así mismo, a mis familiares en general, por ser parte de mi vida.

A mi enamorada Elizabeth, por ser el impulso durante toda mi carrera, por su amor, confianza, por brindarme el tiempo necesario para realizar mis ideales, sobre todo, por ser mi amiga y compañera inseparable.

AGRADECIMIENTO

Por haber hecho realidad un reto más en mi vida, expreso mis sinceros agradecimientos:

A la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, *Alma Mater* que me ha brindado la oportunidad de seguir una carrera profesional.

A la Facultad de Ciencias Agrarias, en especial a la gloriosa e histórica Escuela Profesional de Ingeniería Agrícola, por haberme albergado en sus aulas magistrales.

A los docentes en general de la gloriosa Escuela Profesional de Ingeniería Agrícola, quienes me inculcaron y transmitieron sus conocimientos y ética, durante mi formación profesional.

A los representantes del Gobierno Regional de Ayacucho – OPEMAN, por brindarme las facilidades para realizar el presente trabajo.

A mis compañeros (as) de aula de las diferentes series, a quienes estoy muy agradecido por todo el ánimo que me han brindado para seguir adelante.

En especial, al Dr. Jorge Edmundo Pastor Watanabe, por el apoyo incondicional, y por todo lo enseñado para realizar el presente trabajo.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
Dedicatoria.....	ii
Agradecimiento.....	iii
Índice general.....	iv
Índice de tablas.....	vii
Índice de figuras.....	x
Índice de anexos.....	xv
Lista de acrónimos.....	xvi
Lista de abreviaturas.....	xvii
Lista de símbolos.....	xix
Resumen.....	1
INTRODUCCIÓN.....	2
CAPÍTULO I	
MARCO TEÓRICO.....	4
1.1. Antecedentes.....	4
1.2. Evapotranspiración.....	6
1.2.1. Evaporación.....	8
1.2.2. Transpiración.....	8
1.2.3. Conceptos de evapotranspiración.....	9
1.2.4. Factores que afectan la evapotranspiración.....	12
1.2.5. Unidades de la evapotranspiración.....	16
1.2.6. Coeficiente de cultivo.....	17
1.2.7. Determinación de la evapotranspiración.....	17
1.2.8. Métodos para determinar la evapotranspiración.....	18
1.2.9. Identificación y selección de métodos para determinar la evapotranspiración.....	34
1.2.10. Precipitación.....	35
1.2.11. Balance hídrico.....	37
1.3. Sistemas de información geográfica.....	37
1.3.1. Componentes del Sistema de Información Geográfica.....	38
1.3.2. Modelo ráster.....	39
1.3.3. Formato TIFF.....	40

1.3.4. Teledetección.....	40
1.3.5. Imágenes satelitales	45
1.3.6. Datos climáticos geoespaciales	47
1.3.7. Paquete informático ArcGIS	49
1.4. Métodos estadísticos de ajuste y validación.....	49
1.4.1. Calibración analítica	49
1.4.2. Índices estadísticos.....	51
1.5. Definición de términos.....	56

CAPÍTULO II

METODOLOGÍA	58
2.1. Ubicación y características generales de la cuenca cachi	58
2.1.1. Ubicación política	58
2.1.2. Ubicación geográfica	58
2.1.3. Límites intercuenas	59
2.1.4. Extensión.....	64
2.1.5. Clima.....	64
2.1.6. Clasificación del índice de aridez.....	67
2.1.7. Vías de acceso	70
2.1.8. Ubicación satelital del proyecto.....	71
2.2. Materiales, equipos y herramientas informáticas	72
2.2.1. Materiales	72
2.2.2. Equipos.....	72
2.2.3. Herramientas informáticas	73
2.3. Problemas específicos	73
2.3.1. ¿En la cuenca Cachi actualmente no se tiene una ecuación empírica adecuada para la estimación satelital y la distribución espacial de la evapotranspiración a través de mapas temáticos?	75
2.3.2. ¿En la cuenca Cachi no se ha realizado un estudio de la identificación de los mejores métodos indirectos para estimar la evapotranspiración?	85
2.3.3. ¿Es necesario que en la investigación se garanticen los resultados obtenidos de evapotranspiración de las estimaciones satelitales con el ajuste y la validación del modelo?	93

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	100
3.1. Estimación satelital y distribución espacial de evapotranspiración a través de la ecuación empírica seleccionada.....	100
3.1.1. Datos para la estimación satelital de evapotranspiración potencial.....	100
3.1.2. Evapotranspiración potencial satelital con ArcGIS 10.3	102
3.1.3. Discusión de la estimación de evapotranspiración por el método satelital	103
3.2. Estimación de evapotranspiración por métodos indirectos identificados y seleccionados.....	105
3.2.1. Estimación de la evapotranspiración potencial por el método tanque evaporímetro Clase A.....	105
3.2.2. Estimación de evapotranspiración potencial por los métodos de Penman Monteith y Hargreaves a través del software PETP V2.0.0.....	106
3.2.3. Discusiones de la estimación de evapotranspiración por los métodos indirectos.....	111
3.3. Ajuste y validación de los resultados obtenidos mediante los índices estadísticos.....	111
3.3.1. Comparación del método satelital frente a los métodos convencionales.....	112
3.3.2. Calibración del método satelital frente a los métodos convencionales.....	118
3.3.3. Validación del método satelital frente a los métodos convencionales.....	134
3.3.4. Discusiones del ajuste y validación de los resultados obtenidos mediante los índices estadísticos.....	139
3.3.5. Aplicación de la evapotranspiración potencial por el método satelital para calcular la evapotranspiración real de una cédula de cultivos planteada	142
3.3.6. Balance hídrico	145
CONCLUSIONES	150
RECOMENDACIONES	151
REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA.....	152
ANEXOS.....	159

ÍNDICE DE TABLAS

		Pág.
Tabla 1.1.	Elementos atmosféricos y su impacto en la evapotranspiración.....	13
Tabla 1.2.	Relación entre temperatura y la presión de saturación.....	14
Tabla 1.3.	Variables meteorológicas requeridas para la estimación de la evapotranspiración	22
Tabla 1.4.	Parámetros requeridos por las ecuaciones de la evapotranspiración potencial	34
Tabla 1.5.	Criterios de interpretación del desempeño del Número de Nash - Sutcliffe	52
Tabla 1.6.	Criterios de interpretación del desempeño del índice de confianza....	55
Tabla 1.7.	Índices estadísticos para evaluar los resultados	56
Tabla 2.1.	Límites geográficos de la cuenca Cachi	58
Tabla 2.2.	Límites de la cuenca Cachi	59
Tabla 2.3.	Precipitación efectiva	64
Tabla 2.4.	Temperatura eficiente.....	65
Tabla 2.5.	Distribución de la precipitación a través del año	65
Tabla 2.6.	Humedad atmosférica.....	65
Tabla 2.7.	Extensión y porcentajes para la clasificación climática	66
Tabla 2.8.	Clasificación del índice de aridez	67
Tabla 2.9.	Extensión y porcentajes para la clasificación del índice de aridez	69
Tabla 2.10.	Estaciones pertenecientes a la cuenca Cachi	70
Tabla 2.11.	Datos observados y datos satelitales	75
Tabla 2.12.	Índices estadísticos empleados	95
Tabla 2.13.	Época de siembra y cosecha para cultivos característicos de la cuenca Cachi	96
Tabla 3.1.	Estimación satelital de la evapotranspiración potencial promedio mensual, para los años 2013 a 2017.....	102
Tabla 3.2.	Evapotranspiración potencial mensual con el método tanque evaporímetro Clase A, año 2013.....	105
Tabla 3.3.	Evapotranspiración potencial promedio mensual mediante el método tanque evaporímetro Clase A, años 2013 al 2017	106
Tabla 3.4.	Evapotranspiración potencial mensual - método FAO Penman	

	Monteith, año 2013	107
Tabla 3.5.	Evapotranspiración potencial promedio mensual con el método FAO Penman Monteith, años 2013 al 2017	108
Tabla 3.6.	Evapotranspiración potencial mensual con el método Hargreaves en base a datos registrados de radiación solar, año 2013	108
Tabla 3.7.	Evapotranspiración potencial promedio mensual con el método Hargreaves en base a datos registrados de radiación solar, años 2013 al 2017	109
Tabla 3.8.	Evapotranspiración potencial mensual con el método Hargreaves en base a la temperatura, año 2013	110
Tabla 3.9.	Evapotranspiración potencial promedio mensual con el método Hargreaves en base a la temperatura, años 2013 al 2017	110
Tabla 3.10.	Evapotranspiración potencial promedio día, mensual y anual mediante el método satelital y los métodos convencionales, año 2013.....	112
Tabla 3.11.	Evapotranspiración potencial promedio día, mensual y anual mediante el método satelital y los métodos convencionales para el año 2014	113
Tabla 3.12.	Evapotranspiración potencial promedio día, mensual y anual mediante el método satelital y los métodos convencionales para el año 2015	115
Tabla 3.13.	Evapotranspiración potencial promedio día, mensual y anual mediante el método satelital y los métodos convencionales para el año 2016	116
Tabla 3.14.	Evapotranspiración potencial promedio día, mensual y anual mediante el método satelital y los métodos convencionales para el año 2017	117
Tabla 3.15.	Evapotranspiración potencial promedio multianual y mensual para los métodos seleccionados.....	119
Tabla 3.16.	Evapotranspiración potencial promedios multianuales, cálculo de los coeficientes de calibración	122
Tabla 3.17.	Evapotranspiración potencial satelital afectados por los coeficientes de calibración.....	122

Tabla 3.18.	Diferencia de error para los resultados sin calibrar.....	126
Tabla 3.19.	Diferencia de error para los resultados calibrados.....	128
Tabla 3.20.	Evapotranspiración potencial promedio multianual y mensual para los métodos seleccionados (calibrado).....	134
Tabla 3.21.	Validación de los resultados calibrados mediante los índices estadísticos.....	138
Tabla 3.22.	Desempeño de cada método de acuerdo al valor “c”. 2011 - 2014, INIA	139
Tabla 3.23.	Cédula de cultivos propuesta para calcular la evapotranspiración real.....	142
Tabla 3.24.	Parámetros para el balance hídrico (ETo)	147
Tabla 3.25.	Parámetros para el balance hídrico (ETr).....	149

ÍNDICE DE FIGURAS

		Pág.
Figura 1.1.	Proceso de la evapotranspiración.....	7
Figura 1.2.	Representación esquemática de una estoma.....	9
Figura 1.3.	Evapotranspiración de referencia, bajo condiciones estándar y bajo condiciones no estándar.....	10
Figura 1.4.	Factores meteorológicos que afectan a la evapotranspiración.....	12
Figura 1.5.	Factores fisiológicos que afectan a la evapotranspiración	16
Figura 1.6.	Curva del Kc en función del desarrollo del cultivo	17
Figura 1.7.	Representación esquemática de un lisímetro de balanza.....	19
Figura 1.8.	Componentes del balance de energía	20
Figura 1.9.	Variación diurna del balance de energía sobre una superficie transpiraste con suficiente cantidad de agua en un día soleado.....	20
Figura 1.10.	Tanque evaporímetro Clase A	23
Figura 1.11.	Dos casos de localización del tanque de evaporación y sus alrededores.....	24
Figura 1.12.	Formación de la precipitación en las nubes.....	36
Figura 1.13.	Elementos que forman el Sistema de Información Geográfica	39
Figura 1.14.	Celdas de una malla ráster con sus valores asociados.....	40
Figura 1.15.	Esquema operativo de un satélite de observación.....	41
Figura 1.16.	Componentes del sistema de teledetección	42
Figura 1.17.	Imagen satelital Landsat 8	45
Figura 1.18.	Presentación de la herramienta Ráster calculador	49
Figura 2.1.	Ubicación de la cuenca Cachi, provincial y departamental.....	60
Figura 2.2.	Zonas de vida de la cuenca Cachi	61
Figura 2.3.	Límites de la cuenca Cachi a nivel intercuencas	62
Figura 2.4.	Clasificación climática de la cuenca Cachi	63
Figura 2.5.	Distribución porcentual circular para la clasificación climática.....	66
Figura 2.6.	Clasificación del índice de aridez en la cuenca Cachi	68
Figura 2.7.	Distribución porcentual circular para la clasificación del índice de aridez	69
Figura 2.8.	Ubicación satelital de las principales estaciones meteorológicas de la cuenca Cachi	71

Figura 2.9.	Ubicación del río Cachi referente a la cuenca Cachi	71
Figura 2.10.	Ubicación satelital de la cuenca Cachi y sus subcuencas.....	72
Figura 2.11.	Relación de la variable independiente con la variable dependiente....	74
Figura 2.12.	Página principal del geoservidor Nasa Giovanni.....	77
Figura 2.13.	Ubicación del área de estudios en el geoservidor Nasa Giovanni	77
Figura 2.14.	Selección de datos del satélite Modis Terra en el geoservidor Nasa Giovanni	78
Figura 2.15.	Previsualización de los datos del geoservidor Nasa Giovanni	78
Figura 2.16.	Ubicación del área de estudios en el geoservidor USGS Earth Explorer.....	79
Figura 2.17.	Selección del satélite SRTM en el geoservidor USGS Earth Explorer	79
Figura 2.18.	Selección de la resolución en el geoservidor USGS Earth Explorer ..	80
Figura 2.19.	Herramienta Área Solar Radiation para obtener la radiación solar	80
Figura 2.20.	DEM cargado a la plataforma del ArcGIS 10.3.....	81
Figura 2.21.	Herramienta Project to Ráster para proyectar rásters.....	82
Figura 2.22.	Herramienta Extract by Mask con lo que se delimitó el área de trabajo.....	82
Figura 2.23.	Aplicación de la herramienta Ráster Calculator para obtener temperatura media.....	82
Figura 2.24.	Aplicación de herramienta Ráster Calculator para cambiar unidad de temperatura.....	83
Figura 2.25.	Aplicación de la herramienta Batch - Ráster Calculator	83
Figura 2.26.	Aplicación de la herramienta Area Solar Radiation.....	84
Figura 2.27.	Estimación de evapotranspiración potencial con la herramienta Raster Calculator.....	85
Figura 2.28.	Visita a la estación meteorológica del INIA.....	87
Figura 2.29.	Instrumentos meteorológicos de la estación del INIA	87
Figura 2.30.	Medición de la distancia a barlovento en la estación del INIA	88
Figura 2.31.	Ubicación política y geográfica en PETP V.2.0	92
Figura 2.32.	Datos meteorológicos en PETP V.2.0.....	93
Figura 2.33.	Aplicación de los coeficientes de calibración en los mapas satelitales	94

Figura 2.34.	Cálculo de distribución espacial de evapotranspiración real para cédula de cultivos.....	97
Figura 2.35.	Selección de datos del satélite GPM 3IMERG en el geoservidor Nasa Giovanni.....	98
Figura 2.36.	Previsualización de datos de precipitación del geoservidor Nasa Giovanni	98
Figura 2.37.	Datos de precipitación satelital en el ArcGIS.....	99
Figura 3.1.	Imágenes rásters de temperatura media y radiación solar distribuidos espacialmente en la cuenca Cachi.....	101
Figura 3.2.	Imagen ráster de la evapotranspiración potencial distribuido espacialmente en la cuenca Cachi	101
Figura 3.3.	Comparación de la evapotranspiración potencial satelital, años 2013 al 2017	103
Figura 3.4.	Variación mensual de la evapotranspiración potencial para el año 2013.....	113
Figura 3.5.	Variación mensual de la evapotranspiración potencial para el año 2014.....	114
Figura 3.6.	Variación mensual de la evapotranspiración potencial para el año 2015.....	115
Figura 3.7.	Variación mensual de la evapotranspiración potencial para el año 2016.....	117
Figura 3.8.	Variación mensual de la evapotranspiración potencial para el año 2017	118
Figura 3.9.	Comparación del promedio multianual y mensual de la evapotranspiración potencial satelital frente al método tanque evaporímetro Clase A.....	119
Figura 3.10.	Comparación del promedio multianual y mensual de la evapotranspiración	120
Figura 3.11.	Comparación del promedio multianual y mensual de la evapotranspiración potencial satelital frente al método Hargreaves en base a datos de radiación solar	120
Figura 3.12.	Comparación del promedio multianual y mensual de la evapotranspiración potencial satelital frente al método Hargreaves	

	en base a la temperatura	121
Figura 3.13.	Variación mensual de la evapotranspiración potencial para el año 2013, calibrado el método satelital	123
Figura 3.14.	Variación mensual de la evapotranspiración potencial para el año 2014, calibrado el método satelital	124
Figura 3.15.	Variación mensual de la evapotranspiración potencial para el año 2015, calibrado el método satelital	124
Figura 3.16.	Variación mensual de la evapotranspiración potencial para el año 2016, calibrado el método satelital	125
Figura 3.17.	Variación mensual de la evapotranspiración potencial para el año 2017, calibrado el método satelital	125
Figura 3.18.	Mapas temáticos de la evapotranspiración potencial por el método satelital calibrado para el año 2013	128
Figura 3.19.	Mapas temáticos de la evapotranspiración potencial por el método satelital calibrado para el año 2014	129
Figura 3.20.	Mapas temáticos de la evapotranspiración potencial por el método satelital calibrado para el año 2015	130
Figura 3.21.	Mapas temáticos de la evapotranspiración potencial por el método satelital calibrado para el año 2016	131
Figura 3.22.	Mapas temáticos de la evapotranspiración potencial por el método satelital calibrado para el año 2017	132
Figura 3.23.	Mapas temáticos de la evapotranspiración potencial por el método satelital calibrado promedio multianual - mensual	133
Figura 3.24.	Correlación lineal del método satelital (calibrado) frente al método tanque evaporímetro Clase A	135
Figura 3.25.	Correlación lineal del método satelital (calibrado) frente al método FAO Penman Monteith	136
Figura 3.26.	Correlación lineal del método satelital (calibrado) frente al método Hargreaves en base a datos de radiación solar	136
Figura 3.27.	Correlación lineal del método satelital (calibrado) frente al método Hargreaves en base a la temperatura	137
Figura 3.28.	Extracción de valores del mapa temático de evapotranspiración potencial	143

Figura 3.29. Mapas temáticos de la evapotranspiración real por el método satelital para la propuesta de cédula de cultivos	144
Figura 3.30. Mapa temático del balance hídrico con datos satelitales.....	146
Figura 3.31. Mapa temático del balance hídrico con datos satelitales para la cédula de cultivos.....	148

ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Tablas para el cálculo de la evapotranspiración potencial.....	160
Anexo B. Datos meteorológicos requeridos para la evapotranspiración	169
Anexo C. Hojas de cálculo para los índices estadísticos de validación	174
Anexo D. Matriz de consistencia	180
Anexo E. Panel fotográfico	182
Anexo F. Trámites documentarios.....	189

LISTA DE ACRÓNIMOS

AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer (Radiómetro Avanzado de Muy Alta Resolución).
CE	Coficiente de Eficiencia.
EMS	Error de Sesgo Medio.
FAO	Food and Agriculture Organization (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura).
GCS	Glasgow Coma Scale (Escala de coma de Glasgow).
INIA	Instituto Nacional de Innovación Agraria.
MAE	Mean Absolute Error (Error Medio Absoluto).
MAPE	Mean Absolute Percentage Error (Error Porcentual Absoluto Medio).
MSNM	Metros Sobre el Nivel del Mar.
NASA	National Aeronautics and Space Administration (Administración Nacional de Aeronáutica y Espacio)
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration (Administración Nacional Oceánica y Atmosférica).
NSE	Nash - Sutcliffe Number (Número de Nash - Sutcliffe).
OMM	Organización Meteorológica Mundial.
OPEMAN	Oficina de Operación y Mantenimiento Hidráulico del Gobierno Regional de Ayacucho.
PETP	Programa de Evapotranspiración Potencial.
POWER	Prediction of Worldwide Energy Resource (Predicción del Recurso Energético Mundial).
RMSE	Root Mean Square Error (Raíz del Error Cuadrático Medio).
SENAMHI	Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú.
SIG	Sistema de Información Geográfica.
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission (Misión Topográfica Shuttle Radar).
TIFF	Tagged Image File Format (Formato de Archivo de Imagen Etiquetada).
UNEP	United Nations Environment Programme (Programa del Medio Ambiente de las Naciones Unidas).
UNESCO	United Nations Educational, Scientific, and Cultural Organization (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura).
USGS	United States Geological Survey (Servicio Geológico de los Estados Unidos).
UTM	Universal Transverse Mercator (Universal transversal de Mercator).
WGS	World Geodetic System (Sistema Geodésico Mundial).

LISTA DE ABREVIATURAS

- **CE:** Factor de calibración para la altura o elevación del lugar.
- **CH:** Factor de calibración para la humedad relativa.
- **Cp:** Calor específico del aire (MJ/kg/°C).
- **d:** Índice de concordancia.
- **DVP:** Déficit de presión de vapor (kPa).
- **E:** Evaporación.
- **e_a:** Presión de vapor real (kPa).
- **Epan:** Evaporación del tanque evaporímetro.
- **e_s:** Presión de vapor de saturación (kPa).
- **ET:** Evapotranspiración.
- **ETc:** Evapotranspiración real o de cultivo.
- **ETCaj:** Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar.
- **ETo, ETp:** Evapotranspiración potencial o de referencia.
- **G:** Flujo del calor del suelo (MJ/m²/día).
- **H:** Calor sensible.
- **HR:** Humedad relativa.
- **I:** Flujo entrante o precipitación.
- **IAF_{activo}:** Índice activo de área foliar (m²/m²).
- **IS:** Insolación real.
- **Kc:** Coeficiente de cultivo.
- **Kp:** Coeficiente del Tanque evaporímetro.
- **k_w:** Factor de conversión de W/m² a mm/día, es igual a 0.035271.
- **MF:** Factor mensual de latitud.
- **N:** Duración máxima diaria media de las horas de fuerte insolación.
- **n:** Horas de insolación fuerte promedio del lugar.
- **N:** Horas de insolación fuerte, según mes y latitud del lugar.
- **O:** Flujo saliente o escurrimiento total (mm).
- **p:** Porcentaje de horas máximas de sol.
- **r_a:** Resistencia aerodinámica (s/m).
- **r_i:** Resistencia estomática total de una hoja bien iluminada (s/m).
- **RMM:** Radiación extraterrestre equivalente en mm de evaporación mensual.
- **Rn:** Radiación neta.
- **r_R:** Resistencia de radiación (s/m).
- **r_s:** Resistencia superficial (s/m).

- **RSM:** Radiación solar equivalente en mm de evaporación mensual.
- **S:** Cambio del contenido de agua en el reservorio.
- **T:** Transpiración.
- **T_a:** Es la temperatura media mensual del aire para un mes dado (°C).
- **T_{máx}:** Temperatura máxima del aire, expresada en °C.
- **T_{med}:** Temperatura media del aire (°C).
- **TMF:** Temperatura media mensual (°F).
- **T_{mín}:** Temperatura mínima del aire (°C).

LISTA DE SÍMBOLOS

- λ : Calor latente de vaporización (MJ/kg).
- λ_{ET} : Flujo de calor latente (MJ/m²/día).
- Δ : Pendiente de la curva de presión de vapor de saturación (kPa/°C).
- γ : Constante psicrométrica (kPa/°C).
- ρ : Densidad media del aire a presión constante (kg/m³).

RESUMEN

La presente investigación logró la estimación de la evapotranspiración con datos satelitales basado en plataformas computacionales. Se utilizó el método satelital y con ello se elaboraron mapas temáticos con distribución espacial en la cuenca Cachi. Se adquirieron datos satelitales de los geoservidores Nasa Giovanni y USGS Earth Explorer, con lo que se estimó la evapotranspiración potencial satelital = 1320.53 mm/año. Para respaldar la efectividad de éste, se estimaron las evapotranspiraciones potenciales con los métodos indirectos: tanque evaporímetro Clase A = 1227.11 mm/año, FAO Penman Monteith = 1344.72 mm/año, Hargreaves en base a datos registrados de radiación solar = 1361.03 mm/año y Hargreaves en base a la temperatura = 1278.61 mm/año a través del software PETP V2.0.0 para la estación del INIA; frente a estos resultados, se ajustó y validó el método satelital a través de los índices estadísticos, resultando para el tanque evaporímetro Clase A: Número de Nash - Sutcliffe (NSE = -2.483), Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE = 0.452 mm/día), Error Porcentual Absoluto Medio (MAPE = 12.685%), Índice de concordancia (d = 0.342), Coeficiente de correlación (r = 0.047) e Índice de confianza (c = 0.016) y para los demás métodos: NSE = 0.671, RMSE = 0.268 mm/día, MAPE = 6.482%, d = 0.89, R = 0.921 e c = 0.82 en promedio. Determinando insuficiente para el tanque evaporímetro Clase A y muy buenos para los demás métodos de acuerdo a la escala de interpretación del desempeño de los índices estadísticos. Finalmente, se calcularon las evapotranspiraciones reales (distribuido espacialmente en la cuenca Cachi) para una cédula de cultivos propuesta. Concluyendo que el método satelital puede ser empleado como una opción de estimación de la evapotranspiración en casos de limitaciones de datos meteorológicos.

Palabras clave: Evapotranspiración, datos satelitales, distribución espacial, índices estadísticos.

INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso explotado por el hombre que tiene mayor relevancia. El agua es esencial para la existencia y evolución de todo ser vivo, por lo tanto, es un factor que relaciona condiciones climáticas y edafoclimáticas, por lo que su cantidad en el suelo y atmosfera ejercen impactos directos en el ecosistema (Navejas et al., 2011).

La evapotranspiración es uno de los procesos de mayor importancia en el ciclo hidrológico, la precipitación y evapotranspiración son los elementos más relevantes del balance hídrico. La evapotranspiración, tiene mayor importancia en regiones áridas y semiáridas, este representa el agua evaporada desde el suelo y la cobertura vegetal hacia la atmosfera. Entonces estimar este parámetro es fundamental en estudios de procesos hidrológicos (Marini et al., 2017).

La presente investigación muestra de cómo los datos satelitales y la distribución espacial contribuyen como alternativa de solución a la escasez de datos meteorológicos en la cuenca Cachi, pues de estos datos depende la eficiencia y credibilidad al momento de estimar la evapotranspiración que es un factor de prioridad para resolver los requerimientos hídricos. Entonces, es fundamental la aplicación de modelos más rudimentarios como son los métodos satelitales en base a los geoservidores Nasa Giovanni y USGS Earth Explorer. Para respaldar la credibilidad de los resultados fue esencial el ajuste y validación frente a los métodos convencionales seleccionados: tanque evaporímetro Clase A, FAO Penman Monteith, Hargreaves en base a datos registrados de radiación solar y Hargreaves en base a datos de temperatura. Esta moderna metodología planteada también tiene ventajas en el ámbito económico, debido a que los datos aportados por los diversos geoservidores son gratuitos y completos. Por otro lado, los softwares utilizados para el procesamiento de los datos satelitales también se encuentran en el internet de manera gratuita y accesible para el público en general; por ende, hablando en términos económicos se tiene gran ventaja, pues para obtener

datos meteorológicos de las estaciones se tiene que pagar un costo adicional por dato, siendo un problema económico al momento de estimar la evapotranspiración.

La estimación de la evapotranspiración involucra un manejo sostenible del agua, y un balance hídrico apropiado para la agricultura y por ende para el desarrollo de las actividades del hombre en la sociedad. Así que emplear bien este recurso nos posibilita conservar el agua para futuras generaciones dentro de la sociedad; esto se ve reflejado con mayor interés en nuestra región por ser una zona subhúmeda seca - semiárida.

Mediante los resultados se lograron obtener mapas temáticos - satelitales de evapotranspiración potencial y real con sus distribuciones espaciales para la cuenca Cachi, los cuales fueron ajustados y validados mediante los índices estadísticos y frente a los métodos convencionales seleccionados. Estos resultados podrán ser aplicados en futuras investigaciones y para resolver las disponibilidades y pérdidas de agua en los requerimientos hídricos en los diversos proyectos de ingeniería en la cuenca Cachi del departamento de Ayacucho, el cual presenta gran variabilidad de evapotranspiración por ser una zona de relieve accidentado.

Para conseguir todo lo mencionado anteriormente, se han explorado alternativas modernas de innovación a nivel nacional e internacional, para aplicarlas en nuestra región de Ayacucho, tomando los modelos existentes y mejorando e innovando para alcanzar los objetivos siguientes:

Objetivo general

Estimar la evapotranspiración satelital y su distribución espacial y la identificación y selección del método indirecto y el ajuste y validación correspondiente en la cuenca Cachi.

Objetivos específicos

1. Evaluar las ecuaciones empíricas y elegir una de ellas para la estimación satelital y distribución espacial de la evapotranspiración a través de mapas temáticos.
2. Identificar y seleccionar los métodos indirectos para estimar la evapotranspiración en la cuenca Cachi.
3. Ajustar y validar los resultados obtenidos mediante los índices estadísticos.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1.1. ANTECEDENTES

Henriquéz y Miner (2015) a través de los análisis estadísticos enfrentaron datos de evapotranspiración potencial media mensual y anual por el método de Hargreaves, en base a la radiación extraterrestre con los valores obtenidos del Global – PET. Los parámetros que utilizaron para el cálculo de la evapotranspiración potencial fueron resultados de la base de datos del WorldClim en resolución de treinta segundos de arco, basados en observaciones climáticas entre 1950 y 2000; también de datos topográficos de Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). Los datos mensuales usados fueron precipitaciones, temperaturas medias, máximas y mínimas. Se han llegado a los siguientes resultados: el mapa Global - PET escenifica de manera correcta las estimaciones de la evapotranspiración potencial mensual y anual calculadas, salvo para el mes de septiembre, por el método de Hargreaves en todas las estaciones del país examinadas, con error medio de ± 6.2 mm con valor mensual y ± 66.2 mm con valor anual, lo que representa un 88.1 % de confianza; entonces, se demuestra que la interpolación empleada para obtener el mapa es aprobado para todo el territorio hondureño, lo que designa que los mapas Global - PET a nivel mensual (menos septiembre) y anual pueden ser empleados para obtener la evapotranspiración potencial media en cualquier punto de Honduras, lo cual reproduce una nueva base de datos validadas a nivel nacional, sin costo alguno y permisible desde la web para los que deseen hacer uso de ella. Para obtener la evapotranspiración diaria o semanal requerida, solo basta reconocer el área de interés, conseguir el dato mensual de la evapotranspiración potencial y seccionarlo entre el número de semanas o días, según sea la condición.

Sánchez y Chuvieco (2000) afirman que, en función del análisis de regresión múltiple entre datos de evapotranspiración del cultivo de referencia, obtenidos con el método de Penman Monteith y múltiples variables provenientes de imágenes NOAA - AVHRR, se

suscitan modelos que permitan estimar la evapotranspiración en la Comunidad Autónoma de Andalucía, en el tiempo comprendido entre los años 1994 y 1997. Los prototipos fueron valorados correctamente en las estaciones meteorológicas empleadas, así como también mediante los mapas regionales de porcentajes de alteración entre datos observados y estimados. En su estudio general lograron un coeficiente de determinación (R^2) = 0.79 y un error típico de estimación (mm/día) = 0.64. Conforme a estos resultados, es factible asegurar la utilidad de la teledetección en la obtención de la evapotranspiración de manera regional.

Retamozo (2015) estimó la evapotranspiración a partir del satélite Terra y Aqua del sensor Modis, resultado de la evapotranspiración MOD16A2. Relacionó la evapotranspiración empleando tres métodos planteados por la FAO y la evapotranspiración de MOD16A2, sobre la base de las imágenes satelitales, durante los cuatro años: de enero 2011 a diciembre de 2014, para el lugar del INIA Canaán (13°09'48". S, 74°12'20" W). Los métodos que examinó fueron el modelo Hargreaves en base a la temperatura, Penman Monteith FAO y tanque evaporímetro Clase A. Su propósito fue relacionar el desempeño de los tres métodos en relación al MOD16A2, que empleó como método fundamental. La exploración de datos lo ejecutó a través del método de regresión y la disparidad entre los valores observados, en relación al MOD16A2, fue medida por medio de un coeficiente de confianza (e), propuesto por Camargo y Sentelhas, que retribuye al resultado entre el coeficiente de correlación (r) en valor absoluto por el coeficiente de exactitud planteado por Willmott en el año 1981. En conclusión, el método de Penman Monteith FAO, mostró una interpretación muy buena; en tanto que los métodos de Hargreaves y el del tanque evaporímetro Clase A fueron malos.

Por su parte, Yarad (2018) consiguió como producto la distribución de temperatura del aire diario con buena resolución espacial, un conjunto de valores de evapotranspiración diaria y acumulada y mapas de temperatura y evapotranspiración del cultivo de referencia media mensual y anual en término medio para los años 2002 a 2016. Los resultados encontrados con respecto a los cálculos directos presentan una conducta similar, pero una superior dispersión y sobrestiman los obtenidos in-situ, el error relacionado promedio es de un 25%. Al ratificar con respecto al producto MOD16 se obtienen coeficiente de determinación mayor a 0.5 y en promedio mayor a 6.5.

Así mismo, Alejo (2015) garantiza que la programación de la información climática presentada por el WorldClim, mediante el Sistemas de Información Geográfica (SIG), hacen factible un análisis cabal de las variables climáticas que comandan una definida área, por ello, ha logrado realizar la sistematización de la información climática para el municipio de Patacamaya y sus cantones, que pertenece a la provincia Aroma del Departamento de La Paz, Bolivia. Este municipio, no contaba con una estación meteorológica establecida por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) de Bolivia, y esta carencia de servicio y más la falta de información climática, generaron la necesidad de ejecutar este trabajo, con información climática apto en WorldClim.

1.2. EVAPOTRANSPIRACIÓN

La evapotranspiración (ET) (Figura 1.1) es la composición de la evaporación desde la transpiración de las plantas y la superficie terrestre (Chow et al., 2000).

La evapotranspiración consiste en que la superficie del suelo repone a la atmósfera en mediante vapor el agua que contiene sobre ella, compone un elemento esencial que acopla el ciclo hidrológico y el equilibrio de energía superficial, concediendo a través de la transferencia de masa y energía sostener niveles energéticos e hídricos apropiados en el sistema suelo - atmósfera (Sánchez & Chuvieco, 2000).

Se manifiesta en el momento en que la evaporación y la transpiración suceden a un mismo tiempo y no hay una manera espontánea de diferenciar entre ambos procesos. Aparte de la disposición de agua en la superficie terrestre, la evaporación de un suelo cultivado es definido prioritariamente por parte de la radiación solar que se emite a la superficie terrestre. Esto se reduce con respecto al crecimiento de las plantas, a medida que las plantas crecen generan más sombra en el suelo. En las fases iniciales del cultivo, el agua se pierde primordialmente por evaporación directa de la superficie terrestre, pero con el crecimiento total del cultivo finalmente el suelo se cubre por completo, por lo tanto, esto conlleva a que la transpiración sea el proceso más importante. En palabras más sencillas, en la fase inicial que es la siembra, casi en su totalidad la evapotranspiración ocurre mediante la evaporación, mientras que las plantas cubren por completo el suelo, la evapotranspiración tiene mayor posibilidad de ocurrencia a través de la transpiración (Padilla, 2016).



Figura 1.1. Proceso de la evapotranspiración

Fuente: Cita web 2

Tener en cuenta la pérdida de agua de la superficie del suelo es muy importante en las diversas áreas del conocimiento científico, principalmente al momento de analizar la meteorología e hidrología respecto a las múltiples actividades del hombre.

Para los especialistas en meteorología es importante estudiar la evapotranspiración, ya que este altera las características de las masas de aire en la atmósfera y modifica la energía de este. Para los hidrólogos es importante conocer la pérdida de agua en canales, reservorios y todo tipo de fuente de agua también es importante saber la cantidad de agua a ser añadida mediante el riego a las plantas; los ingenieros forestales necesitan manejar estos conceptos pues influyen al momento del secado de las superficies de madera; para los patólogos, al momento de secar las plantas, para supervisar y controlar el aumento de enfermedades; los ingenieros agrónomos y agrícolas, por la pérdida de agua del suelo y de diferentes cultivos; para los fisiólogos y botánicos por la pérdida de agua en el proceso de crecimiento de las plantas; también para, geógrafos, ingenieros, climatólogos, es importante conocer la cantidad de agua que deja una área mediante la forma de vapor para volver a la atmósfera (Mejía, 2015).

La evaporación es una fase constante del ciclo hidrológico. Se toma en cuenta como un acontecimiento netamente físico. Gran cantidad de agua que es captada por el suelo, regresa a la atmósfera mediante vapor específicamente por evaporación del suelo o transpiración de los cultivos. Dada la dificultad de calcular por separado ambos procesos se juntan comúnmente bajo el nombre de evapotranspiración (Pérez, 2015).

1.2.1. Evaporación

La evaporación (E) es un proceso mediante el cual el agua se transforma en vapor (vaporización) y se separa del área evaporante (eliminación de vapor). El agua se evapora de una diversidad de superficies, tales como caminos, ríos, suelos lagos, y la vegetación mojada (Allen et al., 2006).

La evaporación se genera desde toda superficie que contenga agua, ya sea un suelo sin cobertura vegetal o cubierto de vegetación, áreas impermeables como superficies en de pavimentos, cuerpos de agua como ríos o lagunas. La cantidad de evaporación cambia con las propiedades de reflectividad y el color de la superficie, y también depende si la superficie está o no expuesta directamente a la radiación solar (Guevara, 2015).

La distribución de energía para provisionar el calor latente de vaporización y la habilidad para transportar el vapor fuera de la superficie de evaporación son los dos factores primordiales que afectan en la evaporación desde una superficie abierta de agua. La radiación solar es la esencial fuente de energía calórica. La facilidad de traslado de vapor fuera de la superficie de evaporación es producido por la gradiente de humedad específica en el aire y por la velocidad del viento sobre la superficie. La evaporación que inicia en la superficie terrestre comprende la evaporación directa desde la superficie de la vegetación y desde el suelo en conjunto (Chow et al., 2000).

Mejía (2015) afirma que las condiciones para que suceda la evaporación son:

- Tiene que existir una fuente de energía (en este caso radiación solar), calor sensible de la atmósfera o del área evaporante. Por lo regular, la radiación solar es la primordial fuente para que ocurra la evaporación.
- Una gradiente de acumulación de vapor, que es una disimilitud entre la presión del vapor de aire y la presión de saturación del vapor a la temperatura de la superficie evaporante.

1.2.2. Transpiración

La transpiración (T) se produce mediante las hojas de las plantas, mediante el cual el agua es evacuada por las raíces, dirigiendo hacia la parte superior distribuida en sus tallos y esparcida a la atmósfera mediante reducidas aberturas en las hojas denominadas estomas (Chow et al., 2000).

Es el egreso de agua dirigida hacia la atmósfera mediante vapor, producto de las interacciones físicas y fisiológicas de las plantas. El índice de transpiración es facultad de las estomas, de las raíces (profundidad) y del tipo de vegetación, además de los factores que influyen la evaporación (Mejía, 2015).

La transpiración trata en que la vaporización del agua que se encuentra en los tejidos vegetales y su siguiente destitución dirigida hacia la atmósfera, las plantas disipan agua preeminentemente desde las estomas (Figura 1.2). Estas son diminutas aberturas que se ubican en las hojas por las cuales pasa el vapor de agua y los gases de la planta dirigida a la atmósfera. La vaporización ocurre internamente en la hoja, en las zonas intercelulares, y la interrelación del vapor respecto a la atmósfera es moderado por los orificios estomáticos. Casi toda el agua succionada de la superficie terrestre se disipa por transpiración y solamente una reducida fracción se transforma en parte de los tejidos vegetales (Allen et al., 2006).

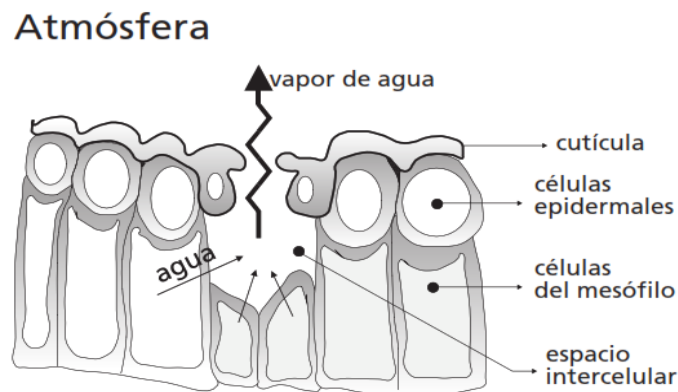


Figura 1.2. Representación esquemática de una estoma

Fuente: Allen et al. (2006)

La transpiración, al igual que la evaporación directa, requiere de la contribución de energía de la velocidad del viento y del gradiente de presión de vapor. Entonces, la temperatura del aire, la radiación, el viento y la humedad atmosférica también deben ser incluidos para su estimación (Allen et al., 2006).

1.2.3. Conceptos de evapotranspiración

La evapotranspiración contiene y especifica tres diferentes definiciones (Figura 1.3): evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ETc), evapotranspiración del

cultivo de referencia (ET_o), y evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar (ET_{Caj}) (Allen et al., 2006).

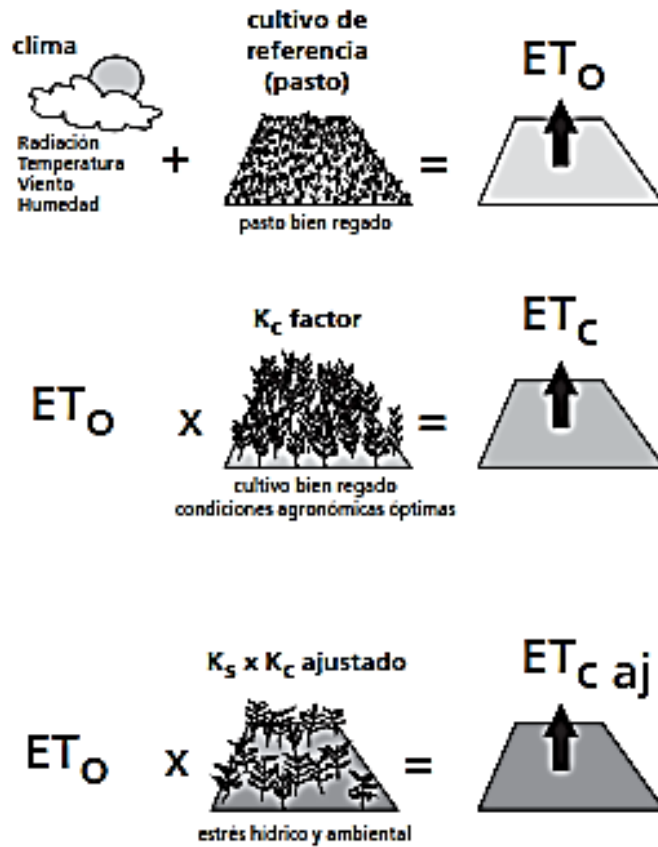


Figura 1.3. Evapotranspiración de referencia, bajo condiciones estándar y bajo condiciones no estándar

Fuente: Allen et al. (2006)

1.2.3.1. Evapotranspiración potencial o de referencia

Es la sustracción del agua por evapotranspiración en un suelo cubierto por vegetación verde y en proceso de crecimiento, abarcando en su totalidad la superficie, sin sufrir deficiencia de humedad (humedad del suelo cercana a la capacidad de campo) y de altura uniforme (Mejía, 2015).

Como primera definición de evapotranspiración potencial (ET_o) fue insertado a fines de los años 1940 a 1950 por Penman, el cual lo define como “La cantidad de agua transpirada en un determinado tiempo y por un cultivo corto y verde, abarcando en su totalidad el suelo, con adecuado estado de agua en el perfil del suelo y de altura uniforme”. Se debe aclarar que, en el concepto de ET_o , el valor de ET_o no está

vinculado específicamente a un cultivo. La central equivocación con el concepto de evapotranspiración potencial es que allí están los diferentes cultivos agronómicos y hortícolas que se acomodan a la representación de cultivo verde corto. Entonces, los científicos pueden ser desconcertados al momento de elegir el cultivo para usarlo como un cultivo verde corto, ya que los valores de evapotranspiración desde cultivos agrícolas bien humectados no deben pasar el 10 a 30 % en tamaño que los ocurridos desde grass verde corto (Irmak & Haman, 2003).

También tiene que ver con la tasa de evapotranspiración que contiene una superficie de referencia, que sucede sin limitaciones de agua. La superficie de referencia es de un cultivo hipotético de pasto que tiene características definidas en una resistencia superficial fija de 70 s/m, un albedo de 0.23 y una altura (asumida) de 0.12 m. También es importante recalcar que los factores que afectan la evapotranspiración potencial son los parámetros climáticos. Entonces, ETo es también un parámetro climático que puede ser medido a partir de los datos meteorológicos. ETo manifiesta el poder evaporante de la atmósfera en una zona y época del año determinado, y no toma en cuenta ni las características del cultivo, ni los factores de la superficie (Allen et al., 2006).

1.2.3.2. Evapotranspiración real, actual o de cultivo

Mejía (2015) afirma que la evapotranspiración real también se conoce como el uso consuntivo, es la transmisión de agua por evaporación y transpiración, en circunstancias atmosféricas y humedad de la superficie. Es la porción de agua auténticamente evapotranspirada por el área evaporante. Es muy versátil y depende de:

- Las condiciones climáticas, en particular el viento y el balance de radiación.
- La menor o mayor disposición de agua en la superficie, determinando la tenacidad a la transmisión de vapor de agua hacia la atmósfera.
- La característica de la parte superior de las plantas, como altura, extensión, disponibilidad de la superficie evaporante en el espacio.

Es certero que la evapotranspiración real (ETc) está ceñida con las condiciones reales del medio y condiciones naturales de humedad disponible. En cualquier caso la evapotranspiración potencial es el límite principal de la evapotranspiración real (Del Carmen, 2001).

El determinante de mayor importancia en el balance hídrico y fundamental índice de las demandas de agua de las plantas, es la evapotranspiración real en situaciones estándares, se define como el producto al multiplicar la evapotranspiración potencial de la zona por el coeficiente de cultivo K_c , indicado en la Ecuación 1.1 (Correa, 2015).

$$ET_c = K_c * ET_o \quad \dots\dots\dots(Ec. 1.1)$$

Dónde:

ET_c : Evapotranspiración de cultivo

K_c : Coeficiente de cultivo

ET_o : Evapotranspiración de referencia

1.2.4. Factores que afectan la evapotranspiración

1.2.4.1. Factores meteorológicos

La evapotranspiración tiene como principales factores meteorológicos que la afectan de manera directa y son (Figura 1.4 y Tabla 1.1): temperatura, radiación solar, velocidad del viento y humedad del aire (Allen et al., 2006).

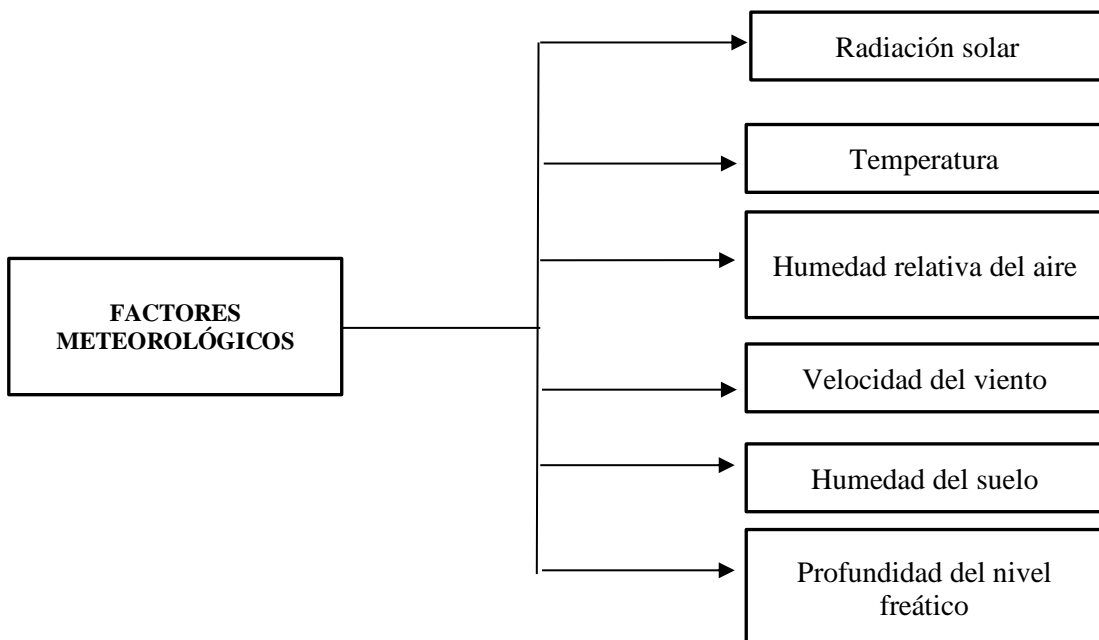


Figura 1.4. Factores meteorológicos que afectan a la evapotranspiración

Fuente: Elaboración propia

El intercambio de agua entre dos cuerpos o también conocido como la evaporación, entre un receptor (atmósfera) y una fuente de área evaporante. La tasa de evaporación, esto es, la velocidad con que el fenómeno se elabora, necesita de las características de esos medios. Entre los factores alusivos a la atmósfera pueden ser referidos a la temperatura, humedad del aire, viento, y entre los referidos a la superficie evaporante, la radiación solar y el tipo de suelo, esta primero haciendo sentir su efecto a través del calentamiento de la superficie (Mejía, 2015).

Tabla 1.1. Elementos atmosféricos y su impacto en la evapotranspiración

Agente	Factores	Efecto general
Elementos atmosféricos	Radiación solar	+ Radiación → + ET
		− Radiación → − ET
	Temperatura	+ Temperatura → +ET
		− Temperatura → − ET
	Humedad del aire	− Humedad → + ET
	Altitud	+ Altitud → +ET
	Presión atmosférica	− Presión → +ET
Velocidad del viento	+ Viento → +ET	

Fuente: Elaboración propia

a. Radiación solar

El desarrollo de la evapotranspiración está definido por la cantidad de energía que produce la evaporación del agua. La fuente de energía más importante en el planeta es la radiación y puede transformar grandes cantidades de agua en estado líquida en vapor de agua. La localización y época del año es la que define la cantidad potencial de radiación que puede entrar a una superficie evaporante. La cantidad potencial de radiación es variable para las diversas estaciones del año y cada latitud, esto debido al movimiento alrededor del sol y a las diferencias en la posición del planeta.

La turbidez de la atmósfera es causante de la radiación solar real que alcanza la superficie evaporante también tiene que ver la presencia de nubes que reflejan y absorben cantidades importantes de radiación solar. Cuando se efectúa la radiación solar en la evapotranspiración, también se debe considerar que para evaporar el agua no se utiliza toda la energía con que se cuenta. El resto de energía es utilizado para calentar el suelo y la atmósfera (Allen et al., 2006).

La tierra alcanza una cantidad de energía del sol por unidad de superficie, determinada en el límite (tope) de la atmósfera es de aproximadamente a 2 cal/min/cm^2 (1.39 kW/m^2) y es llamada constante solar. De eso solo entre 0.1 y 0.2 kW/m^2 alcanzan la superficie terrestre; no obstante, esta suficiente para evaporar una lámina de agua entre 1.30 y 2.60 m de altura (Mejía, 2015).

b. Temperatura

La temperatura del aire es aumentada por el calor emitido por la tierra y la radiación solar absorbida por la atmósfera. El calor sensible del aire circundante entrega energía a la planta, entonces produce un cierto control en la tasa de evapotranspiración. La pérdida de agua por evapotranspiración será mayor en un día soleado y cálido, que en un día fresco y nublado (Allen et al., 2006).

El aumento de temperatura eleva el valor de la presión de saturación del vapor de agua, tolerando a que elevadas cantidades de vapor de agua esten en el mismo volumen de aire, para el estado de saturación. En la Tabla 1.2 se aprecia que para cada 10°C la presión de saturación se compone aproximadamente el doble (Mejía, 2015).

Tabla 1.2. Relación entre temperatura y la presión de saturación

T(°C)	0	5	10	15	20	25	30	35	40
P(atm)	0.0062	0.0089	0.0125	0.0174	0.0238	0.0322	0.0431	0.0572	0.0750

Fuente: Mejía (2015, cita la tabla de Pinto et al., 1976)

c. Humedad del aire

En tanto que la contribución de energía solar y del aire circundante es el motivo principal para la evaporación, la diferencia entre el aire circundante y la presión de vapor de agua en la superficie evapotranspirante es el factor definitivo para la eliminación de vapor. Superficies bien regadas en lugares áridos calientes y secos, consumen grandes cantidades de agua debido al poder de extracción de vapor de la atmósfera y a la gran disponibilidad de energía. Mientras que, en regiones húmedas tropicales, pese de que la incorporación de energía es bastante, la elevada humedad del aire disminuirá la demanda de ET. En lo último mencionado, como el aire esta ya casi saturada, puede succionar menor agua adicional entonces la tasa de ET es menor que en superficies áridas (Allen et al., 2006).

Como se sabe, la humedad del aire y la temperatura acondicionan la presión de vapor el mismo, actuando, entonces, como factores enlazados a la gradiente de vapor entre el aire vecino y la superficie (Mejía, 2015).

d. Velocidad del viento

El proceso expulsar el vapor depende en principalmente del viento y de la turbulencia del aire, los cuales transfieren altas cantidades de aire en dirección a la región evaporante. Al momento que el agua se evapora, el aire sobre la región evaporante se satura sucesivamente con vapor. Si este aire no se reemplaza sin intermisión por un aire más seco, baja el grado de expulsión de vapor de agua y la tasa de evapotranspiración se baja (Allen et al., 2006).

En este proceso el viento participa de manera mecánica, reemplazando el aire que está enlazado con las masas de agua o con la vegetación, removiendo del lugar las masas de aire que ya tienen un grado de humedad elevado. En la parte que está enlazado con la superficie a través de la difusión molecular se realiza el movimiento de vapor por encima de la capa límite superficial, el encargado de esto es el aire turbulento (difusión turbulenta) (Mejía, 2015).

1.2.4.2. Factores relacionados con la vegetación

El tipo de cultivo, la etapa de desarrollo, la variedad, y los factores fisiológicos (Figura 1.5) se debe tomar en cuenta cuando se estima la ET_c , porque se desarrollan en superficies amplias y bien manejadas. La disimilitud en la altura del cultivo, resistencia a la transpiración, el reflejo, la rugosidad del cultivo, las características radiculares del cultivo y la cobertura del suelo dan cabida a distintos niveles de ET en diversos tipos de cultivos, por más que se encuentren en condiciones ambientales similares (Allen et al., 2006).

Las formas de las plantas impactan en el aire turbulento y al intercambio de agua desde la superficie de evaporación y la atmósfera. También, el viento, la luz y otros factores afectan en la apertura y cierre de las estomas de los cultivos de distintos modos, teniendo efecto en la habilidad del cultivo de llevar agua desde el sistema de raíces hasta las hojas (Del Carmen, 2001).

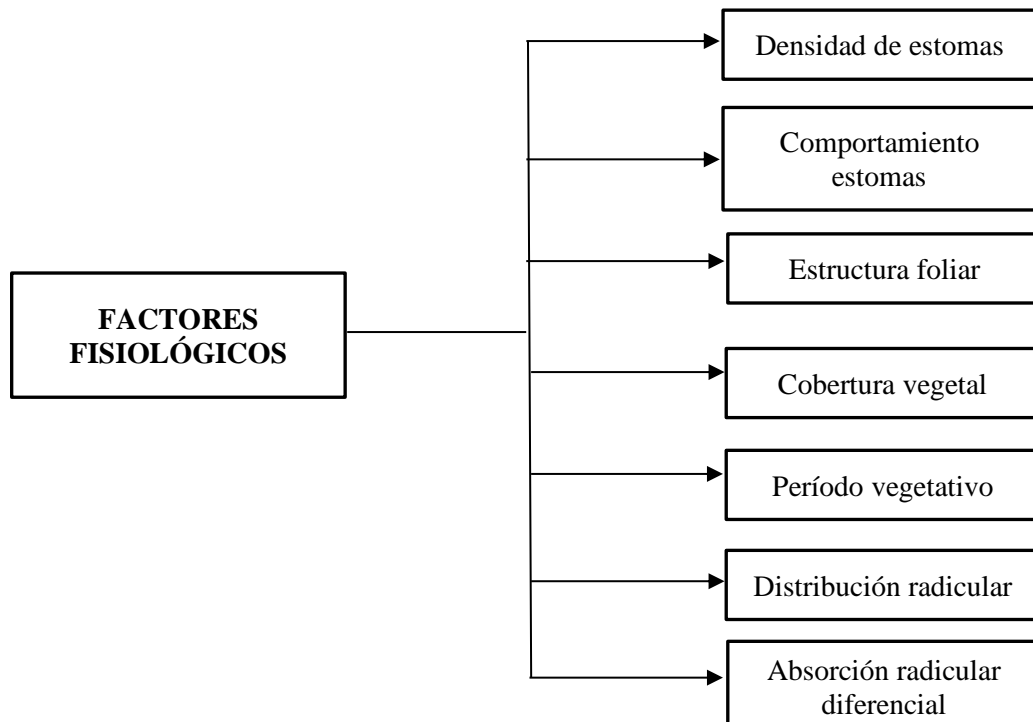


Figura 1.5. Factores fisiológicos que afectan a la evapotranspiración

Fuente: Elaboración propia

1.2.5. Unidades de la evapotranspiración

La evapotranspiración se manifiesta comúnmente en milímetros por unidad de tiempo. Lo que indica la cantidad de agua que se pierde de un área cultivada en unidades de altura de agua. La unidad de tiempo es días, horas, varios días, meses o, incluso un completo período de cultivo o un año.

La unidad en la que se puede expresar la altura del agua también está definida en términos de la energía recibida por unidad de área. Lo que da referencia a la energía o al calor necesario para vaporizar el agua. Esta energía, representa el calor latente de vaporización (λ) y está en función de la temperatura del agua. Por ejemplo, a 20 °C, representa el 2,45 MJ/kg. Es decir, 2,45 MJ son requisitos para vaporizar 1 kg o 0,001 m³ de agua.

Entonces, para vaporizar 0.001 m o 1mm de agua se requiere un aporte de energía de 2,45 MJ por m², y 1 mm de agua es equivalente a 2,45 MJ/m². La ET se describe en unidades del MJ/m²/día se representa por λ ET, el flujo del calor latente (Allen et al., 2006).

1.2.6. Coeficiente de cultivo

El coeficiente del cultivo (K_c) compone los efectos de las características que diferencian a un cultivo común de campo del pasto de referencia, el cual tiene un aspecto invariable y cubre en su totalidad el área del suelo. Por lo tanto, diferentes cultivos poseerán distintos valores de K_c . Por otra parte, las características de la planta que cambian durante el desarrollo del mismo también influyen en el valor del coeficiente K_c (Figura 1.6). Por último, debido a que la evaporación es un elemento de la evapotranspiración real, los factores que influyen en la evaporación del suelo también afectarán al valor de coeficiente de cultivo (Allen et al., 2006).

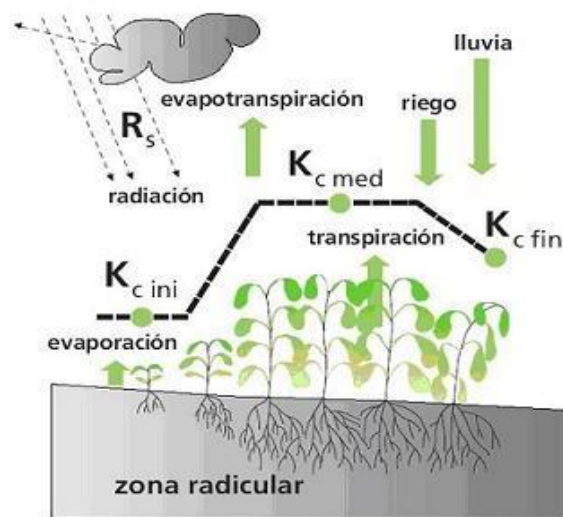


Figura 1.6. Curva del K_c en función del desarrollo del cultivo

Fuente: Allen et al. (2006)

Este coeficiente toma en cuenta los efectos que producen las características de la planta sobre sus necesidades de agua. Los valores de K_c incrementan a medida que lo hace el área foliar y la cobertura del suelo por parte de las plantas, obteniendo los valores más altos cuando la cobertura este en el rango de 60 a 80 %. A medida que la planta avanza en su ciclo fisiológico y comienza la desaparición foliar, los valores de K_c disminuyen llegando a sus valores más reducidos cuando apenas quedan pocas hojas verdes (Del Carmen, 2001).

1.2.7. Determinación de la evapotranspiración

La evapotranspiración no es fácil de calcular. Para obtenerla experimentalmente se necesitan aparatos específicos y mediciones exactas de muchos parámetros físicos o el balance del agua de la tierra en lisímetros. Los métodos de experimento en campo,

comúnmente son costosos, requiriendo precisión en las mediciones, y pueden ser en su totalidad realizados y analizados adecuadamente sólo por personas de investigación capacitados y preparados. A pesar de que estas prácticas no son adecuadas para mediciones cotidianas, siempre serán fundamentales para la evaluación al momento de estimar la evapotranspiración obtenidas con otros métodos indirectos (Allen et al., 2006).

1.2.8. Métodos para determinar la evapotranspiración

Muchas ecuaciones empíricas han sido elaboradas para estimar la evapotranspiración. Estas están en base a mediciones climatológicas (radiación solar, temperatura, velocidad del viento, etc.). Las ecuaciones más simples son las que están en base a mediciones de la temperatura, resaltando las ecuaciones de Thornthwaite (1948) y Blaney y Cliddle (1950). Existen diversas ecuaciones, igualmente empíricas, que requieren de la radiación solar como la fórmula de Priestly - Taylor (1972) y Jensen y Haise (1963), otros utilizan la radiación solar y la temperatura. Más exactas resultan aquellos métodos en base a la combinación del transporte convectivo del vapor de agua y el balance energético, así como la ecuación de Penman Monteith (Lavao, 2016).

La obtención directa o indirecta de la evapotranspiración por cualquiera de los métodos que existen es una práctica costosa y dificultosa. La precisión requerida en las mediciones y la complicación de los métodos restringen su utilidad en centros especializados o bajo supervisión de personas calificadas para ello. Sin embargo, son indispensables para poder evaluar los resultados de la evapotranspiración obtenidas por métodos directos e indirectos. En seguida, se describen efímeramente algunos de los métodos de estimación de la evapotranspiración.

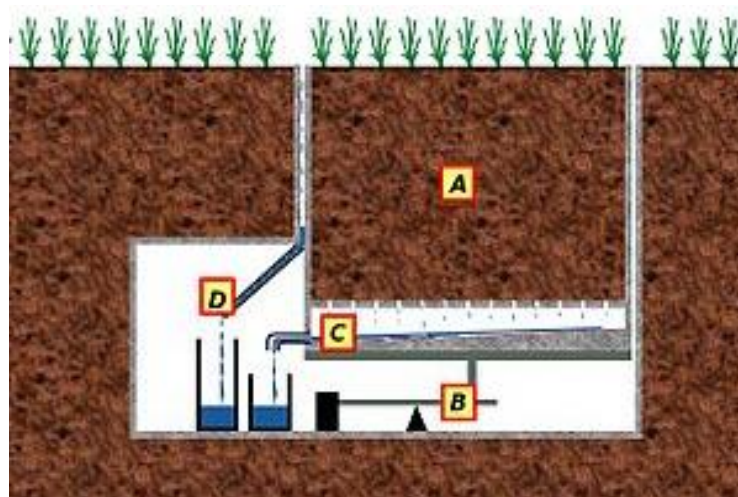
1.2.8.1. Métodos directos

a. Método del Lisímetro

Es la única herramienta usada en el cálculo de la evapotranspiración real. Está compuesta por un depósito enterrado, con abertura en la parte alta y donde se tiene al suelo que se va a estudiar. Sobre la muestra del suelo se deja caer la precipitación de la zona, que son medidas en un pluviómetro; el suelo que se encuentra en el lisímetro es drenado hacia la parte más honda, midiéndose la cantidad de agua (Mejía, 2015).

Los lisímetros son contenedores aislados cubiertos con suelo disturbado o no disturbado en los que las plantas crecen y se desarrollan (Figura 1.7). Para los lisímetros de pesaje de precisión, la evapotranspiración se puede lograr con una exactitud de centésimos de milímetro, donde la pérdida de agua se mide de manera directa por la renovación de masa y períodos cortos tales como una hora, que también pueden ser considerados. En lisímetros de drenaje, la evapotranspiración es obtenida por un tiempo dado, quitando la cantidad de agua de drenaje, captada en la parte onda de los lisímetros, de toda el agua que contiene.

Como los lisímetros son caros de construir y difíciles de manejar, también se debe considerar la operación y mantenimiento pues se requiere mucho cuidado, su empleo se limita generalmente a trabajos de investigación (Allen et al., 2006).



A: Terreno en estudio, B: Balanza, C: Recolección del agua de drenaje, D: Recolección del agua de escorrentía

Figura 1.7. Representación esquemática de un lisímetro de balanza

Fuente: Cita web 3

b. Método de balance de energía

Todos los flujos de energía deben ser tomados en cuenta cuando se fórmula una ecuación de balance de energía (Figura 1.8). La ecuación 1.2 es utilizada para un área de evaporación y se puede presentar como:

$$R_n - G - \lambda ET - H = 0 \quad \dots\dots\dots(\text{Ec. 1.2})$$

Dónde:

R_n: Radiación neta

H: Calor sensible

G: Flujo del calor del suelo

λET: Flujo del calor latente

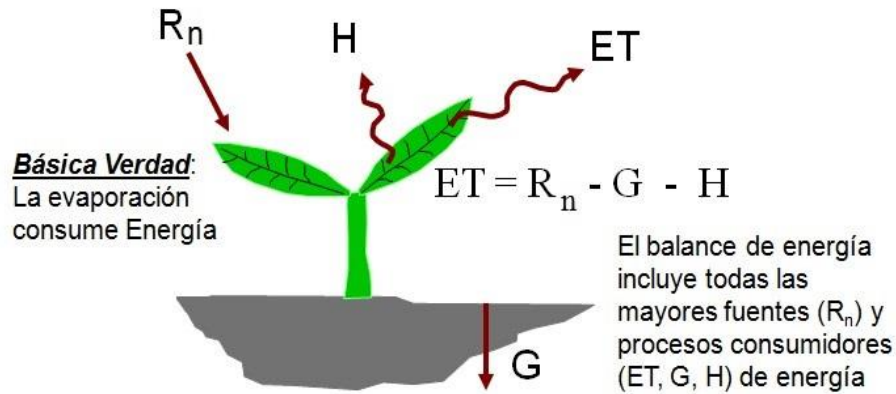


Figura 1.8. Componentes del balance de energía

Fuente: Waters et al., 2002

Cuando R_n es positiva, entrega energía a la superficie, y cuando G , ET y H son positivos quitan energía de la superficie (Figura 1.9).

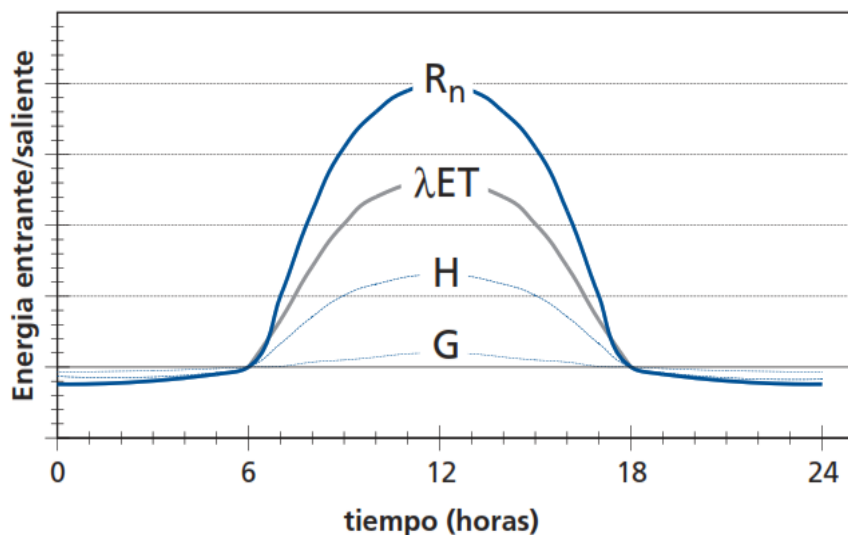


Figura 1.9. Variación diaria del balance de energía sobre una superficie transpirante con suficiente cantidad de agua en un día soleado

Fuente: Allen et al., 2006

En la ecuación 1.2, únicamente se toman en cuenta flujos verticales y se obvia la tasa neta de energía que se transmite horizontalmente por advección. Por lo tanto, la ecuación se usa solamente en superficies extensas y amplias de cobertura vegetal homogénea. La ecuación está limitada a cuatro elementos: R_n , λET , H y G . No se toman en cuenta otros tipos de energía, tal como la energía utilizada en actividades metabólicas, o el calor de almacenamiento liberado por la planta. Estos antes mencionados solo usan una reducida fracción de la radiación solar diaria y pueden ser tomados en cuenta de manera despreciable respecto a los otros cuatro componentes.

El flujo de calor latente (λET) muestra una parte de la ET que puede ser simplificada de la ecuación del balance de energía si se conociera los otros componentes. El flujo de calor del suelo (G) y La radiación neta (R_n) pueden ser estimados o medidos en función de factores climáticos. Por otro lado, el cálculo del calor sensible (H) es extensa y sus valores son difíciles de obtener. La obtención de H toma en cuenta mediciones precisas de los gradientes de temperatura sobre de la superficie (Allen et al., 2006).

c. Método del balance hídrico

Del Carmen (2001) afirma que este método posibilita la obtención de la evaporación en base a las ecuaciones de continuidad del flujo de agua. De acuerdo a Horton, la ecuación de balance hídrico se aprecia en la ecuación 1.3:

$$E = I - O - S \quad \dots\dots\dots(Ec. 1.3)$$

Dónde:

E: Evaporación (mm)

I: Flujo entrante o precipitación (mm)

O: Flujo saliente o escurrimiento total (mm)

S: Cambio del contenido de agua en el reservorio (mm)

Teóricamente, se puede aplicar el método de balance hídrico para determinar de evaporación de todo cuerpo de agua o reservorio, sin embargo, al momento de practicarlos son concetos difíciles de manejar. Mediante este método, la evaporación es obtenida como lo que queda y, por lo tanto, puede estar amarrada a considerables errores si esta se realiza para cantidades pequeñas, comparada con los demás términos (Del Carmen, 2001).

1.2.8.2. Métodos indirectos

Son formas de obtener de la evapotranspiración están basados en utilizar las ecuaciones empíricas que utilizan distintas variables meteorológicas (Tabla 1.3), inclusive la evaporación de una lámina libre de agua. Estas variables están registradas en las estaciones meteorológicas manuales o automáticas de donde se pueden solicitar. Dichas ecuaciones, por lo común, predicen la evapotranspiración de referencia. La precisión en estos cálculos depende primordialmente de la cantidad y calidad de las variables meteorológicas con que se dispone en cada caso.

Tabla 1.3. Variables meteorológicas requeridas para la estimación de la evapotranspiración

Método	Variables meteorológicas					
	Temperatura	Radiación solar	Velocidad del viento	Humedad relativa	Precipitación	Altitud
Thornthwaite (1948)	X					
Penman-Monteith (1949)	X	X	X			
Turc Anual (1954)	X				X	
Hargreaves (1956)	X		X	X		X
Turc (1961)	X	X		X		
Jensen-Haise (1963)	X	X				X
Christiansen (1966)	X	X	X	X		X
García-López (1970)	X			X		
Blaney-Criddl (1977)	X		X	X		

Fuente: (Marín, 2010)

a. Método del tanque evaporímetro Clase A

Con este método se puede calcular los efectos en conjunto de la temperatura, radiación, humedad, viento, etc. en función de la evapotranspiración de una área libre de agua; es decir, al igual que los cultivos son afectados por las mismas variables climáticas; pero es seguro que algunos factores pueden hacer cambios importantes en la pérdida de agua, por ejemplo: la reflexión de la radiación es mayor en las plantas que en el agua, el almacenamiento de calor durante el día es considerable y ocasiona una distribución muy parecida a la ETo durante el día y la noche, hay una transferencia de calor de los costados al tanque, etc.

A pesar de estos inconvenientes, si se asegura una buena instalación y mantenimiento, seguirá siendo válido el uso de este método en el cálculo de la ETo, especialmente si se utilizan los tanques de la Clase A (Olarte, 1987).

El tanque evaporímetro Clase A es de forma circular con 25 cm de profundidad y 120.7 cm de diámetro. Tiene una estructura de hierro galvanizado o de láminas de metal (0,8 mm). El tanque se instala sobre una superficie de madera en forma de reja que este 15 cm por encima del nivel del suelo. El tanque tiene que estar nivelado. Una vez colocado, el tanque se llena con agua hasta 5 cm por debajo del borde, y el nivel del agua no debe decrecer hasta más de 7,5 cm por debajo del borde. El agua debe ser constantemente cambiada, por lo menos semanalmente, para quitar la turbidez (Figura 1.10). Si el tanque es galvanizado, se debe pintar anualmente con pintura de aluminio. Las mallas sobre los tanques no son recomendables. Los tanques deben ser resguardados con mallas seguras para evitar que entren animales (Allen et al., 2006).

El lugar de instalación debe estar cubierto necesariamente con pasto, en un área de 20 x 20 m, despejado en todos los lados para asegurar la circulación del aire. Es recomendable que la estación se ubique en el centro o dentro de grandes campos cultivados; las lecturas del tanque se hacen diariamente temprano en la mañana a la misma hora que se mide la precipitación. Las mediciones se hacen en un área estable que está cerca del borde del tanque. El área estable es producto comúnmente de un cilindro de metal de cerca de 10 cm de diámetro y 20 cm de profundidad, con una reducida abertura en la base para permitir el flujo de agua (Allen et al., 2006).

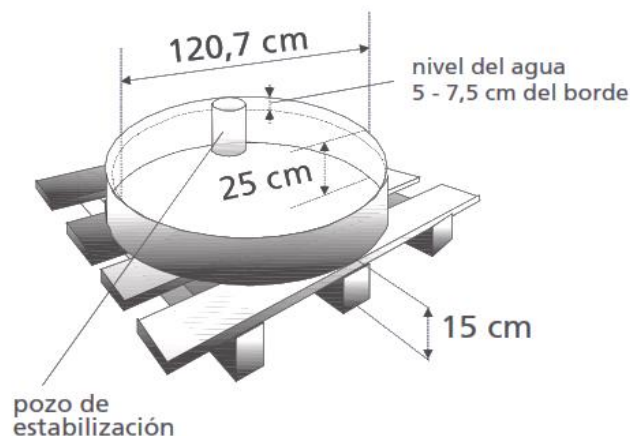


Figura 1.10. Tanque evaporímetro Clase A

Fuente: Allen et al. (2006)

Dentro del tanque se instala un micrómetro el cual permite la lectura del nivel del agua.

Para elegir el coeficiente adecuado (Anexo A, Tabla A.1) para un tanque evaporímetro dado, se debe tener en cuenta no solamente el tipo del tanque, sino también la cobertura del suelo donde se instala el tanque, los alrededores, también el viento y las condiciones generales de humedad. La ubicación y el ambiente del tanque evaporímetro también varían en los resultados. Lo último se presenta en casos en que el tanque evaporímetro no se encuentre en campos cultivados sino en suelos bajo barbechos. En condición de estas características se consideran dos casos comúnmente (Figura 1.11): Caso A en que el tanque evaporímetro se ubica en una zona de pasto corto verde y está rodeado por un suelo en barbecho; y el Caso B en que el tanque evaporímetro se ubica sobre un suelo en barbecho y está rodeado por un cultivo verde (Allen et al., 2006).

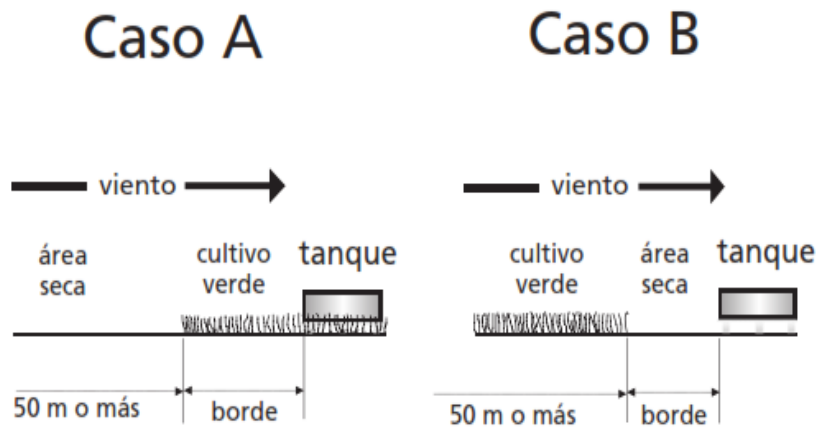


Figura 1.11. Dos casos de localización del tanque de evaporación y sus alrededores

Fuente: Allen et al (2006)

La Ecuación 1.4 es utilizada para calcular la evapotranspiración potencial mediante el método del tanque evaporímetro y se muestra a continuación:

$$ET_o = K_p * E_{pan} \dots\dots\dots(Ec.1.4)$$

Dónde:

ET_o: Evapotranspiración de referencia (mm/día)

K_p: Coeficiente del tanque evaporímetro (Anexo A, Tabla A1)

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

b. Método de Hargreaves

La fórmula de Hargreaves requiere una serie de datos climáticos como: la temperatura media mensual, radiación extraterrestre equivalente, radiación solar media y calculada, factor mensual de latitud, humedad relativa y la altitud.

Vásquez y Chang (1992) analizan dos casos para este método: en base a la radiación y la temperatura:

- **En base a la radiación**

Existen dos ecuaciones:

- En base a los datos registrados de radiación solar.

Las ecuaciones son las siguientes:

$$ETP = 0.004 \times TMF \times RS \quad \dots\dots\dots(Ec. 1.5)$$

$$TMF = \left(\frac{9}{5}\right) \times T_{media} (^{\circ}C) + 32 \quad \dots\dots\dots(Ec. 1.6)$$

Dónde:

ETP: Evapotranspiración potencial (mm/mes).

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

RS: Radiación solar media mensual medida ($cal/cm^2/día$).

- Olarte (1987) afirma que en base a datos de radiación solar equivalente ajustados las ecuaciones son:

$$ETP = 0.0075 \times RSM \times TMF \times FA \quad \dots\dots\dots(Ec. 1.7)$$

$$RSM = 0.075 \times RMM \times S^{1/2} \quad \dots\dots\dots(Ec. 1.8)$$

Dónde:

ETP: Evapotranspiración potencial (mm/mes)

RSM: Radiación solar equivalente en mm de evaporación mensual (mm/mes)

TMF: Temperatura media mensual medida ($^{\circ}F$)

$TMF = (9/5) \times T_{media} (^{\circ}C) + 32$

RMM: Radiación extraterrestre equivalente en mm de evaporación mensual (mm/mes)

FA: Factor de altura

A la vez:

$$RMM = Ra \times DM \quad \dots\dots\dots(\text{Ec. 1.9})$$

$$FA = 1 + 0.06ALT \quad \dots\dots\dots(\text{Ec. 1.10})$$

Dónde:

Ra: Radiación extraterrestre equivalente en mm de evaporación diaria (mm/día) (Anexo A, Tablas A.2 y A.3)

DM: Número de días del mes que se analiza

ALT: Altura en kilómetros

S: Porcentaje de horas de insolación

$$S = \frac{n}{N} \times 100 \quad \dots\dots\dots(\text{Ec. 1.11})$$

Dónde:

n: Horas de insolación fuerte promedio del lugar, medidas.

N: Horas de insolación fuerte, según mes y latitud del lugar (Anexo A, Tabla A.4).

• **En base a la temperatura**

La ecuación es la siguiente:

$$ET_o = MF * TMF * CH * CE \quad \dots\dots\dots(\text{Ec. 1.12})$$

Dónde:

ET_o: Evapotranspiración potencial (mm/ mes)

MF: Factor mensual de latitud (Anexo A, Tabla A.5)

TMF: Temperatura media mensual medida (°F)

CH: Factor de calibración para la humedad relativa

CE: Factor de calibración para la altura o elevación del lugar

$$CH = 0.166 (100 - HR)^{1/2} \quad \dots\dots\dots(\text{Ec. 1.13})$$

Dónde:

HR: Humedad relativa media mensual (%), medida

La ecuación anterior se emplea para valores de HR mayores de 64 % para HR menores a 64%; CH = 1.

$$CE = 1 + 0.04 \left(\frac{E}{2000} \right) \dots\dots\dots(\text{Ec. 1.14})$$

Dónde:

E: Altitud o elevación del lugar (m.s.n.m.)

c. Método de Penman Monteith (1977)

Esmeral (2011) afirma que este método mezcla el balance de energía con el método de transferencia de masas. La ecuación está compuesta básicamente en datos climáticos (temperatura, horas de sol, humedad y velocidad del viento), resistencia aerodinámica y resistencia superficial. Se expresa con la siguiente ecuación:

$$ET_o = \frac{1}{\lambda} \times \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a c_p \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a} \right)} \dots\dots\dots(\text{Ec. 1.15})$$

$$\gamma = \frac{C_p \text{ Presión atmosférica}}{0.622 \times \lambda} = 0.665 \times 10^{-3} \dots\dots\dots(\text{Ec. 1.16})$$

$$r_a = \frac{665}{1 + 0.54 \times u_2} \dots\dots\dots(\text{Ec. 1.17})$$

$$r_s = \frac{r_1}{IAF_{\text{activo}}} \dots\dots\dots(\text{Ec. 1.18})$$

Dónde:

r_a y r_s : Resistencia aerodinámica y resistencia superficial

r_1 : Resistencia estomática total de una hoja bien iluminada

IAF_{activo} : Índice activo de área foliar m^2/m^2 , sólo el 50 % del área superior del cultivo aporta activamente a la transferencia superficial de calor y vapor de agua, para pasto $IAF = 24 h$ (h: altura del pasto). Para un cultivo de altura 0,12 m, la resistencia superficial es 70 s/m (Allen et al., 2006).

d. Método de FAO Penman Monteith (1990)

Un grupo de investigadores y expertos en riego fue organizado por la FAO en mayo de 1990, en contribución con la Comisión Internacional para el Riego y Drenaje y con la OMM (Organización Meteorológica Mundial), con el objetivo de evaluar las metodologías previamente propuestas por la FAO para estimar de los requerimientos de agua de las plantas y para componer recomendaciones sobre la revisión y la actualización de procedimientos al respecto.

El grupo de expertos recomendó optar por el método combinado de FAO Penman Monteith como el método estándar para determinar la evapotranspiración de referencia y también aconsejaron acerca de los procedimientos para obtener varios parámetros que se requieren en la ecuación. El método FAO Penman Monteith fue elaborado mediante los conceptos del cultivo de referencia como un cultivo hipotético con una altura asumida de 0.12 m, con un albedo de 0.23 y con una resistencia superficial de 70 s/m, y que representa a la evapotranspiración de un área extensa de pasto verde de altura uniforme, creciendo constantemente y con riego adecuado (Allen et al., 2006).

Recientemente, la FAO 56 empleo la ecuación de Penman Monteith, para el cálculo de la evapotranspiración de referencia, descrito de la siguiente manera:

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \left(\frac{900}{T + 273} \right) u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \dots\dots\dots(Ec. 1.19)$$

Dónde:

ET_o: Evapotranspiración de referencia (mm/día)

R_n: Radiación neta en la superficie del cultivo (MJ/m²/°C)

R_a: Radiación extraterrestre (MJ/m²/°C)

G: Flujo del calor de suelo (MJ/m²/°C)

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

u₂: 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)

Δ: Pendiente de la curva de presión de vapor (kPa/°C), (Anexo A, Tabla A.7)

γ: Constante psicométrica (kPa /°C) (Anexo A, Tabla A.6)

e. Método de Turc (1961)

Este método permite obtener la evapotranspiración potencial en milímetros para cada mes con datos de temperatura, humedad relativa y la radiación solar. Propuesta por Turc en 1961, fue elaborada en zonas húmedas de Europa Occidental (Francia), pero fue adecuada para los lugares en los que la humedad relativa es inferior al 50 % (Gutiérrez, 2018).

La fórmula de Turc se muestra de la siguiente manera:

$$ET_o = 0.4 \times (R_s + 50) \times \left(\frac{T_{med}}{T_{med} + 15} \right) \dots\dots\dots(Ec. 1.20)$$

Dónde:

ET_o: Evapotranspiración de referencia (mm)

R_s: Radiación solar (MJ/m²/día)

T_{med}: Temperatura media (°C)

f. Método de Blaney - Criddle

Este método también se conoce como FAO - 24 Blaney - Criddle y tiene como base estudios efectuados en la zona del oeste de Estados Unidos y otros países, buscando la correlación entre el agua consumida por los cultivos, la temperatura y las horas de luz al día. El método inicialmente fue desarrollado en 1942 por Blaney y Morin, fue modificado por Blaney y Criddle en 1945, 1950 y 1962, y también fue reformulado por Doorenbos y Pruitt en 1977. Con este método se puede calcular la evapotranspiración potencial diaria en base a parámetros de humedad relativa, temperatura, velocidad del viento y brillo solar (Marín, 2010, cita a Doorenbos y Pruitt, 1977).

La ecuación es:

$$ETP = a + b(0.46T_a \times p + 8.31 \times p) \dots\dots\dots(Ec. 1.21)$$

Dónde:

p: Cociente entre las horas de sol diarias promedio para un mes dado y las horas totales en el año.

T_a: Temperatura media mensual del aire para un mes dado (°C)

a y b: Coeficientes de calibración en función de la velocidad del viento, humedad relativa, y la insolación real.

El método de Blaney y Criddle da buenos resultados en lugares con condiciones climáticas extremas, pues similarmente que el método de Thornthwaite, pueden ocasionar sobreestimaciones en climas húmedos y subestimaciones en climas áridos. Su aplicación se recomienda cuando sólo se cuenta con datos de temperatura y cuando los períodos evaluados son mayores a un mes (Marín, 2010, cita a Allen y Pruitt, 1986).

g. Método de Thornthwaite

La ecuación de Thornthwaite (1948) está basado en la determinación de la evapotranspiración a través de la temperatura media, con una calibración en función de la duración del número de días del mes y número máximo de horas sol. El método es muy utilizado en hidrología y en el cálculo de balance hídrico para climatología e hidrología de cuencas. También es usado en los índices y clasificaciones climáticas (Gutiérrez, 2018).

La ecuación es:

$$ET_o = ET_o' \times \left(\frac{N}{12} \times \frac{d}{30} \right) \dots\dots\dots(Ec. 1.22)$$

Dónde:

ET_o: Evapotranspiración potencial mensual corregida (mm/mes)

ET_o': Evapotranspiración potencial mensual sin corregir

N: Duración máxima diaria media de las horas de fuerte insolación (Anexo A, Tabla A.4)

d: Número de días del mes

$$ET_o' = 16 \times \left(\frac{10 \times t_i}{I} \right)^a \dots\dots\dots(Ec. 1.23)$$

Dónde:

t_i: Temperatura media mensual del aire para el mes i (°C)

I: Índice térmico anual

a: Exponente

$$i_n = \left(\frac{t_m}{5} \right)^{1.514} \dots\dots\dots(Ec. 1.24)$$

Dónde:

i_n: Índice térmico mensual

$$I = \sum_{n=1}^{n=12} i_n \dots\dots\dots(Ec. 1.25)$$

$$a = 0.6751 \times 10^{-6} \times I^3 - 0.771 \times 10^{-4} \times I^2 + 0.01792 \times I + 0.49239 \dots(Ec. 1.26)$$

h. Método de Stanghellini (1987)

Se basa en la ecuación de Penman Monteith (1977). Se elaboró para condiciones de invernaderos con velocidades del viento menores a 1 m/s, en un cultivo de tomate bien desarrollado (Esmeral, 2011, cita a Donatelli et al., 2006).

Esta ecuación se expresa de la siguiente manera:

$$ET_o = 2 \times IAF \times \frac{1}{\lambda} \times \frac{\Delta(R_n - G) + K_T \frac{DVP \times \rho \times c_p}{r_R}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)} \dots\dots\dots(Ec. 1.27)$$

El IAF se determinó mediante el despeje de la siguiente ecuación:

$$R_n = 0.86 \times (1 - e^{-0.7 \times IAF}) \dots\dots\dots(Ec. 1.28)$$

i. Método de Priestley - Taylor (1972)

Este método es semiempírico y es considerado como una simplificación del método Penman, en donde se quitan los términos aerodinámicos. Tomando un conjunto de datos confiables a partir de variadas superficies adecuadamente regadas (Gutiérrez , 2018).

La ecuación es:

$$ET_o = \frac{1.26}{\lambda} \times \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma}\right) \times (R_n - G) \dots\dots\dots(Ec. 1.29)$$

j. Método de Anton (2003)

Este método es una variación de la ecuación de Penman-Monteith, que depende de la radiación solar que se produce en el invernadero, el déficit de presión de vapor (DPV) y el índice de área foliar (IAF), la cual fue propuesta por Anton (Esmeral, 2011).

La ecuación es la siguiente:

$$ET_o = 0.5(1 - e^{-0.64 \times IAF}) \times R_s \times K_w + 8.6 \times IAF \times DPV \times K_w \dots\dots\dots(Ec. 1.30)$$

k. Método de Hargreaves - Samani (1985)

Esta ecuación tiene que ver con parámetros de la radiación solar y temperatura media del aire (Esmeral, 2011).

La ecuación es:

$$ET_o = 0.0135 \times R_s (T_{med} + 17.8) \dots\dots\dots(Ec. 1.31)$$

Dónde:

ET_o: Evapotranspiración de referencia (mm/día)

R_s: Radiación solar (MJ/m²/día)

T_{med}: Temperatura media (°C)

La radiación solar neta se define en esta ecuación como:

$$R_s = K_{rs} \times R_a \times (T_{max} + T_{min})^{0.5} \dots\dots\dots(Ec. 1.32)$$

Donde K_{rs}: 0.16 °C⁻¹ para zonas interiores y 0.1 °C⁻¹ para zonas costeras.

l. Método de Blaney - Morin (1950)

Se define en términos de la humedad relativa, temperatura media del aire y el porcentaje de horas máximas de sol:

$$ET_o = \frac{T_{med} \times p}{100} (114 - HR_{med}) \dots\dots\dots(Ec. 1.33)$$

m. Método de Jensen - Haise (1963)

Esta ecuación está en términos de la temperatura media y la radiación solar. Se presenta en la siguiente ecuación:

$$ET_o = (0.014 \times T_{med} - 0.37) \times R_s \dots\dots\dots(Ec. 1.34)$$

n. Método de Makkink (1957)

El método Makkink se presenta como una forma reducida del método Priestley - Taylor, que también necesita de la temperatura y la radiación para estimar la evapotranspiración potencial. La modificación es que en lugar de la radiación neta R_n con la temperatura, el método de Makkink usa la radiación de onda corta incidente R_s con la temperatura. Esto es posible porque existe una correlación entre la radiación de onda corta (R_s ≅ 2 R_n) y la radiación neta (R_n). La ecuación de Makkink ha dado resultados esperados en climas fríos y húmedos, pero no se ha encontrado satisfactorio en lugares con características áridas (Gutiérrez, 2018).

La ecuación es la que sigue:

$$ET_o = \alpha \times R_s \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) + \beta \quad \dots\dots\dots(\text{Ec. 1.35})$$

Dónde:

ET_o: Evapotranspiración de referencia (mm/día)

Δ: Pendiente de la curva de presión de vapor (kPa/°C)

γ: Constante psicométrica (kPa/°C)

R_s: Radiación solar de onda corta (mm/día)

Normalmente α toma el valor de 0.61 y β el de -0.12.

o. Método de García y López (1970)

Lavao (2016) afirma que el método de García Benavidez y López Díaz (1970) para el cálculo de la evapotranspiración está en término de la temperatura y la Humedad Relativa. La ecuación es la que sigue:

$$ET_o = [1.21 \times 10^n \times (1 - 0.01HR)] + 0.21T - 2.3 \quad \dots\dots\dots(\text{Ec. 1.36})$$

$$n = \frac{7.45T}{234.7 + T} \quad \dots\dots\dots(\text{Ec. 1.37})$$

Dónde:

ET_o: Evapotranspiración de referencia (mm/día)

HR: Humedad relativa (%)

T: Temperatura media (°C)

n: Constante dependiente de la temperatura.

Tabla 1.4. Parámetros requeridos por las ecuaciones de la evapotranspiración potencial

Autor	T	H	V	S	R	E	I	
Penman - Monteith (1977)	o	o	o	o	o			$ETO = \frac{1}{\lambda} \times \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a c_p \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)}$
Stanghellin (1987)	o				o	o		$ETO = 2 \times IAF \times \frac{1}{\lambda} \times \frac{\Delta(R_n - G) + K_T \frac{DVP \times \rho \times c_p}{r_R}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)}$
Priestley - Taylor (1972)	o				o			$ETO = \frac{1}{\lambda} \times \Delta \times \frac{R_n - G}{\Delta + \gamma} \times \alpha' \times K_w$
Anton (2003)	o				o	o		$ETO = 0.5(1 - e^{-0.64 \times IAF}) \times R_s \times K_w + 8.6 \times IAF \times DPV \times K_w$
Hargreaves - Samani (1985)	o				o			$ETO = 0.0135 \times R_s (T_{med} + 17.8)$
Blaney - Morin (1950)	o	o						$ETO = \frac{T_{med} \times p}{100} (114 - HR_{med})$
Jensen - Haise (1963)	o				o			$ETO = (0.014 \times T_{med} - 0.37) \times R_s$
Makkink (1957)	o				o			$ETO = 0.61 \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma}\right) R_s - 0.12$
Thornthwaite (1948)	o							$ETO' = 16 \times \left(\frac{10 \times t_i}{I}\right)^a$
Turc (1961)	o				o			$ETO = 0.4 \times (R_s + 50) \times \left(\frac{T_{med}}{T_{med} + 15}\right)$

T: Temperatura, H: Humedad Relativa, V: Velocidad del Viento, S: Horas sol, R: Radiación solar global, E: Evaporación, I: Índice de Área foliar

Fuente: (Lavao, 2016)

1.2.9. Identificación y selección de métodos para determinar la evapotranspiración

El factor primordial que se debe considerar al momento de elegir los métodos tiene mucho que ver con la zona de estudio, por ejemplo, nuestro país Perú contiene tres regiones geográficas: costa, sierra y selva. Cada región presenta un comportamiento diferente al otro al momento de calcular la evapotranspiración, ya sea por las diferencias de clima, latitud, relieve, suelo, planta e incluso también se debe considerar la influencia marítima y la cordillera de los Andes (en la costa). También se debe tomar en cuenta los

datos meteorológicos que se pueden obtener de las estaciones en cada lugar, pues de ello depende resolver los datos que se necesitan en cada ecuación empírica a seleccionar.

En Ecuador, su clima diversificado tiene mucha influencia en al momento de calcular la evapotranspiración tanto para la costa y la región andina. La costa del Pacífico presenta una estación lluviosa entre diciembre y mayo, y otra seca desde junio a noviembre, con temperaturas medias diarias alrededor de los 36 y 23 °C, respectivamente. En los Andes, el clima es lluvioso y frío de noviembre a abril, y seco en mayo a octubre, con temperaturas medias diarias entre los 13 y 18 °C, respectivamente. Esta gran diferencia de climas y topografía favorecen al crecimiento de múltiples sistemas productivos, donde el riego importa mucho dado el déficit hídrico que va desde los 1200 a los 400 mm anuales, desde el oeste en la costa del Pacífico hacia el este del interior del país (Vega y Jara, 2009, citan a Gobierno de la Provincia de Manabí, 2004).

Se debe tener mucho cuidado al utilizar métodos de radiación solar de una estación meteorológica cercana a zonas montañosas y costeras donde las variaciones son la exposición y la altitud, que podrían ser indispensables, y también en lugares en que existe mucho cambio en la precipitación por motivos de factores convectivos. Más aún, en estaciones cercanas que se encuentren ubicadas al opuesto de montañas que podrían no ser transferibles ya que las condiciones que definen la radiación son distintos. Se deben analizar las condiciones climáticas en ambas zonas y recopilar información local referente a modificaciones generales sobre la cobertura y tipos de nubes (Allen et al., 2006).

1.2.10. Precipitación

La precipitación presenta la lluvia, la nieve y los demás procesos con los cuales el agua desciende a la superficie terrestre, tales como granizo y nevisca. Para formar la precipitación que necesita de la elevación de una masa de agua en la atmósfera (Figura 1.12) de tal manera que se enfríe y parte de su humedad se condense (Chow et al., 2000).

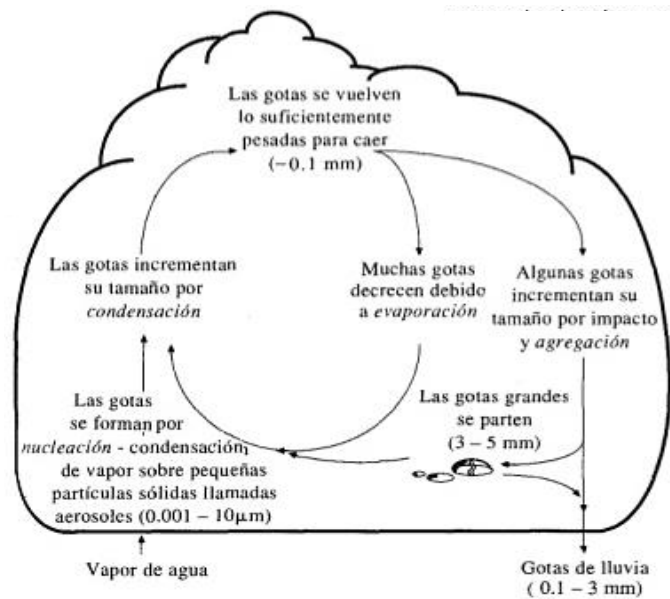


Figura 1.12. Formación de la precipitación en las nubes

Fuente: (Chow et al., 2000)

La precipitación se produce por la caída directa de gotas de agua (lluvia) o de cristales de hielo que se derriten, las gotas son grandes cuanto más elevada está la nube que las origina y más elevada es la humedad del aire, ya que se condensa sobre ellas el vapor de las capas que van atravesando. Durante este procedimiento, muchas gotas llegan a unirse, proceso que también es notorio en los cristales de hielo (Alejo, 2015).

1.2.10.1. Medición de la precipitación

La cantidad de precipitación se define por el espesor de la capa de agua que se forma sobre la superficie en su totalidad horizontal e impermeable, suponiendo que sobre dicha capa no se manifiesta ninguna evaporación. La mencionada altura se expresa en milímetros. Para el caso de nieve y granizo, se define por la altura de capa de agua que formara encima de la superficie una vez fundida.

El pluviómetro, es el instrumento que se utiliza en los centros de investigación meteorológica para recoger y medición de la lluvia producida. La unidad con que se mide la precipitación es el milímetro de precipitación que es igual a una lámina de 1 m² de superficie y 1 mm de espesor. En volumen es lo mismo a 1 litro de agua por metro cuadrado (Alejo, 2015, cita a Sarochar, 2005).

1.2.11. Balance hídrico

Según Martelo (1995), con este método se consigue calcular el valor de la evapotranspiración, es decir, la cantidad real de agua que pierde la planta, asumiendo que es producido por el impacto de la variación de la precipitación en la oferta (stock de agua en el suelo) y sobre la evapotranspiración de referencia; es decir, el agua que hubiera podido perder la planta en condiciones óptimas de humedad.

Es importante resaltar que en esta forma de calcular el balance hídrico se consideran, como base, un conjunto de simplificaciones:

- No se consideran movimientos laterales ni verticales de agua.
- La única entrada es la precipitación.

Martelo (1995) afirma que, dependiendo de los valores de precipitación y evapotranspiración, pueden darse dos situaciones:

- $P_p \geq E_{To}$: en este caso hay suficiente agua, la diferencia entre precipitación y evapotranspiración ($P_p - E_{To}$) va a almacenarse en el suelo. Esto puede suceder solo hasta el instante en que el contenido de humedad en el suelo llegue a su valor más alto en función del agua que pueden extraer las raíces (capacidad de almacenamiento). Llegado ese momento, la diferencia $P_p - E_{To}$ se anota como un exceso.
- $P_p \leq E_{To}$: en este caso la diferencia $P_p - E_{To}$ se anota como un déficit. En este momento, la planta sólo puede utilizar lo que entró como precipitación más la cantidad que pueda extraer del suelo, que había quedado almacenada anteriormente.

1.3. SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

Un Sistema de Información Geográfica (SIG) está elaborado para utilizar datos referenciados a través de coordenadas geográficas o espaciales. Por lo tanto, un SIG es tanto un sistema de base de datos con capacidades particulares para datos georreferenciados, como un grupo de procedimientos para utilizar esos datos. En cierto modo, un SIG es un mapa de orden superior. De igual manera que los textos han migrado del papel a las computadoras (antes leíamos libros en papel, ahora podemos leer libros digitales, páginas web, etc.), los mapas también han dado ese cambio peculiar con el nacimiento de los SIG (Olaya, 2014).

La necesidad de guardar, alterar, analizar y actualizar espacial y temporalmente la información geográfica (mapas) generó la necesidad de diseñar Sistemas de Información Geográfica con la capacidad de cumplir con los múltiples requerimientos, de tal manera que el usuario pueda pasar de una cartografía en papel a una cartografía automatizada que cumpla múltiples necesidades. Un sistema de información geográfica (también conocido con los acrónimos GIS en inglés o SIG en español) es un grupo de herramientas que conforma y relaciona múltiples componentes, usuarios, software, hardware, procesos que admiten la organización, manipulación, almacenamiento, análisis y modelización de múltiples datos recopilados del mundo real que están vinculados a una referencia espacial, facilitando la integración de aspectos sociales - culturales, ambientales y económicos que conllevan a la toma de decisiones de una manera más eficiente (Alejo, 2015, cita a CIAF, 2013).

1.3.1. Componentes del Sistema de Información Geográfica

Olaya (2014) afirma que son cinco los elementos primordiales que se conocen tradicionalmente en este campo (Figura 1.13):

- **Datos.** Los datos son la materia prima necesaria para la elaboración en un Sistema de Información Geográfico (SIG), y los que contienen la información geográfica primordial para el propio origen de los SIG.
- **Métodos.** Un conjunto de metodologías y fórmulaciones a aplicar sobre los datos.
- **Software.** Es fundamental una aplicación informática que pueda trabajar con los datos e implemente los métodos anteriores.
- **Hardware.** El equipo necesario para ejecutar el software.
- **Personas.** Las personas son las encargadas de utilizar y diseñar el software, siendo el motor del Sistema de Información Geográfica.

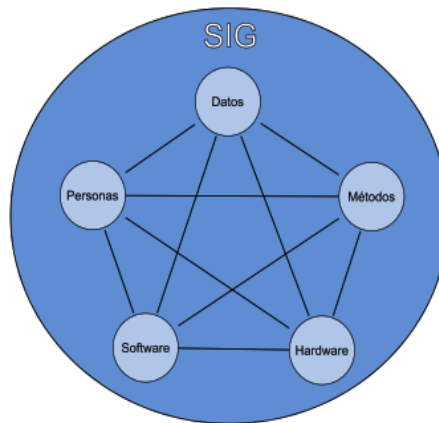


Figura 1.13. Elementos que forman el Sistema de Información Geográfica

Fuente: (Olaya, 2014)

Dado que la gran disponibilidad de imágenes ortorectificadas (tanto aéreas y satelitales), la digitalización por este medio se está transformando en la fundamental fuente de obtención de información geográfica. Esta forma de digitalización contiene la búsqueda de datos geográficos de manera directa en las imágenes aéreas en lugar del método convencional de la localización de formas geográficas sobre un tablero de digitalización (Alejo, 2015, cita a CIAF, 2013).

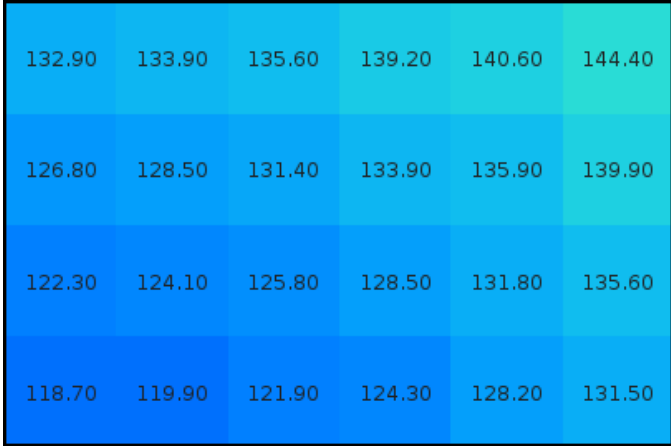
1.3.2. Modelo ráster

Un ráster es un archivo que se emplea en los SIG que contiene un área espacial dividida en píxeles o celdas. Cada píxel está contiene un valor denominado atributo. Los datos que contiene esta plataforma pueden ser empleados en mapeo y modelaje espacial en múltiples Sistemas de Información Geográfica (SIG) o en otros softwares relacionados (Hijmans et al., 2005).

La información en formato ráster tiene la peculiaridad de representar el área de trabajo a través de matrices compuestas por pequeñas celdas denominadas píxeles donde cada una de ellas tiene un valor que será representativo en cada una de las celdas, este formato cubre todo del espacio lo que representa una gran ventaja, ya que pueden obtenerse valores en cualquier punto a tiempo real (Pineda, 2012).

En el modelo ráster, el área de estudio se divide de manera sistemática en un conjunto de unidades mínimas (denominadas comúnmente celdas), y para cada una de estas se obtiene la información pertinente asignada. Un dato aumenta en una porción la malla

ráster de elevaciones (Figura 1.14), de modo que los límites de las celdas se hacen evidentes y puede, además, asignarse en cada una de ellas un valor (Olaya, 2014).



132.90	133.90	135.60	139.20	140.60	144.40
126.80	128.50	131.40	133.90	135.90	139.90
122.30	124.10	125.80	128.50	131.80	135.60
118.70	119.90	121.90	124.30	128.20	131.50

Figura 1.14. Celdas de una malla ráster con sus valores asociados

Fuente: (Olaya, 2014)

1.3.3. Formato TIFF

En los softwares de geoprocesamiento, el intercambio de información está asegurado por múltiples formatos, muchos de los cuales no tienen de posibilidad de ofrecer la componente geográfica (p.e. BMP, GIF, TIFF, etc.). El formato TIFF tiene definidas ventajas por lo que ha sido empleado por la industria para la elaboración de un formato de intercambio de información georreferenciada. Con un sólido y versátil modelo geodésico para la georreferenciación, el formato TIFF tiene algunos aspectos que aun carecen de buena elaboración como los relativos a la metainformación y la gestión de la componente vertical.

El formato TIFF es específico para ficheros de imagen que posibilita, entre otros, la definición de un espacio ráster, la organización de subimágenes y de páginas, así como la compresión de los datos, el tiling, la gestión de colores y atributos. Por otra parte, los ficheros TIFF permiten adaptar diversas imágenes dentro de un mismo fichero, éstas pueden ser generalizaciones o visiones sinópticas, múltiples bandas espectrales, etc. (Ariza et al., 1999).

1.3.4. Teledetección

La Teledetección o Percepción Remota (Remote Sensing) también se define como la ciencia y arte de conglomerar información de un objeto analizando los datos obtenidos

mediante algún dispositivo que no está en contacto físico con dicho objeto. Esto se puede gracias a la relación sensor - cobertura, el cual, en el caso de los barredores multiespectrales, se manifiesta a través de la llamada radiación electromagnética (Figura 1.15). Esta relación se puede manifestarse en tres formas: emisión, reflexión y emisión – reflexión. El flujo de energía que se genera por cualquiera de estas formas va a estar en función de la transmisión de energía térmica (Martínez & Díaz, 2005).

La percepción remota trata en la obtención de información acerca de un objeto a través de datos recopilados con un instrumento que no tiene contacto directo con él (León, 2002).

La percepción remota consta de un camino adicional a los métodos convencionales, más que una opción, conteniendo, sin embargo, la ventaja resaltante de proporcionar información espacialmente sucesiva y a intervalos regulares (Sánchez, 2002).

La utilidad de técnicas de teledetección para observar la Tierra puede compensar en muchos casos la carencia de información meteorológica en puntos de la superficie terrestre en los que sería dificultoso aplicar las metodologías convencionales (Sánchez et al., 2004).



Figura 1.15. Esquema operativo de un satélite de observación

Fuente: (Martínez & Díaz, 2005)

Chuvienco (1990) afirma que la teledetección es la técnica que nos permite obtener imágenes de la tierra a partir de sensores posicionados en plataformas aéreas o espaciales. En definitiva, un sistema de teledetección espacial, contiene los siguientes elementos (Figura 1.16):

- Fuente de energía, que imagina el comienzo del flujo energético localizado por el sensor. Puede relacionarse con un foco externo al sensor, en cuyo caso se habla de teledetección pasiva, o de un haz energético producido por este (teledetección activa). La fuente de energía de mayor relevancia, sin duda es la energía solar.
- Cubierta terrestre, conformada por diferentes masas de suelos, agua, vegetación o construcciones humanas, que admiten la señal energética proveniente de la fuente de energía, y la reflejan o difunden de acuerdo a sus características físicas.
- Sistema sensor, conformado por el sensor propiamente dicho, y la plataforma que lo define. Tiene como misión obtener la energía proveniente de la cubierta terrestre, codificarla y grabarla o mandarla de manera directa al sistema de recepción.
- Sistema de recepción-comercialización, donde se acepta la información difundida por la plataforma, se graba en un formato correcto y, tras las adecuadas correcciones, se difunde a los intérpretes.
- Interprete, que examina esa información, comúnmente en forma de imágenes analógicas o digitales, transformándolas en una clave temática o cuantitativa, orientada a simplificar la evaluación del problema a tratar.
- Usuario final, encargado de examinar el documento resultado de la interpretación, así como determinar sobre las consecuencias que de él se emanan.

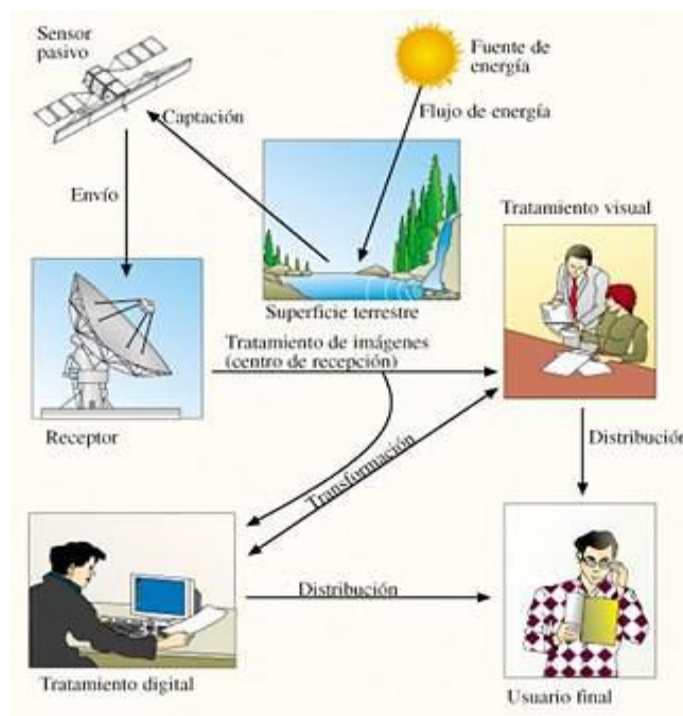


Figura 1.16. Componentes del sistema de teledetección

Fuente: (Chuvieco, 1990)

La teledetección se contempla como una fuente de datos geofísicos que proporcionan los SIG. Los SIG pueden visualizar y procesar imágenes de satélite y fotografías aéreas, con el objetivo de conseguir nueva información y, por lo tanto, ejecutar tareas de fotointerpretación. De esta manera, empleamos los datos primarios para llevar a cabo el trabajo que queremos efectuar en un SIG (Rodríguez & Olivella, 2009).

1.3.4.1. Aplicaciones de la teledetección

Gibbons (1984) afirma que en la teledetección resaltan los siguientes espacios de aplicación:

- Inventario regional del medio ambiente para preparar estudios de impactos ambientales.
- Cartografía de nuevos depósitos volcánicos.
- Cartografía geológica para la exploración mineral y petrolífera.
- Control del movimiento de icebergs en zonas polares.
- Control de la acumulación nival, de la fusión y de los cambios previsibles en la disponibilidad de energía hidroeléctrica.
- Estimación de modelos de escorrentía y erosión.
- Análisis en tiempo real de masas nubosas de escala mediana y pequeña.
- Cartografía térmica de la superficie del mar.
- Inventario de agua superficial.
- Verificación y control de la calidad física del agua, turbidez y contenido de algas.
- Cartografía de la cobertura vegetal del suelo.
- Contribución a la cartografía e inventario de la cobertura y uso del suelo.
- Rápida evaluación de condiciones de estrés en la vegetación, por efectos de la sequía o deforestación.
- Selección de rutas óptimas para nuevas vías de comunicación.
- Cartografías e inventario de cultivos por especies.
- Predicción del rendimiento de cultivos.

1.3.4.2. Plataforma de observación y sensores

En un sistema de teledetección, consta de dos elementos tecnológicos fundamentales que lo resuelven: la plataforma y el sensor. La plataforma es el medio en el que se sitúa el sensor y desde el cual se realiza la observación. El sensor, por su parte, es el

elemento que incorpora la capacidad de la radiación electromagnética y registra su intensidad dentro de la zona concreta del espectro. En palabras más corrientes, es el aparato que nos facilita tomar la imagen, y puede ser desde una simple cámara fotográfica hasta un sensor más complejo capaz de obtener cientos de bandas en una región del espectro de gran amplitud. Los dos tipos fundamentales de plataformas son aquellas situadas dentro de la atmósfera terrestre (aviones en su mayoría, aunque también en otros medios tales como globos aerostáticos) y las instaladas al exterior de la atmósfera (a bordo de satélites). Las características de estos dos elementos denotan las del sistema en su conjunto, así como las propiedades de sus productos derivados y la utilidad que estos presentan (Olaya, 2014).

a. Plataformas

La plataforma es el medio en el que se desplaza el sensor, y determina las mediciones realizadas por este, ya que instaura la distancia a la que el sensor se sitúa del componente registrado (la superficie terrestre). Esta distancia puede ser del tamaño de centenas de metros o unos escasos kilómetros, o bien de bastantes kilómetros. En el primer caso, las plataformas más comunes son los aviones, mientras que en el segundo caso lo más frecuente son los satélites (Olaya, 2014).

Las plataformas más comunes en teledetección son satélites artificiales (plataformas espaciales) y aeronaves (plataformas aéreas); en los segundos podemos distinguir entre aeronaves tripuladas y no tripuladas. El uso de otras plataformas como torres de observación, globos aerostáticos, helicópteros o tipo sonda, etc.; es marginal (aunque no excluible) (Miguel, 2018).

b. Sensores

El sensor tiene como función registrar la radiación electromagnética procedente de la zona estudiada y la imagen.

Existen múltiples formas de clasificar los sensores. Una división nuclear es la que distingue sensores activos y pasivos. Como ya sabemos, la radiación que obtiene el sensor es el producto de una fuente de radiación electromagnética, cuyas emisiones interactúan con el medio exterior, que refleja una parte de las radiaciones que obtiene (Olaya, 2014).

El ojo humano es el sensor natural con el que captamos la información de la superficie terrestre. Sin embargo, este se encuentra restringido a la región espectral del visible. Por el contrario, los sensores que viajan a bordo de los satélites artificiales suelen ser multiespectrales y también hiperespectrales. Esto significa que tienen la capacidad de registrar el comportamiento de los objetos de la superficie de la tierra en diversas longitudes de onda o bandas del espectro electromagnético, desde la región visible hasta las distintas bandas del infrarrojo (próximo, medio y térmico) y de las microondas (Martínez & Martín, 2010).

1.3.5. Imágenes satelitales

Una imagen satelital es un conjunto digital de puntos (similar a una fotografía digital) obtenida por un sensor instalado a bordo de un satélite que órbita alrededor de la Tierra (Figura 1.17). A medida que el satélite se desplaza en su órbita, "barre" la superficie con un grupo de detectores que registran la energía reflejada (Martínez & Díaz, 2005).

Una imagen es cualquier representación gráfica, sin tomar en cuenta cualquier método de percepción remota se empleen para captar y registrar la energía electromagnética. La energía electromagnética puede ser obtenida de forma fotográfica o electrónica. Las fotografías son el producto de reacciones químicas realizadas en la superficie de una película sensible a la luz para captar y registrar las modificaciones de energía. Por esto, se dice que una fotografía conforma un tipo específico de imagen que ha sido capturada y plasmada en una película fotográfica (León, 2002).

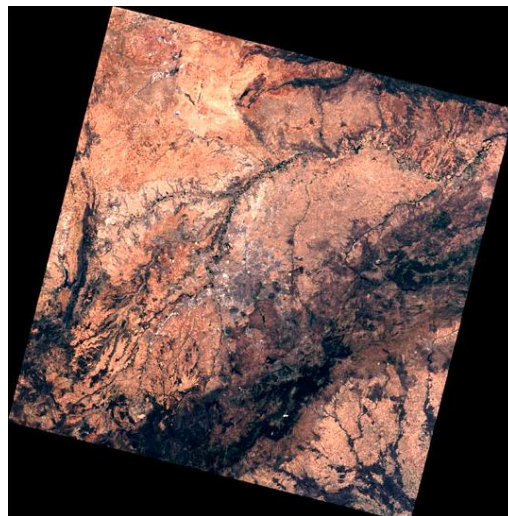


Figura 1.17. Imagen satelital Landsat 8

Fuente: Cita web 4

1.3.5.1. Ventajas y desventajas de las imágenes satelitales

León (2002) afirma que entre las ventajas de las imágenes satelitales resalta:

- Rapidez, tanto en la frecuencia de la obtención de nueva información, como en la adquisición de la misma por el usuario (que hoy puede hacerse en tiempo real a través del internet).
- Bajo costo, sobre todo al momento de analizar áreas de muy extensas, ya que, por lo común, las imágenes satelitales son más económicas que la captura de fotografías aéreas o levantamientos topográficos grandes en el campo.
- Accesibilidad a lugares remotos, ya que desde el espacio no existen limitaciones, y se puede observar cada espacio de la superficie terrestre.
- Se pueden combinar con otras capas de sistemas de información geográfica (SIG). Esto es de gran ayuda a la interpretación de las mismas, como también las imágenes pueden contribuir a crear y actualizar capas de los SIG.
- Se pueden realizar características específicas. Gracias a la codificación digital de la imagen en distintas bandas espectrales, se puede realizarse múltiples operaciones matemáticas o algoritmos que resalten las características más importantes.
- Repetición en el tiempo. Es decir, cada satélite regresa por la misma área cada cierto tiempo, dejando hacer estudios comparativos a lo largo del tiempo.
- No se limitan a captar la luz visible. Como dijimos anticipadamente, la posibilidad de ver energía no visible al ojo humano es mucho beneficio para el estudio de múltiples objetos o fenómenos.

Así mismo, León (2002) destaca que las desventajas de las imágenes satelitales son:

- En muchos casos, sobre todo si tiene que ver con un área no conocida por el observador, es necesario corregir la imagen (deberá ser verificada en el terreno).
- Es preciso que se efectúe en la imagen una calibración geométrica, para que se ajuste a la topografía y la forma de la tierra, y se georreferencie, es decir, que se le atribuyan coordenadas reales a la imagen.
- A veces se confunden fenómenos diferentes en la imagen que tengan similares características espectrales (por ejemplo, arena blanca con un techo blanco).
- A veces, puede haber confusiones ocasionadas por fenómenos que no se querían muestrear (como las nubes, sombra).

- Comúnmente no son adecuados para mapas detallados (a gran escala). Sin embargo, esto está mejorando debido a la menoración de resolución espacial de los sensores de satélite más recientes.

1.3.6. Datos climáticos geospaciales

La necesidad de tener datos climáticos históricos geoespacialmente procesados, para la agricultura, especialmente para los estudios a nivel regional. Los modelos de simulación en agricultura por lo general demandan grandes cantidades de datos climáticos, incorporando: precipitación, temperatura máxima, temperatura mínima y radiación solar. Esta información puede ser adquirida por una variedad de fuentes, que tienen sus propias ventajas y desventajas. Algunas fuentes con libre acceso y disponibles incluyendo datos de estaciones meteorológicas hasta datos satelitales. Dependiendo de la ejecución el usuario debe seleccionar el conjunto de datos que necesita (Alejo, 2015, cita a Johnston y Matlock, 2011).

Del mismo modo, se define algunos geoservidores revisados y relacionados al presente trabajo:

- Nasa Giovanni: es la interface web de la Nasa que provee información de muchos satélites para todos los lugares del mundo. Los datos ya están procesados y pueden ser descargados a escalas requeridas. Este geoservidor ofrece los principales datos disponibles y las herramientas para el análisis y la descarga de datos del servidor Nasa Giovanni. Dentro de esta plataforma se puede obtener datos de temperatura, velocidad del viento, humedad, evapotranspiración, precipitación, radiación y otros a resoluciones: 0.1°, 0.125°, 0.5° por 0.667°, 1°, 0.5 por 0.625°, 0.05°. Datos como la evapotranspiración no se encuentran disponibles para Perú.
- Climate Engine utiliza Earth Engine de Google para el procesamiento a pedido de datos climáticos y satelitales por medio de un navegador web. Se manifiesta mediante un visor con el que se puede seleccionar el área de interés y empezar con la descarga., nos permite descargar las series temporales y sus resúmenes estadísticos en formato NetCDF (convertible a GeoTIFF). Dentro de esta plataforma nos permite descargar variables como temperatura, velocidad del viento, humedad, Evapotranspiración (alfalfa y hierba), radiación y otros; la temperatura y

la radiación se encuentran a una resolución mínima de 50 km (0.5° por 0.625°). Datos como la evapotranspiración no se encuentran disponibles para Perú

- Global Wether Data for Swat fue propuesto por el National Centers for Environmental Prediction (NCEP). Es una plataforma que nos permite descargar datos de precipitación, viento, humedad relativa y solar en formato de archivo Swat, el cual se completó para un período de 36 años (1979-01-01 a 2014-07-31).
- Faoclim 2.0: es una base de datos de clima mundial, contiene datos históricos de 1961 a 1990, de datos como temperatura y precipitación.
- Worldclim es un conjunto de capas de clima global (datos de clima de cuadrícula en formato GeoTIFF - ráster) que se pueden usar para mapeo y modelado espacial. Contiene un promedio mensual de datos de cuadrículas climáticas para el período 1970 - 2000 con diferentes resoluciones espaciales, desde 30 segundos (1 km²) hasta 10 minutos (340 km²). El conjunto de datos incluye las principales variables climáticas: temperatura mínima, media y máxima, precipitación, radiación solar, velocidad del viento y presión de vapor de agua), así como 19 variables bioclimáticas.
- Global Climate Monitor es un geoservidor para la visualización y descarga de datos climáticos a escala global basado íntegramente en aplicaciones de código abierto, con un visor disponible en la web a una resolución espacial de 0.5°. Se puede descargar temperatura, precipitación, ET potencial; en formatos csv, xlsx, shapefile y marca de posición KML. Imagen: KML, Pelea y JPG.
- Usgs Earth Explorer es una plataforma de agua, tierra y biología más grande de los EE. UU. El USGS recopila, monitorea, analiza y brinda ciencia sobre las condiciones y problemas de los recursos naturales, además, permite llevar a cabo investigaciones multidisciplinarias a gran escala.
- Nasa - Power: son sistemas que combinan datos de una variedad de fuentes, superficies, océanos y teledetección dando resultados de datos cuadrículados (Maldonado, Borges, y De Souza, 2019).
- Es una plataforma que nos permite descargar datos de precipitación, humedad relativa, presión de superficie, temperatura, velocidad de viento, radiación solar, entre otros; a una resolución espacial de 0.5x 0.5° por región y que solo es para un punto seleccionado en tiempo real (no se puede elegir un rango de fecha).

1.3.7. Paquete informático ArcGIS

ArcGIS es un completo sistema que permite recopilar, administrar, organizar, analizar, compartir y distribuir información geográfica. Como la plataforma número uno a nivel mundial para crear y utilizar sistemas de información geográfica (SIG). ArcGIS es utilizada por diversas personas del mundo para poner el conocimiento geográfico al servicio de los sectores del gobierno, la ciencia, la empresa, la educación y los medios. ArcGIS también permite publicar la información geográfica para que esté libre para cualquier usuario. El sistema es libre en cualquier lugar a través del internet en equipos de escritorio hasta dispositivos móviles como smartphones (Cita web 5).

1.3.7.1. Álgebra de mapas

Álgebra de mapas es el conjunto de técnicas y procedimientos que trabaja sobre una o varias capas en formato ráster. La presentación de la herramienta ráster calculator facilita al obtener información derivada (Figura 1.18), por lo general, en forma de nuevas capas de datos (Olaya, 2014).

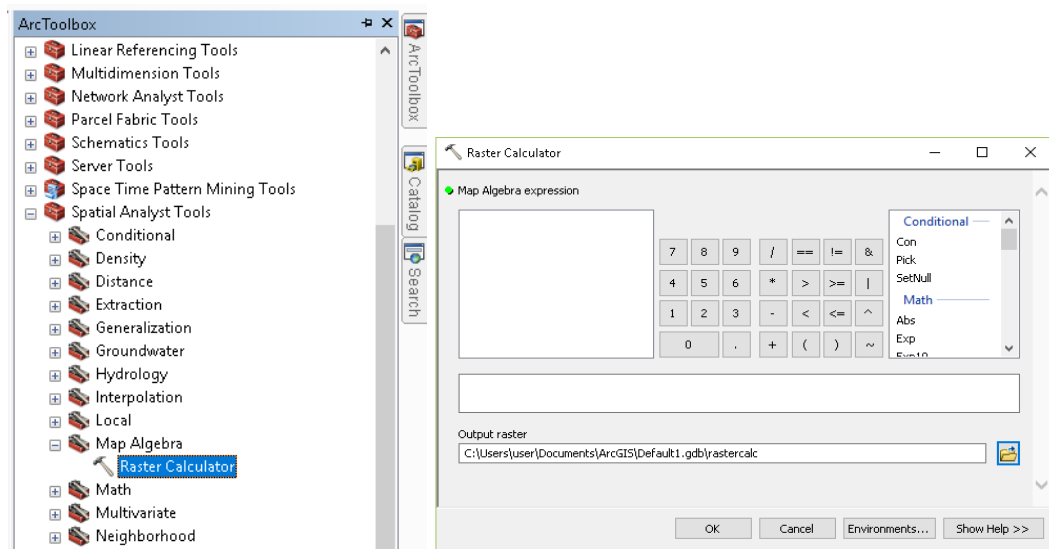


Figura 1.18. Presentación de la herramienta Ráster calculador

Fuente: Elaboración propia

1.4. MÉTODOS ESTADÍSTICOS DE AJUSTE Y VALIDACIÓN

1.4.1. Calibración analítica

Se cuenta con dos tipos de calibración, la metodológica (analítica) y la instrumental. En la calibración analítica, uno de los métodos con el que se labora es la regresión lineal, el cual, es un método clásico y con mayor utilidad en la evapotranspiración.

La calibración consta en usar datos empíricos y conocimientos anticipados para plantear cómo predecir cuantitativamente información no conocida Y (variable dependiente), a partir de datos disponibles X (variable independiente), a través de alguna función matemática de transformación. La calibración indica, entonces, utilizar simultáneamente múltiples variables X (x_1, x_2, \dots, x_k), para determinar cierta(s) variable(s) Y (Amador et al, 1999).

Los puntos de calibración tienen un error aleatorio producido por la respuesta en el valor de Y. Hay que buscar la mejor recta que coincidan con los puntos de calibración y obtener la ordenada en el origen y la pendiente de la misma. El método empleado para conseguir una recta que pase por los puntos de calibración, lleva el nombre de regresión lineal simple o método de los mínimos cuadrados (Coello & Maspoch, 2007).

Segura (2014) afirma que la regresión lineal nos facilitara encontrar alguna relación o dependencia entre dos variables. A una variable se le denomina independiente (x) y a la otra dependiente (y). Esta técnica estadística describe una línea a través de los datos observados que tiene como función:

$$y = bx + a \quad \dots\dots\dots(\text{Ec. 1.38})$$

Dónde:

- y: Es el valor calculado
- a: Es el intercepto o la intersección
- b: Es la pendiente de la línea
- x: Es el predilecto

Para constituir esta función se emplea la técnica de la minimización de la suma de los errores cuadráticos. Es decir, para un valor x_1 hay un valor y_1 (dato observado) y hay un valor ajustado \hat{y}_1 , entonces el error es:

$$e_1 = \hat{y}_1 - y_1 \quad \dots\dots\dots(\text{Ec. 1.39})$$

El error es calculado por cada valor de "x", luego cada error es elevado al cuadrado, y últimamente, estos se suman. Una de las formas para hallar esta función es a través de las ecuaciones:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \dots\dots\dots(\text{Ec. 1.40})$$

$$a = \bar{y} - b\bar{x} \dots\dots\dots(\text{Ec. 1.41})$$

La ecuación 1.40 nos calcula la pendiente de la regresión lineal (b) y la ecuación 1.41 nos calcula el intercepto (a). En las ecuaciones 1.40 y 1.41 se utilizan las medias de los valores de x (\bar{x}) y de y (\bar{y}).

1.4.2. Índices estadísticos

Los índices estadísticos conforman una herramienta objetiva que proveen cuantitativamente un valor que deja comparar distintos modelos, con el fin de determinar el modelo que mejor interprete a los valores observados (Esmeral, 2011).

1.4.2.1. Número de Nash – Sutcliffe

Segura (2014) afirma que el Número de Nash - Sutcliffe (NSE) es un estadístico normalizado que obtiene la magnitud relativa de la varianza residual, relacionado con la varianza de la data observada. NSE indica que también las líneas originadas por los datos observados versus los datos simulados se ajusten a la línea 1: 1. La ecuación está dada de la siguiente manera:

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - O)^2} \right] \dots\dots\dots(\text{Ec. 1.42})$$

Dónde:

O_i : Son datos correspondientes a resultados obtenidos con los métodos convencionales

P_i : Son datos correspondientes a resultados obtenidos con métodos satelitales

O : Es la media de los datos obtenidos con los métodos convencionales

N : Total de datos

Así mismo, Segura (2014) afirma que los valores de NSE varían de $-\infty$ a 1. Conformando datos en el rango de cero y uno los que indican una buena simulación, mientras datos menores a cero manifiestan que el valor medio observado es mejor predictor que los valores simulados, lo que indica una mala simulación (Tabla 1.5).

Tabla 1.5. Criterios de interpretación del desempeño del Número de Nash - Sutcliffe

NSE	Desempeño
<0.2	Insuficiente
0.2 a 0.4	Satisfactorio
0.4 – 0.6	Bueno
0.6 – 0.8	Muy bueno
> 0.8	Excelente

Fuente: Lujano et al. (2019)

1.4.2.2. Raíz del error cuadrático medio

Segura (2014) sostiene que la raíz del error cuadrático medio (RMSE) es un índice que también permite calcular el desempeño del modelo con respecto a lo observado. Este índice es muy utilizado debido a que indica el error en las unidades en las que se enfrentan las variables. Un valor de RMSE igual a cero indica un excelente ajuste, mientras que valores superiores indican bajo desempeño. Para calcular el RMSE se debe aplicar la siguiente fórmula:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{N}} \dots\dots\dots(Ec. 1.43)$$

Dónde:

O_i: Datos correspondientes a resultados obtenidos con los métodos convencionales.

P_i: Son datos correspondientes a resultados obtenidos con métodos satelitales.

N: Total de datos.

Para analizar la capacidad predictiva de los modelos se escenificará los valores observados frente a los calculados graficando así el grado con el que los puntos se distribuyen sobre la recta 1:1 o de ajuste perfecto. El error en las predicciones del modelo se contará los términos de las unidades de la variable calculada a través de la RMSE (Lujano et al., 2014, cita a Legates y Cabe, 1999).

1.4.2.3. Error medio absoluto

Kashani y Dinpashoh (2011) afirman que el error medio absoluto (MAE) denota una medida de hasta dónde puede alcanzar la estimación en error, ignorando signo. El método que resulta el más bajo valor para el MAE es el mejor método para el área de estudio. El rango de MAE es de 0 a +∞ y está definida por:

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N |O_i - P_i|}{N} \dots\dots\dots(Ec. 1.44)$$

Dónde:

O_i: Son datos correspondientes a resultados obtenidos con los métodos convencionales.

P_i: Son datos correspondientes a resultados obtenidos con métodos satelitales.

N: Total de datos.

1.4.2.4. Error porcentual absoluto medio

Al respecto, Cáceres (2016) sostiene que el error porcentual absoluto medio (MAPE) es una buena metodología para llevar a cabo la comparación entre dos series de pronósticos desiguales. Donde un MAPE elevado es más perjudicial para dichos pronósticos. Su fórmula es:

$$MAPE = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{|O_i - P_i|}{|O_i|}}{N} \times 100 \dots\dots\dots(Ec. 1.45)$$

Dónde:

O_i: Son datos correspondientes a resultados obtenidos con los métodos convencionales.

P_i: Son datos correspondientes a resultados obtenidos con métodos satelitales.

N: Total de datos.

1.4.2.5. Coeficiente de eficiencia

Kashani y Dinpashoh (2011) afirman que el coeficiente de eficiencia (CE) puede cambiar en el rango $-\infty$ a 1. Una eficiencia de 1 (CE = 1) representan una coincidencia perfecta de datos estimados con los observados. Una eficiencia de 0 (CE = 0) representa que las predicciones del modelo son tan precisas como la media de los datos observados, mientras que una eficiencia menor a cero (CE < 0) ocurre cuando la media observada es un mejor predictor que el modelo. Cuanto más cerca se encuentre la eficiencia del modelo a 1, es cuanto más preciso es el modelo.

La ecuación es la siguiente:

$$CE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - O)^2} \dots\dots\dots(Ec. 1.46)$$

Dónde:

O_i: Son datos correspondientes a resultados obtenidos con los métodos convencionales.

P_i: Son datos correspondientes a resultados obtenidos con métodos satelitales.

O: Es la media de los datos obtenidos con los métodos convencionales.

1.4.2.6. Error de sesgo medio

El error de sesgo medio (EMS) ofrece información de la conducta a largo plazo de las correlaciones, lo que admite una confrontación de la desviación real entre los valores pronosticados y medidos, término a término; tanto en el RMSE y el EMS el cero es el valor más óptimo (Segura y Ortiz, 2017, citan a Gunhan, et al., 2005).

La ecuación es la siguiente:

$$EMS = \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)}{N} \dots\dots\dots (Ec. 1.47)$$

Dónde:

O_i: Son datos correspondientes a resultados obtenidos con los métodos convencionales.

P_i: Son datos correspondientes a resultados obtenidos con método satelital.

N: Total de datos.

1.4.2.7. Índice de concordancia

Lujano et al. (2019) sostienen que el índice de concordancia (d) manifiesta cuánto los valores estimados por la forma estándar se acercan a los valores encontrados por los otros métodos empíricos, varía entre 0 a 1, el valor de 1 indica una concordancia exacta, mientras que valores de 0 indican una alejada concordancia.

Este índice es alcanzado con el objeto de obtener el índice de confianza, el cual es el resultado de multiplicar el coeficiente de correlación y el índice de concordancia (Willmott, 1982).

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|P_i - O| + |O_i - O|)^2} \right] \dots\dots\dots (Ec. 1.48)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (|O_i - O|)(|P_i - P|)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - O)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (P_i - P)^2}} \dots\dots\dots (Ec. 1.49)$$

$$c = r \times d \dots\dots\dots (Ec. 1.50)$$

Dónde:

O_i: Son datos que corresponden a resultados obtenidos con los métodos convencionales.

P_i: Son datos que corresponden a resultados estimados mediante los métodos satelitales.

O: Es la media de los datos encontrados con los métodos convencionales.

P: Es la media de los datos estimados con los métodos satelitales.

d: Índice de concordancia.

r: Coeficiente de correlación lineal.

c: Índice de confianza (Tabla 1.6).

En el coeficiente de correlación, el tamaño muestral más convencional será cuando r esté cerca de cero. Mientras que las muestras de menor tamaño se obtendrán cuando la correlación poblacional esté cerca a los valores extremos (-1 o $+1$). Cuando r se aproxima a cero, el tamaño muestral debería ser muchísimo más grande (por sobre 1.5 si el error de estimación es 0.05 con un nivel de confianza de 0.95) (Henríquez et al., 2012).

Tabla 1.6. Criterios de interpretación del desempeño del índice de confianza

Método	Desempeño
>0.85	Óptimo
0.76 a 0.85	Muy bueno
0.66 a 0.75	Bueno
0.61 a 0.65	Mediano
0.51 a 0.60	Tolerable
0.41 a 0.50	Malo
≤ 0.40	Pésimo

Fuente: Lujano et al., (2019)

Tabla 1.7. Índices estadísticos para evaluar los resultados

Índice	Ecuación
Número de Nash - Sutcliffe (NSE)	$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - O)^2} \right]$
Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE)	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{N}}$
Error Medio Absoluto (MAE)	$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N O_i - P_i }{N}$
Error Porcentual Absoluto Medio (MAPE)	$MAPE = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{ O_i - P_i }{ O_i }}{N} \times 100$
Coefficiente de Eficiencia (CE)	$CE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - O)^2}$
Error Medio de Sesgo (EMS)	$EMS = \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)}{N}$
Índice de concordancia (d)	$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (P_i - O + O_i - O)^2} \right]$
Coefficiente de correlación lineal (r)	$r = \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - O)(P_i - P)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - O)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (P_i - P)^2}}$
Índice de confianza (c)	$c = r \times d$

Fuente: (Fernández & Milla, 2018)

1.5. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS

- **Evaporación**

Es el proceso en donde el agua líquida se transforma en vapor de agua y se retira de la superficie evaporante (Allen et al., 2006).

- **Transpiración**

Es la vaporización del agua líquida contenida en los tejidos de los cultivos y su posterior traslado hacia la atmósfera (Allen et al., 2006).

- **Evapotranspiración potencial o de referencia**

Es la evapotranspiración en un tiempo determinado por un cultivo verde y corto, cubriendo en su totalidad al suelo, de altura uniforme y con adecuado estado de agua en el perfil del suelo (Irmak & Haman, 2003).

- **Evapotranspiración real, actual o de cultivo**

Es la pérdida de agua por evaporación y transpiración, en las condiciones atmosféricas y de humedad del suelo, actuales y reales (Mejía, 2015).

- **Evapotranspiración**

Es la combinación de la evaporación desde la superficie terrestre y la transpiración de las plantas (Chow et al., 2000).

- **Datos**

Simple conjunto de valores o elementos que se necesitan para representar algo (Olaya, 2014).

- **Hardware**

El equipo que se necesaria para ejecutar el software (Olaya, 2014).

- **Información**

Es la interpretación de los resultados de los datos (Olaya, 2014).

- **Ráster**

Un ráster trata de una matriz de celdas (o píxeles) plasmadas en filas y columnas (o una cuadrícula) en la que todas las celdas cuentan con un valor que plasma información (Cita web 6).

- **Software**

Es necesario una aplicación informática que pueda trabajar con los datos y complemente los métodos (Olaya, 2014).

CAPÍTULO II METODOLOGÍA

2.1. UBICACIÓN Y CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA CUENCA CACHI

La cuenca del río Cachi se encuentra ubicada en la sierra - centro de los andes peruanos.

2.1.1. Ubicación política

Políticamente, la cuenca Cachi se encuentra ubicada (Figuras 2.1 y 2.2):

Departamento : Ayacucho
Provincia : Huamanga, Huanta, San Miguel
Distrito : Huachocolpa, Paras y otros

2.1.2. Ubicación geográfica

Geográficamente, la cuenca Cachi se encuentra entre los límites (Tabla 2.1):

Tabla 2.1. Límites geográficos de la cuenca Cachi

Descripción	Valor	Unidad
Este (X min.)	526,065.69	m
Sur (Y min.)	8,502,771.92	m
Este (X máx.)	616,969.58	m
Sur (Y máx.)	8,582,825.07	m
Huso	18	
Zona	L	
Datum	WGS84	
Altitud	2800 - 4200	m.s.n.m.

Fuente: Elaboración propia

2.1.3. Límites intercuencas

La cuenca Cachi limita por el norte con la cuenca Mantaro y la cuenca Piene, por el sur con la cuenca Pampas, por el oeste con la cuenca Torobamba y por el este con la cuenca Urubamba (Tabla 2.2. y figura 2.3).

Tabla 2.2. Límites de la cuenca Cachi

Norte:	Cuenca Mantaro y Piene
Sur:	Cuenca Pampas
Oeste:	Cuenca Torobamba
Este:	Cuenca Urubamba

Fuente: Elaboración propia

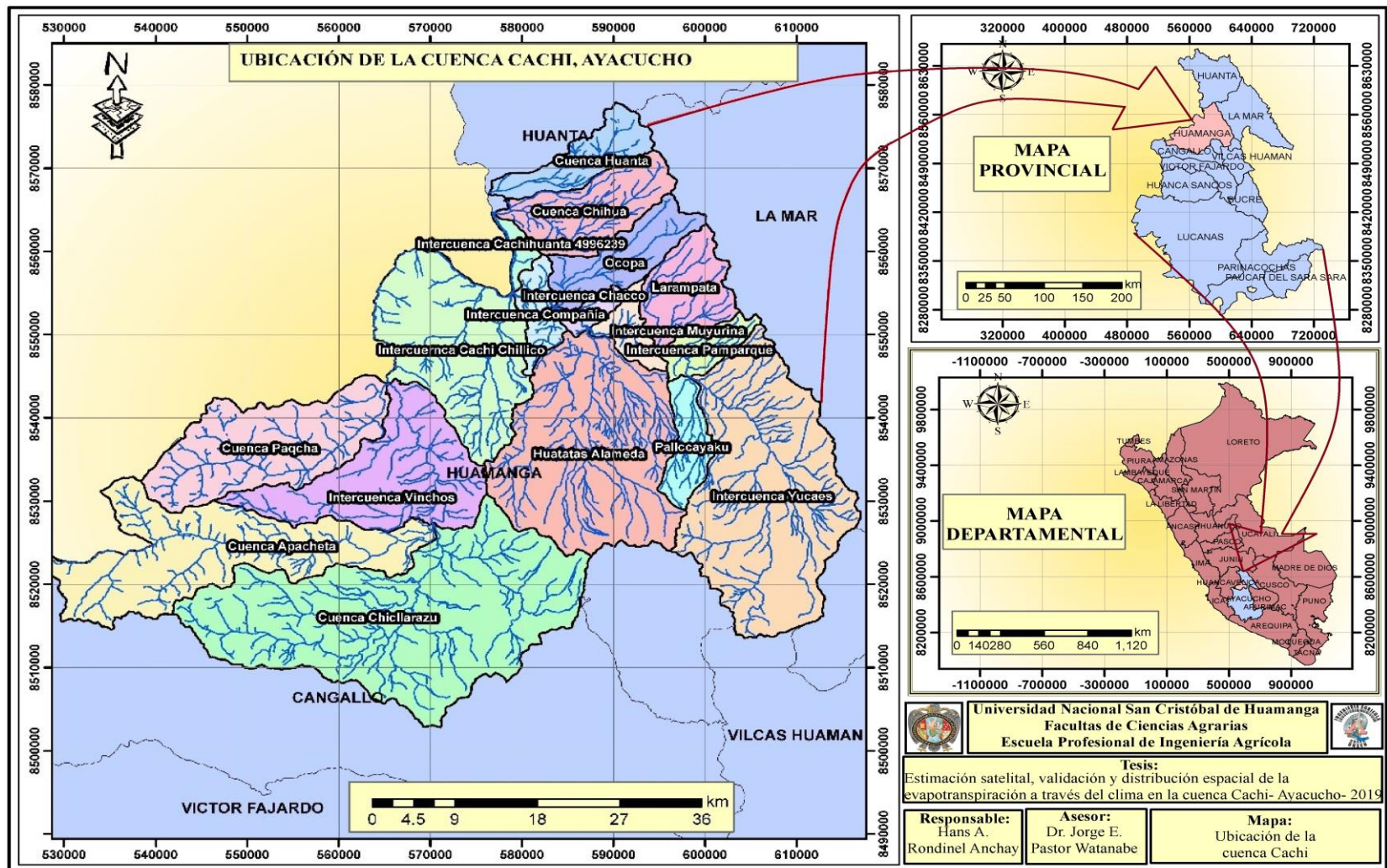


Figura 2.1. Ubicación de la cuenca Cachi, provincial y departamental

Fuente: Elaboración propia

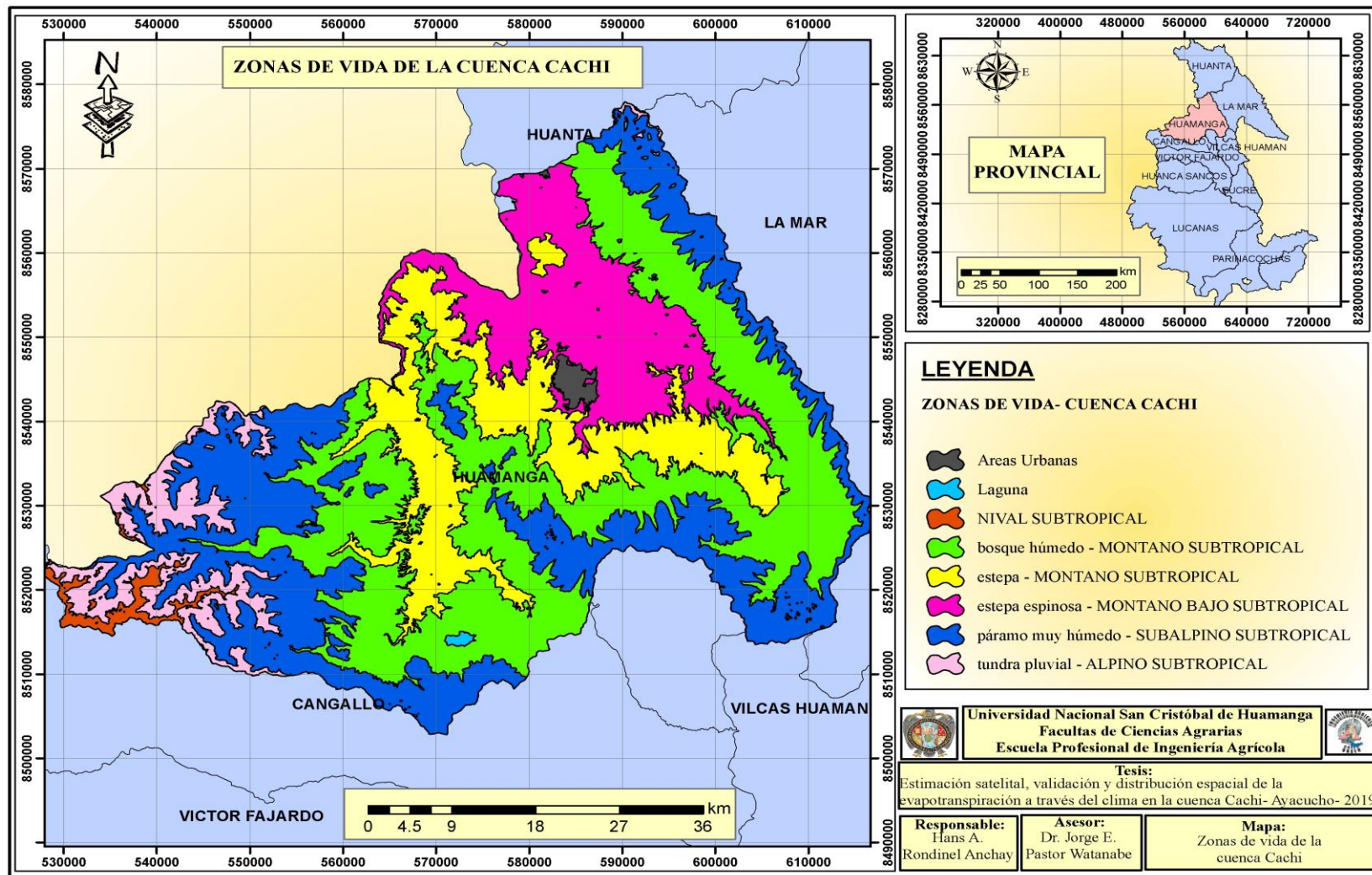


Figura 2.2. Zonas de vida de la cuenca Cachi

Fuente: Elaboración propia

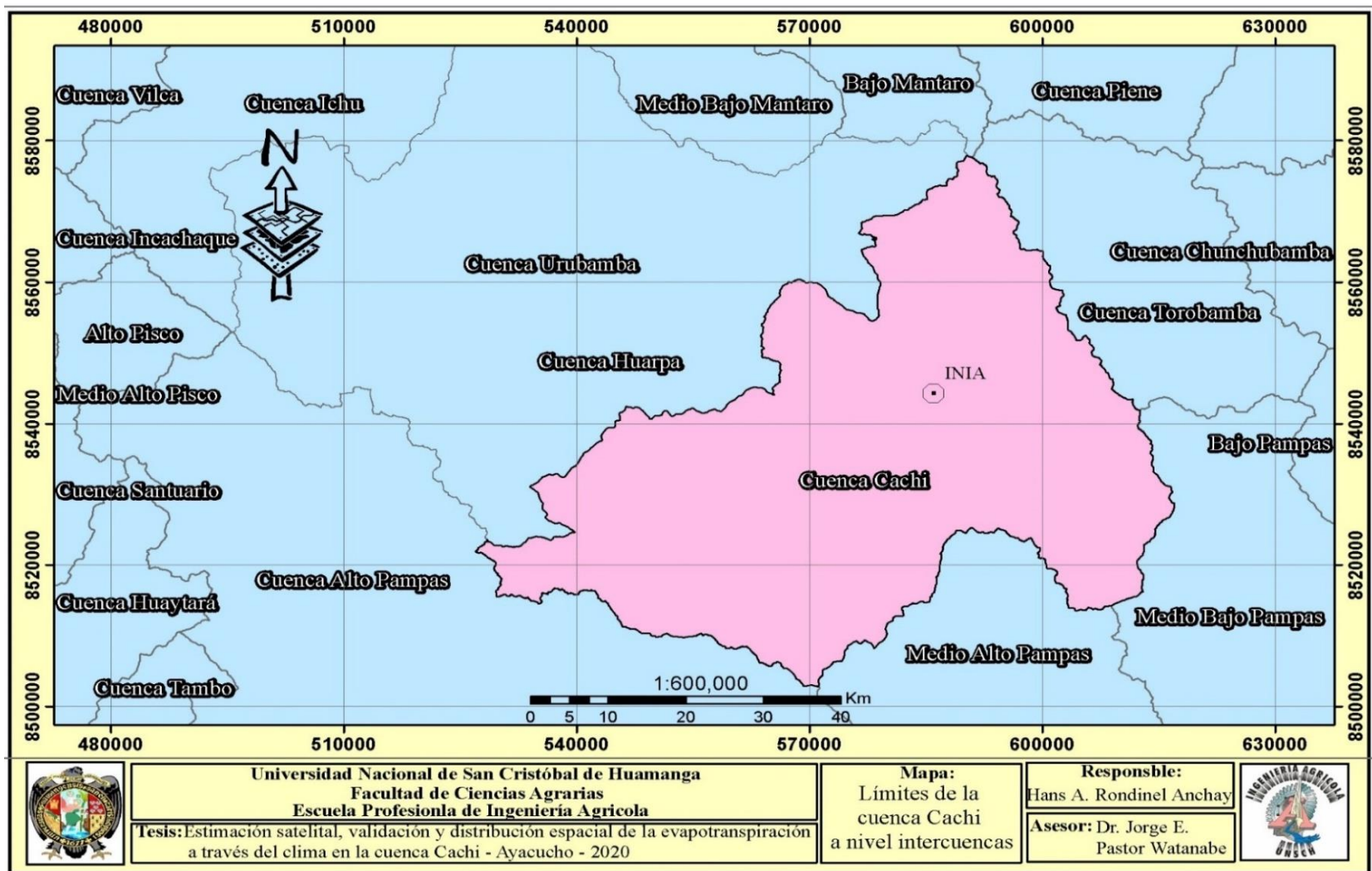


Figura 2.3. Límites de la cuenca Cachi a nivel intercuenca

Fuente: Elaboración propia

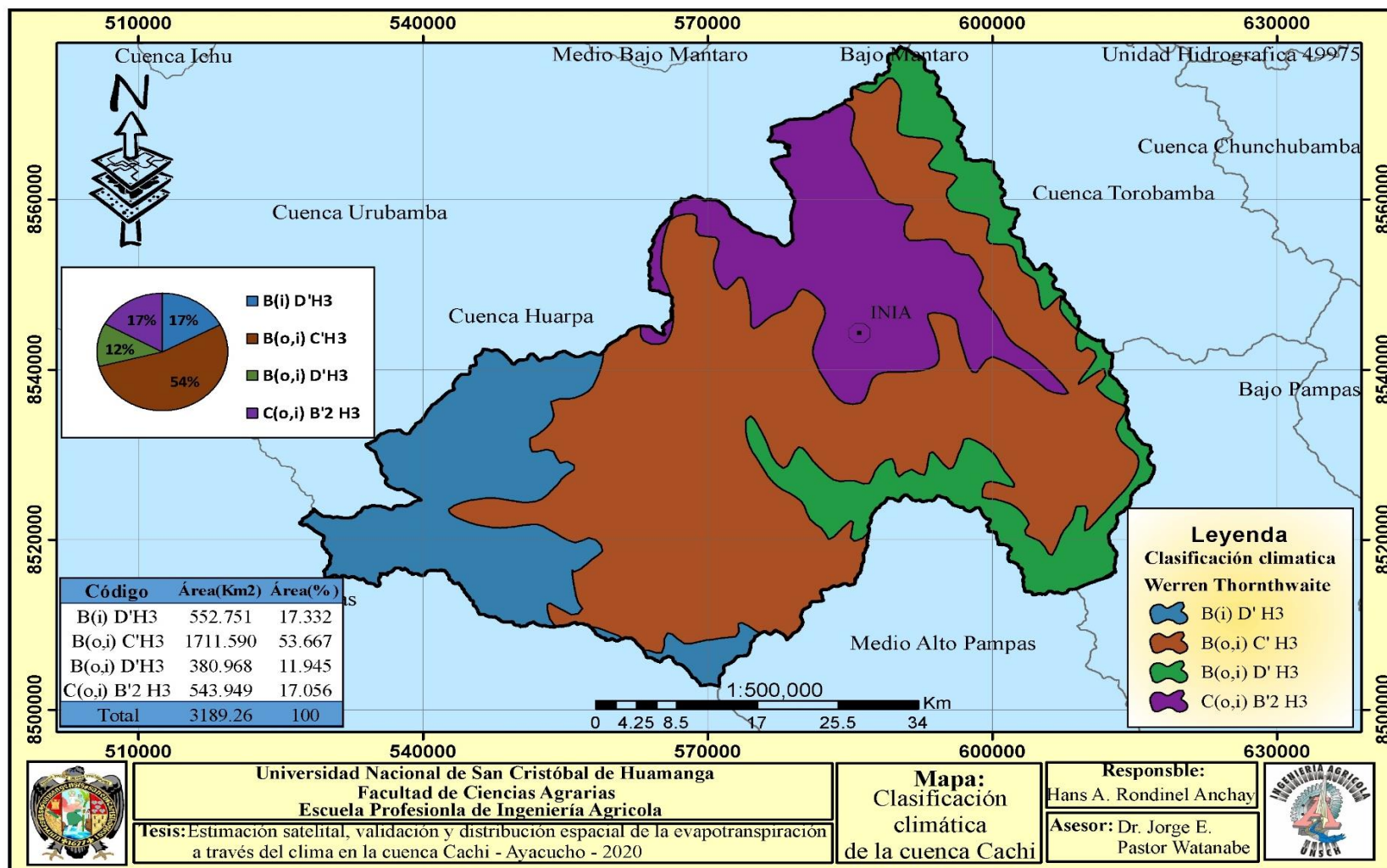


Figura 2.4. Clasificación climática de la cuenca Cachi

Fuente: Elaboración propia

2.1.4. Extensión

La cuenca Cachi cuenta con un area de 3189.26 km² y tiene como subcuencas principales a la de los ríos Apacheta, Alpachaca y Vinchos.

2.1.5. Clima

Según la Estación Meteorológica del INIA, que representa la zona del proyecto, se tiene una temperatura del aire media mensual de 17.28°C, con medias máximas de 26.87 °C en noviembre y medias mínimas de 6.69 °C en julio, habiendo un período "frío" de mayo a agosto y un período "caliente" de setiembre a abril. La precipitación promedio anual, para el período 2013 - 2017 es de 536 mm; a nivel mensual, varía de 0.56 mm en junio a 114.96 mm en febrero, siendo los meses de mayor precipitación, diciembre, enero, febrero y marzo. La evaporación medida en el tanque evaporímetro presenta valores medios anuales de 122.36 mm; a nivel mensual varía de 102.05 mm en febrero a 1.34.78 mm en noviembre.

Según los datos satelitales, para toda la cuenca Cachi se tiene una precipitación anual - total de 737.58 mm, evapotranspiración potencial de 1371.86 mm, temperatura media - promedio multianual (en toda la cuenca) de 12 °C y radiación solar 534.65 cal/cm²/día.

- **Clasificación climática**

Se ha elaborado un mapa climático para la cuenca Cachi de acuerdo al sistema de clasificación de climas de Werren Thornthwaite (método utilizado por el SENAMHI). Las principales características del sistema de clasificación adoptado son: precipitación efectiva, temperatura eficiente, distribución de la precipitación en el año y la humedad atmosférica (Tablas 2.3 al 2.6 y Figura 2.4).

Tabla 2.3. Precipitación efectiva

Precipitación efectiva	
Símbolo	Carácter del clima
A	Muy lluvioso
B	Lluvioso
C	Semiseco
D	Semiárido
E	Árido

Fuente: (SENAMHI, 2011)

Tabla 2.4. Temperatura eficiente

Temperatura eficiente	
Símbolo	Carácter del clima
A'	Cálido
B'1	Semicálido
B'2	Templado
B'3	Semifrío
C'	Frío
D'	Semifrígido
E''	Frígido
F''	Polar

Fuente: (SENAMHI, 2011)

Tabla 2.5. Distribución de la precipitación a través del año

Distribución de la precipitación a través del año	
Símbolo	Significado
r	Precipitación abundante en todas las estaciones
i	Invierno seco
p	Primavera seca
v	Verano seco
o	Otoño seco
d	Deficiencia de lluvias en todas las estaciones

Fuente: (SENAMHI, 2011)

Tabla 2.6. Humedad atmosférica

Humedad atmosférica	
Símbolo	Característica climática
H1	Muy Seco
H2	Seco
H3	Húmedo
H4	Muy Húmedo

Fuente: (SENAMHI, 2011)

B(i)D'H3

Representado por el color azul, es de invierno seco, zona lluviosa, de clima semifrígido y con humedad relativa calificada como húmeda.

B(o,i)C'H3

Representado por el color marrón, es de invierno y otoño seco, de zona lluviosa, de clima frío, con humedad relativa calificada como húmeda.

B(o,i)D'H3

Representado por el color verde, es de invierno y otoño seco, de zona lluviosa, de clima semifrío, con humedad relativa calificada como húmeda.

C(o,i)B'2H3

Representado por el color violeta, es de invierno y otoño seco, de zona semiseca, de clima templado, con humedad relativa calificada como húmeda.

De la figura 2.4 se deduce la clasificación climática de la cuenca Cachi, el cual cuenta con 3189.26 Km² y representa el 100 % de la cuenca, lo que se distribuye en 552.75 Km² de B(i)D'H3, que representa el 17.33 %; 1711.59 Km² de B(o,i)C'H3, que representa el 53.67%; 380.97 Km² de B(o,i)D'H3, que representa el 11.95%, y 543.95 Km² de C(o,i)B'2H3, que representa el 17.06% (Tabla 2.7 y Figura 2.5).

Tabla 2.7. Extensión y porcentajes para la clasificación climática

Código	Área (Km²)	Área (%)
B(i) D'H3	552.751	17.332
B(o,i) C'H3	1711.590	53.667
B(o,i) D'H3	380.968	11.945
C(o,i) B'2 H3	543.949	17.056
TOTAL	3189.26	100

Fuente: Elaboración propia

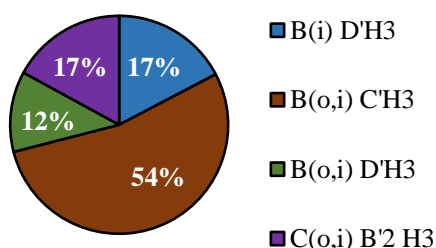


Figura 2.5. Distribución porcentual circular para la clasificación climática

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a la figura 2.4, 2.5 y tabla 2.7, la cuenca Cachi cuenta con un 54 % de B(o,i) C'H3 (color marrón), que prácticamente es más de la mitad de toda la Cuenca. Que tiene las siguientes características: zona lluviosa, de invierno y otoño seco, de clima frío, con humedad relativa calificada como húmeda.

2.1.6. Clasificación del índice de aridez

El índice de aridez es empleado para la caracterización y delimitación de zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas. Tanto a nivel regional como mundial, se acordó adoptar un índice que permite determinar los lapsos de deficiencia y excedencia climática de agua en un período específico, el cual debe tener relación básicamente con la precipitación y la evapotranspiración de referencia en el sistema propuesto. Por ello, se propone la utilización de la relación (UNESCO, 2006):

$$\frac{P_m}{ET_o} \quad (\text{UNEP, 1997}) \quad \dots\dots\dots(\text{Ec. 2.1})$$

Dónde:

P_m: Precipitación media del periodo

ET_o: Evapotranspiración de referencia del periodo

De acuerdo a la Unesco (2006), este índice se utilizará para la delimitación y clasificación de las tierras utilizando los criterios propuestos por Hassan y Dregne (1997), utilizados en el Atlas Mundial de Desertificación (UNEP, 1997), siguiendo los criterios señalados en la tabla 2.8.

Tabla 2.8. Clasificación del índice de aridez

Zonas	P/ET _o
Hiperáridas	< 0.05
Áridas	0.05 a < 0.20
Semiáridas	0.20 a < 0.50
Subhúmedas secas	0.50 a < 0.65
Subhúmedas húmedas	0.65 a 1
Húmedas	> 1

Fuente: (UNESCO, 2006)

Con la metodología propuesta por la Unesco (Ecuación 2.1 y Tabla 2.8) se ha elaborado el mapa de índice de aridez para la cuenca Cachi (Figura 2.6).

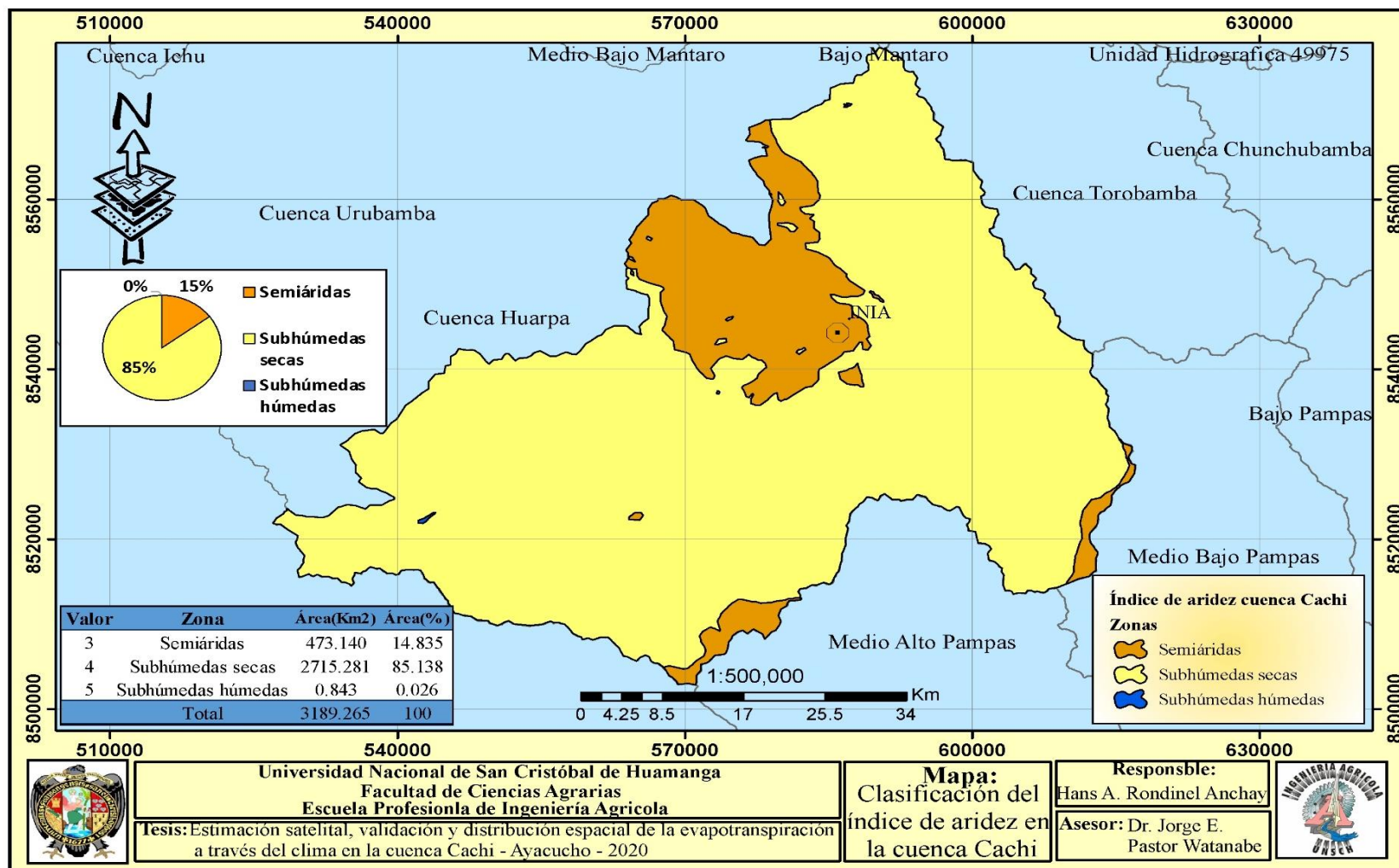


Figura 2.6. Clasificación del índice de aridez en la cuenca Cachi

Fuente: elaboración propia

De la figura 2.6, se deduce la clasificación del índice de aridez de la cuenca Cachi, el cual cuenta con 3189.26 Km² y representa el 100 % de la cuenca, lo que se distribuye en tres zonas: 473.140 Km² de semiáridas (color anaranjado), que representa el 14.83 %; 2715.281 Km² de subhúmedas secas (amarillo), que representa el 85.14 %, y 0.843 Km² de subhúmedas húmedas (azul), que representa el 0.026 % (Tabla 2.9 y Figura 2.7).

Tabla 2.9. Extensión y porcentajes para la clasificación del índice de aridez

Valor	Zona	Área (Km ²)	Área (%)
3	Semiáridas	473.140	14.835
4	Subhúmedas secas	2715.281	85.138
5	Subhúmedas húmedas	0.843	0.026
TOTAL		3189.265	100

Fuente: Elaboración propia

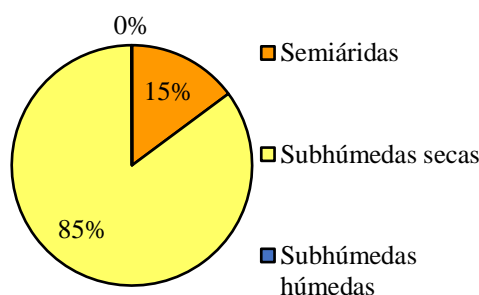


Figura 2.7. Distribución porcentual circular para la clasificación del índice de aridez

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a la figura 2.6, 2.7 y tabla 2.9, la cuenca Cachi cuenta en un 85 % de subhúmeda seca (color amarillo), que es un área muy considerable de toda la Cuenca.

Las estaciones pertenecientes a la cuenca Cachi clasificado por el nombre de la estación y su ubicación correspondiente a nivel de lugar, distrito y provincia y según el tipo de estación (estación meteorológica convencional y estación meteorológica automática), información brindada por los representantes del OPEMAN, que están encargados de los datos meteorológicos pertenecientes a toda la cuenca Cachi (Tabla 2.10).

Tabla 2.10. Estaciones pertenecientes a la cuenca Cachi

N°	Nombre de la estación		Ubicación		Tipo
		Lugar	Distrito	Provincia	
01	Allpachaka	Allpachaka	Chiara	Huamanga	EMC
02	Apacheta	Apacheta	Chuschi	Cangallo	EMC
03	Aucara	Aucara	Aucara	Lucanas	EMC
04	Ayna - San Francisco	Ayna - San francisco	Ayna	La Mar	EMC - EMA
05	Chiara	Chiara	Chiara	Huamanga	EMC
06	Choccoro	Choccoro	Chuschi	Cangallo	EMC
07	Chungui	Chungui	Chungui	La Mar	EMC
08	Coracora	Coracora	Coracora	Parinacochas	EMC - EMA
09	Cuchoquesera	Cuchoquesera	Vinchos	Huamanga	EMC - EMA
10	Huanta	Huanta	Huanta	Huanta	EMC
11	INIA	INIA	Ayacucho	Huamanga	EMC - EMA
12	Pampa Cangallo	Pampa Cangallo	Los Morochucos	Cangallo	EMC
13	Pucaloma	Pucaloma	socos	Huamanga	EMC
14	Querobamba	Querobamba	Querobamba	Sucre	EMC
15	Sachabamba	Sachabamba	Chiara	Huamanga	EMC
16	Saisa	Saisa	Saisa	Lucanas	EMC
17	San Pedro de Cachi	San Pedro de Cachi	Acocro	Huamanga	EMC
18	Tambillo	Tambillo	Tambillo	Huamanga	EMC
19	Vilcancho	Vilcancho	Vilcancho	Víctor Fajardo	EMC

EMC: Estación meteorológica convencional; EMA: estación meteorológica automática

Fuente: Gobierno Regional de Ayacucho - OPEMAN

2.1.7. Vías de acceso

El lugar del proyecto cuenta con una amplia red de carreteras con base a dos ejes troncales de carreteras de penetración, tomando como centro la ciudad de Ayacucho. Una de ellas es la vía Libertadores que conecta Ayacucho con la carretera Panamericana Sur, en la localidad de San Clemente, con 350 km de distancia. La otra carretera principal es la de Ayacucho - Cuzco. Por vía aérea, la ciudad de Ayacucho está conectada con Lima y Cuzco con vuelos a diario.

2.1.8. Ubicación satelital del proyecto

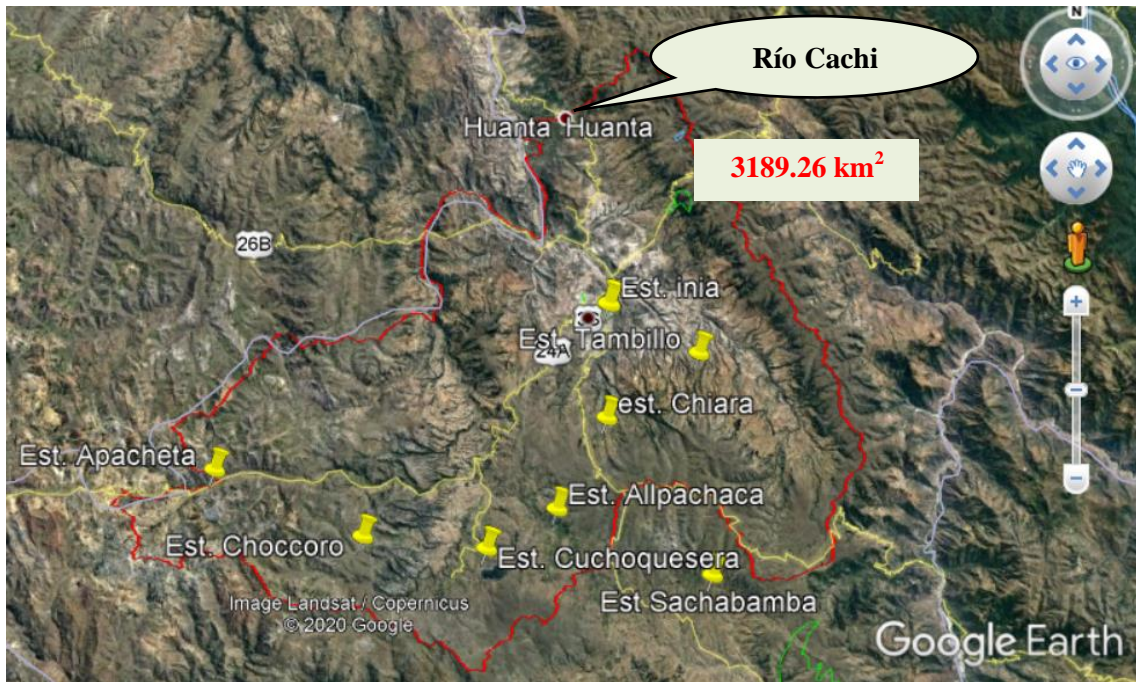


Figura 2.8. Ubicación satelital de las principales estaciones meteorológicas de la cuenca Cachi

Fuente: Google Earth y elaboración propia (Cita web 1)



Figura 2.9. Ubicación del río Cachi referente a la cuenca Cachi.

Fuente: (Gilvonio & Zeisser, 2015)

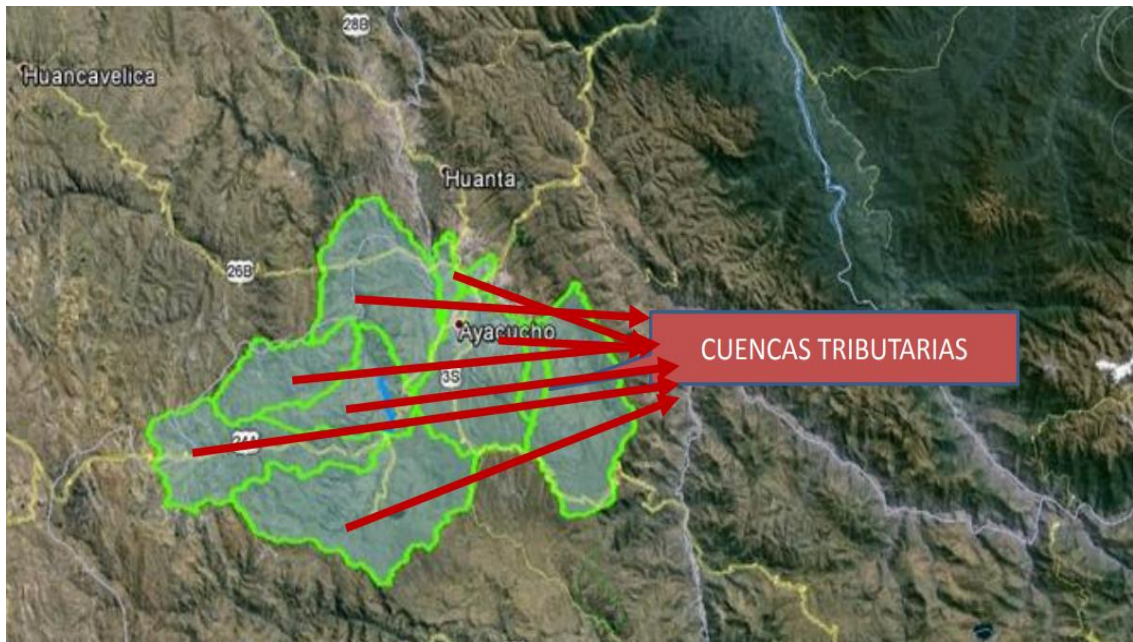


Figura 2.10. Ubicación satelital de la cuenca Cachi y sus subcuencas

Fuente: Google Earth y elaboración propia (Cita web 1)

2.2. MATERIALES, EQUIPOS Y HERRAMIENTAS INFORMÁTICAS

La presente investigación se ha ejecutado en base a materiales, equipos y herramientas informáticas, empleadas para lograr los objetivos planteados, que se presentan a continuación:

2.2.1. Materiales

- Conexión de internet a alta velocidad.
- Mapas rasterizados de variables climáticas (temperaturas medias mensuales y radiaciones solares medias mensuales), descargados de la plataforma virtual Nasa Giovanni, que están en formato raster - TIFF a resolución espacial de 0.05°, que equivalen a 5 km aproximadamente y del USGS Earth Explorer.
- Reportes de estaciones meteorológicas pertenecientes a la cuenca Cachi.
- Hojas de cálculo.

2.2.2. Equipos

- Computadora portátil de alta gama.
- Impresora a color.
- Cámara fotográfica.
- Calculadora científica.

2.2.3. Herramientas informáticas

- ArcGis 10.3
- Google Earth Pro
- Microsoft Office 2016
- PETP V2.0.0

2.3. PROBLEMAS ESPECÍFICOS

El enfoque del presente trabajo es cuantitativo y no experimental, pues mediante modelos matemáticos se ha estimado la evapotranspiración. La investigación es de tipo aplicada, debido a que confrontaremos una teoría moderna con teorías convencionales que actualmente están siendo utilizadas como tecnologías de punta. El nivel de investigación es descriptiva - correlacional, en la que describimos los métodos para estimar la evapotranspiración e insertamos datos climáticos obtenidos satelitalmente para confrontar frente a los métodos empíricos. Luego comparamos, calibramos y validamos los resultados satelitales frente a los métodos convencionales mediante una correlación no causal.

La línea de investigación que se sigue es la de recursos hídricos, enfocado al balance hídrico, específicamente en la demanda de agua de los cultivos.

Mediante la variable independiente y las ecuaciones empíricas se obtuvo la variable dependiente; en este caso una de las variables independientes más importantes es el clima; el cual podemos dividirla en subvariables independientes como temperaturas, radiaciones solares, horas sol, humedades relativas, evaporaciones, las velocidades del viento, etc., y que mediante las ecuaciones empíricas seleccionadas se obtuvieron las variables dependientes (Figura 2.11).

En el presente trabajo, se obtuvo las subvariables independientes: temperaturas y radiaciones solares de manera satelital, los cuales contribuyen de manera espacial a la estimación de la evapotranspiración en la cuenca Cachi.

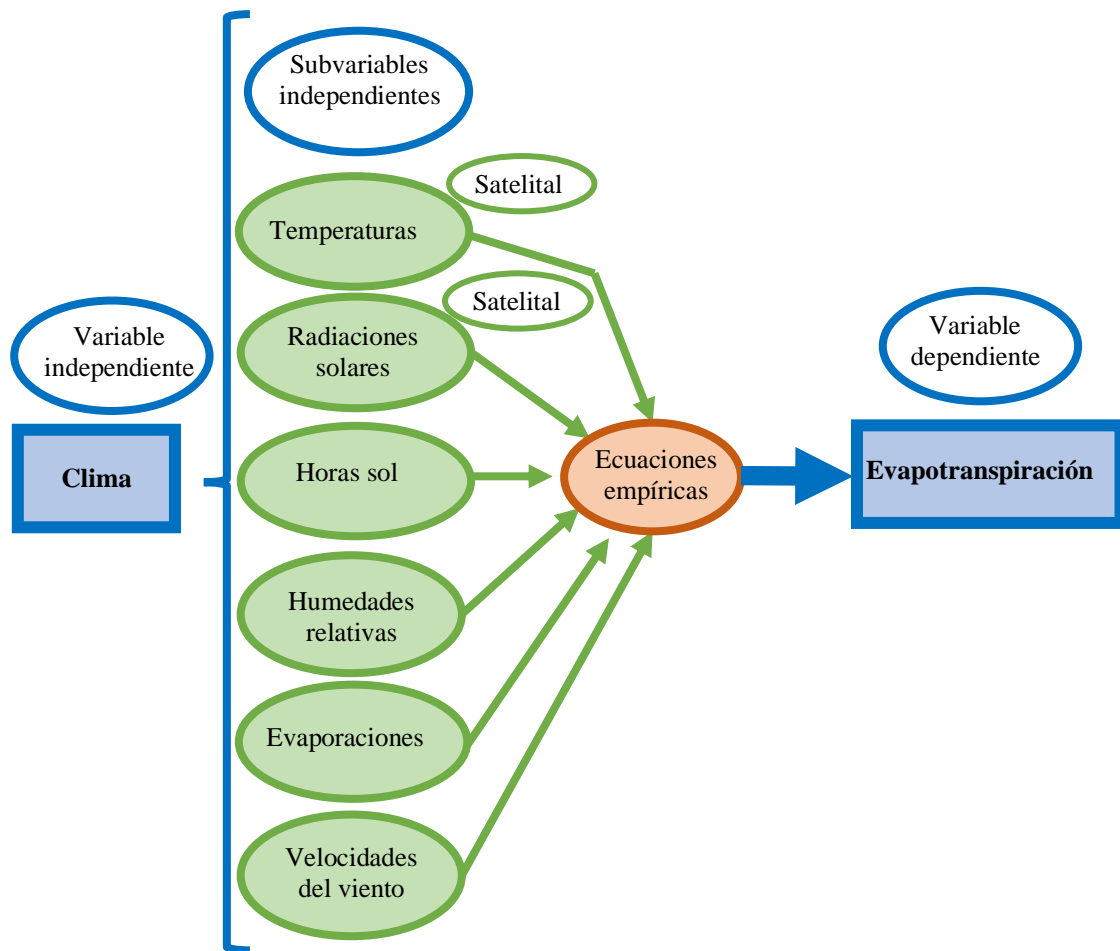


Figura 2.11. Relación de la variable independiente con la variable dependiente

Fuente: Elaboración propia

En las siguientes líneas se describe lo realizado en el presente trabajo para cumplir con los problemas específicos. Se realizó la selección del método empírico para la estimación de la evapotranspiración por el método satelital, seguidamente se estimó la evapotranspiración por los métodos convencionales elegidos; y como tercer objetivo se ajustaron y validaron los resultados obtenidos mediante los índices estadísticos. Para todo ello se realizaron la búsqueda de información, sistematización, procesamiento, análisis e interpretación de resultados a través del método de descripción cuantitativo.

En este subcapítulo, se realizaron los cálculos y todo el procedimiento para estimar la evapotranspiración mediante todos los métodos planteados. Se han utilizado tanto datos observados (de la estación meteorológica) como datos satelitales (descargados de la plataforma Nasa Giovanni y USGS Earth Explorer) (Tabla 2.11). Los datos meteorológicos observados son necesarios, ya que son la fuente confiable y base para la investigación.

Tabla 2.11. Datos observados y datos satelitales

Datos observados	Datos satelitales
(T)Temperaturas: mínima, máxima y media (°C)	(T)Temperaturas: mínima y máxima (°F)
(n) Horas sol (horas)	Radiación solar (cal/cm ² /día)
(HR) Humedad relativa (%)	
(E) Evaporaciones (mm)	
(V) Velocidad del viento (m/s)	

Fuente: Elaboración propia

2.3.1. ¿En la cuenca Cachi actualmente no se tiene una ecuación empírica adecuada para la estimación satelital y la distribución espacial de la evapotranspiración a través de mapas temáticos?

2.3.1.1. Evaluación y elección de la ecuación empírica para la estimación satelital y distribución espacial de la evapotranspiración en el ámbito de la cuenca Cachi

Se ha evaluado las ecuaciones empíricas en base a la bibliografía revisada:

Según Olarte (1987) cualquiera de los métodos en base a la radiación es más precisos, especialmente si se cuenta con datos de radiación neta. Dentro de las ecuaciones y procedimientos basados en la radiación, la ecuación de FAO Penman Monteith ofrece resultados más exactos a la realidad; no solo por contar con una amplia base científica, sino también porque en ella se mezclan los principales factores climatológicos que afectan a la evapotranspiración; sin embargo, por ser un método demasiado complicado y necesita demasiada información climática, se recomienda utilizar el método de Hargreaves basados en registros de radiación media mensual en cal/cm²/día. Por otra parte, la cuenca Cachi se encuentra ubicada en la sierra peruana, y a través de los estudios en dos localidades de la sierra: Huayao en Huancayo y Weberbauer en Cajamarca, por el ingeniero Abelardo de la Torre V. del Programa de Asistencia Técnica CID - ATA/ CLASS del plan Meris I en 1978, de cuyas conclusiones y recomendaciones se han derivado la aptitud del método de Hargreaves en base a la radiación.

Al respecto, Núñez (2010) concluye que el método de Hargreaves es el más recomendable para la sierra peruana. Pues utilizó la ecuación de Hargreaves en base a la radiación extraterrestre.

De acuerdo a las variables utilizadas en las ecuaciones empíricas, puesto que cada ecuación cuenta con distintas variables, de las cuales, la mayoría son difíciles de encontrar. Por ello, se eligió la ecuación de Hargreaves en base a la radiación (Ecuación 1.5), la cual presenta variables que se pueden obtener de la plataforma Nasa Giovanni y del USGS Earth Explorer de manera fácil y gratuita. También se pudo haber utilizado el método del tanque evaporímetro Clase A, pero de acuerdo a lo descrito por Olarte (1987) y Allen et al. (2006) quienes expresan que se debe tener adecuado mantenimiento y uso correcto, además que solo es recomendado para periodos de diez días, y que se requiere de datos satelitales de evaporación, velocidad del viento y humedad relativa; los cuales sí se pueden descargar de los geoservidores, pero a resoluciones mayores (no es recomendable), se tendría que esperar nuevas actualizaciones en la cual se reduzca la resolución para un mejor análisis.

A. Obtención de información satelital

De acuerdo a los requerimientos del presente trabajo, y a lo que ofrece cada geoservidor (Capítulo I sección 1.3.6), se ha realizado una búsqueda minuciosa en cada geoservidor seleccionado al Nasa Giovanni y USGS Earth Explorer. Para cumplir con los objetivos propuestos en el presente trabajo de investigación se procedió a descargar las imágenes rásters con resoluciones lo más ajustadas posibles, lo cual es aplicable en áreas que engloban parcelas, cuencas y regiones con delimitación media. Además de que, en esta sección de las páginas webs, se observó la posibilidad de descargar datos compatibles con el programa informático que se ha empleado, lo cual fue ArcGIS versión 10.3. La descarga fue extensa y se realizó por cada variable. Debido a su gran tamaño en megabytes, se descargó 60 imágenes satelitales de temperaturas mínimas, 60 de temperaturas máximas y se procesó a través del DEM, 60 imágenes satelitales de radiaciones solares; de este modo, se logró obtener las variables por cada mes por un período de cinco años (2013 al 2017).

- Temperatura mínima
- Temperatura máxima
- DEM (para la radiación solar)

Los rásters fueron descargados en formato zip, el cual es un formato comprimido debido al gran tamaño de megabytes. Se utilizó el programa WinRAR para descomprimir los datos, que luego fueron procesados mediante el software ArcGIS.

Se realizaron búsquedas y análisis de bibliografías referentes al tema de estudio, luego se descargaron datos de temperaturas máximas y mínimas de la plataforma de capas climáticas globales Nasa Giovanni, en una resolución de $0.05 \times 0.05^\circ$ y descargadas de la página: <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/> (Figura 2.12).

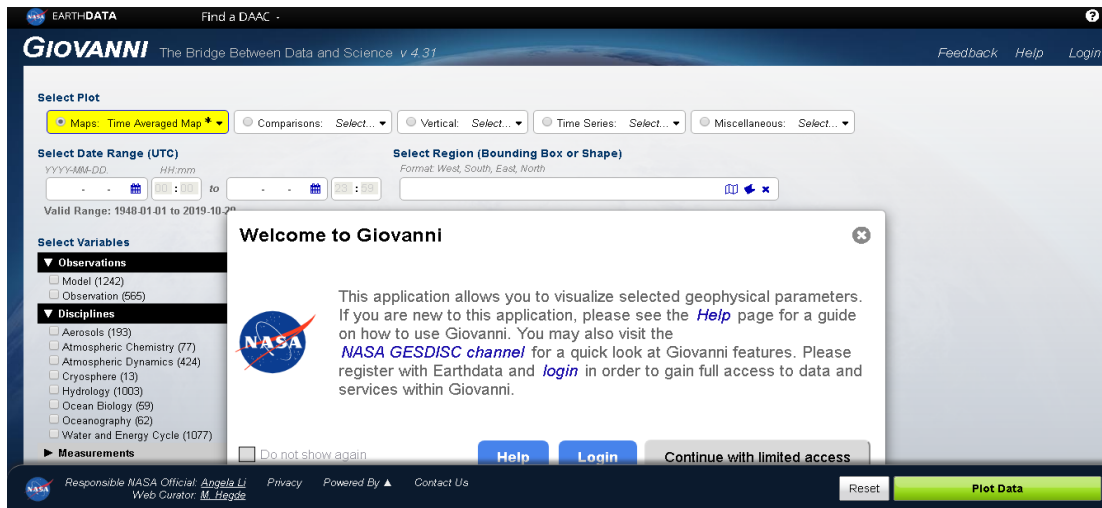


Figura 2.12. Página principal del geoservidor Nasa Giovanni

Fuente: Cita web 7

Se seleccionó el área de estudios (Figura 2.13) y luego los datos requeridos, teniendo en cuenta que solo algunos datos están disponibles para nuestro país. Y con la exigencia de que la resolución debe ser adecuada, luego se eligió el satélite del cual deseamos descargar, en este caso seleccionamos el satélite Modis Terra, puesto que, tiene una resolución de 0.05° (el más conveniente por ser del tamaño de celdas menores) (Figura 2.14). Estos procedimientos se realizaron para las temperaturas máximas y mínimas.

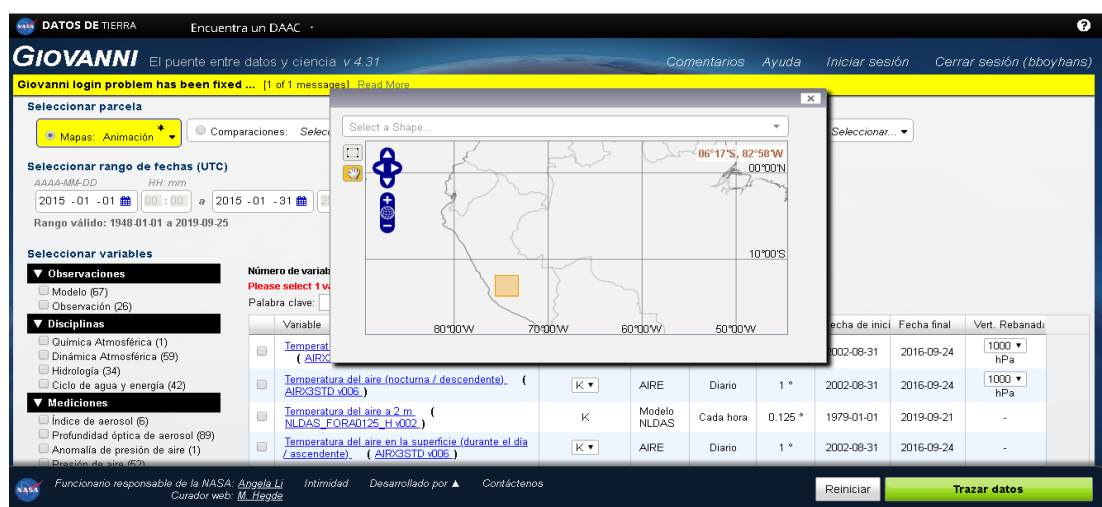


Figura 2.13. Ubicación del área de estudios en el geoservidor Nasa Giovanni

Fuente: Cita web 7



Figura 2.14. Selección de datos del satélite Modis Terra en el geoservidor Nasa Giovanni
Fuente: Cita web 7

Luego se obtuvo una previsualización de lo que se descargó con sus descripciones correspondientes (Figura 2.15).

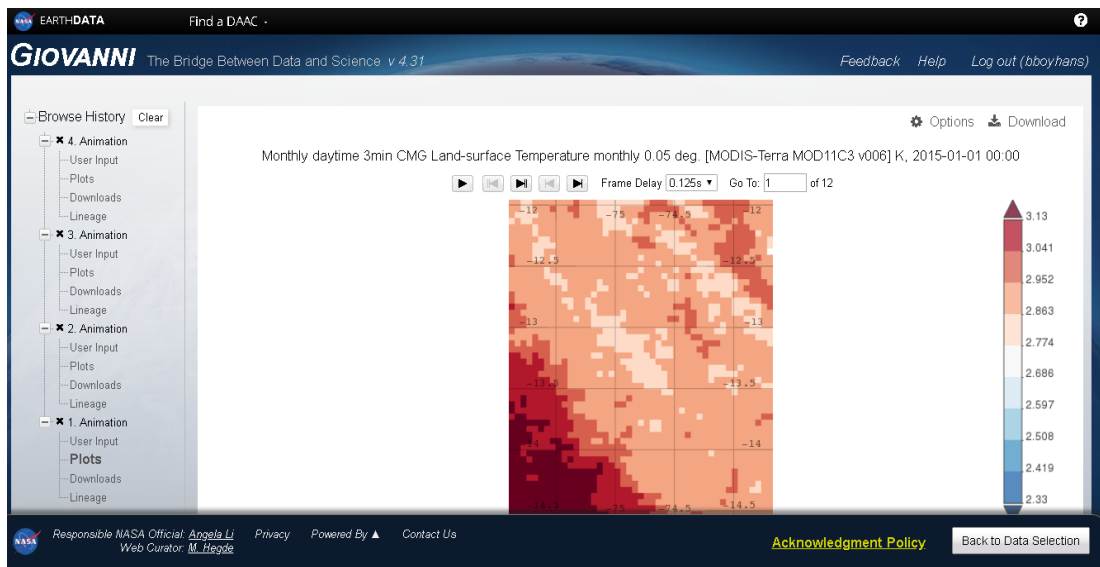


Figura 2.15. Previsualización de los datos del geoservidor Nasa Giovanni
Fuente: Cita web 7

Lo archivos descargados se presentan de la siguiente forma:



g4.subsetted.MOD11C3_006_LST_Day_CMG.20130101.79W_15S_70W_7S.nc



g4.subsetted.MOD11C3_006_LST_Night_CMG.20130101.79W_15S_70W_7S.nc

Cabe mencionar que las imágenes satelitales de la plataforma Nasa Giovanni están disponibles en los formatos: NetCDF, KML o KMZ y GeoTIFF.

Por otra parte, para los datos de radiaciones solares se descargó el DEM de la cuenca Cachi del geoservidor USGS Earth Explorer de la página:

<https://earthexplorer.usgs.gov/>, en la cual primero se seleccionó el área de estudio (Figura 2.16) y luego la opción de elevación digital y el satélite SRTM (Figura 2.17).

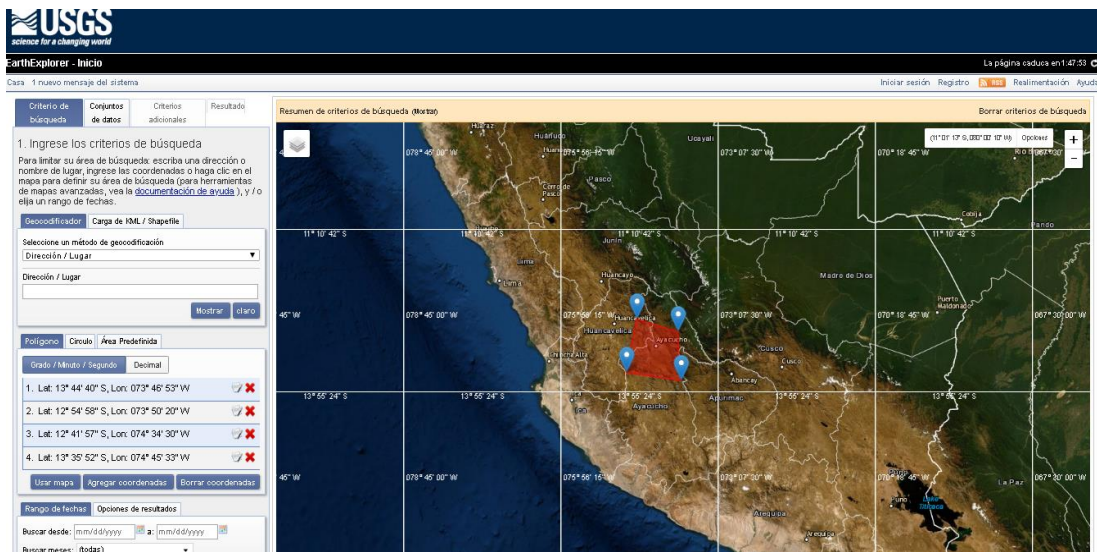


Figura 2.16. Ubicación del área de estudios en el geoservidor USGS Earth Explorer

Fuente: Cita web 8

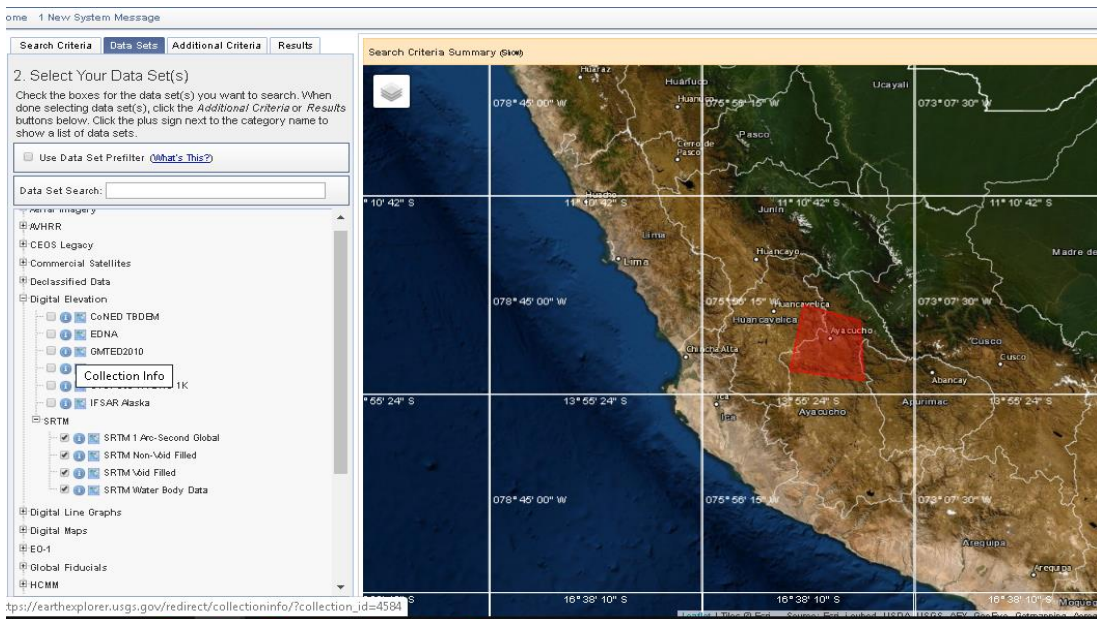


Figura 2.17. Selección del satélite SRTM en el geoservidor USGS Earth Explorer

Fuente: Cita web 8

Este geoservidor nos permitió descargar en resolución de tres arcos segundos que equivalen a 90x 90 m (Figura 2.18), también nos permite en resoluciones menores a las descargadas, pero hay que tener en cuenta que se trabajó con el software ArcGIS y, por lo tanto, no nos permitió procesar de manera adecuada en menores resoluciones. Los datos fueron procesados por la herramienta “Area Solar Radiation” del software ArcGIS 10.3 (Figura 2.19).

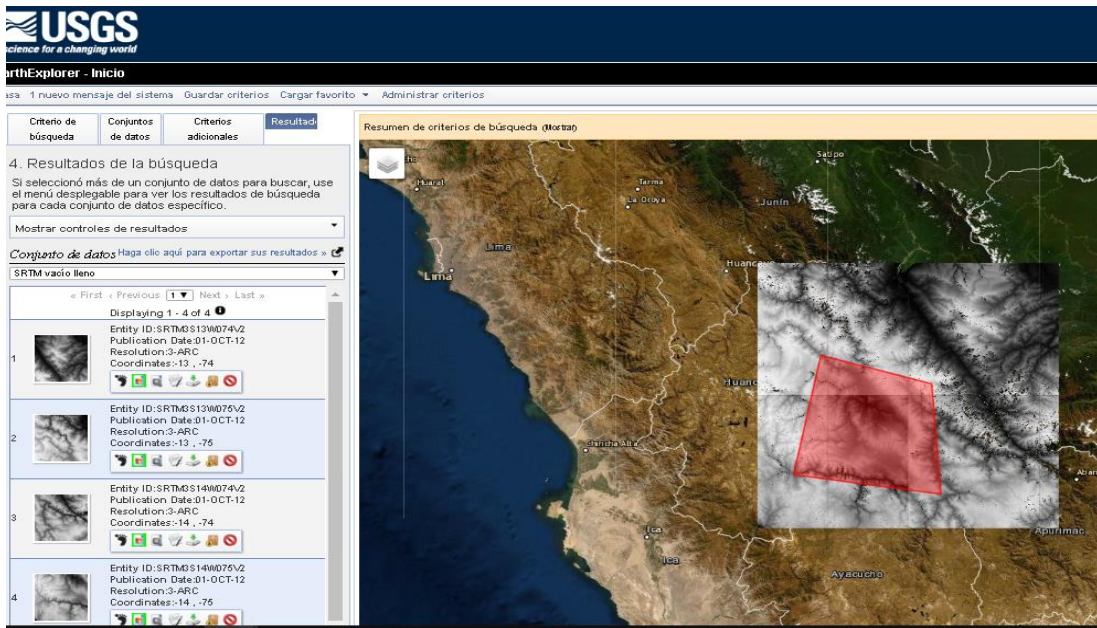


Figura 2.18. Selección de la resolución en el geoservidor USGS Earth Explorer

Fuente: Cita web 8

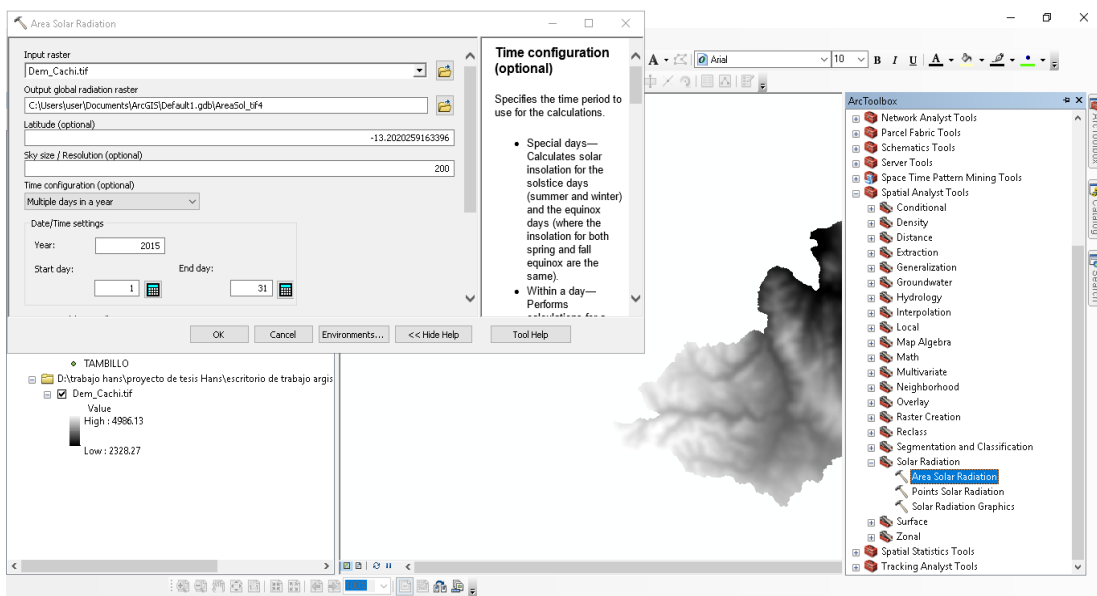


Figura 2.19. Herramienta Área Solar Radiation para obtener la radiación solar

Fuente: Elaboración propia

B. Recarga y preparación de información

Para el procesamiento de datos se utilizó el software ArcGIS 10.3, seguidamente se procedió a cargar las imágenes rásters de las variables y de todos los meses (Figura 2.20), donde la distribución es a nivel del área de estudio, así como mencionan Hijmans et al. (2005), al referirse a los datos climáticos representados en rejillas geoespaciales a nivel espacial. Debido a que se tuvo una información a nivel espacial, fue necesario realizar un procesamiento de datos, lo cual se explicará a continuación.

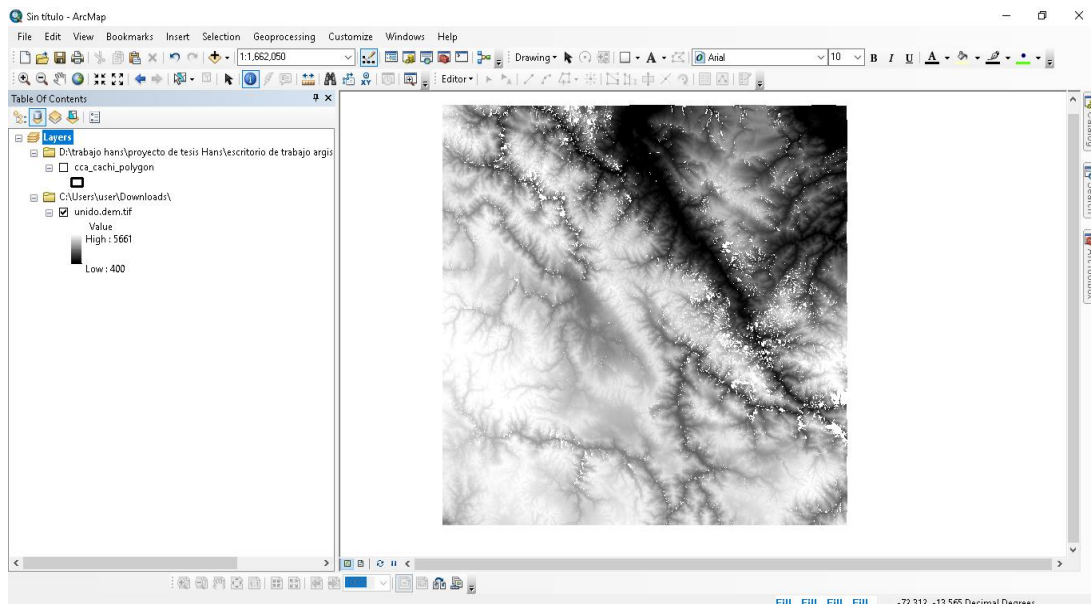


Figura 2.20. DEM cargado a la plataforma del ArcGIS 10.3

Fuente: Elaboración propia

C. Preparación y procesamiento de los datos rasters

Para este subcapítulo se usó la caja de herramientas ArcToolbox del ArcGIS (Figuras 2.21 y 2.22), en el cual se usó la herramienta Projections and Transformations (proyecciones transformaciones), donde se ubica ráster y luego la herramienta Project to ráster (Proyectar a ráster), la cual nos permite georeferenciar los datos descargados, debido a que estaban a nivel mundial y con coordenadas espaciales GCS_WGS_1984. Esto se realizó para los doce datos (de todos los meses) respecto al ámbito de la cuenca Cachi, que pertenece a las coordenadas espaciales WGS 1994 UTM Zone 18S. Luego se trabajó con la herramienta Spatial Analyst Tool (herramienta de análisis espacial), donde se encuentra Extraction (extracción), además, se consideró la herramienta Extract by Mask (extraer por máscara), (Figura 2.22), para recortar los límites de la cuenca en estudio.

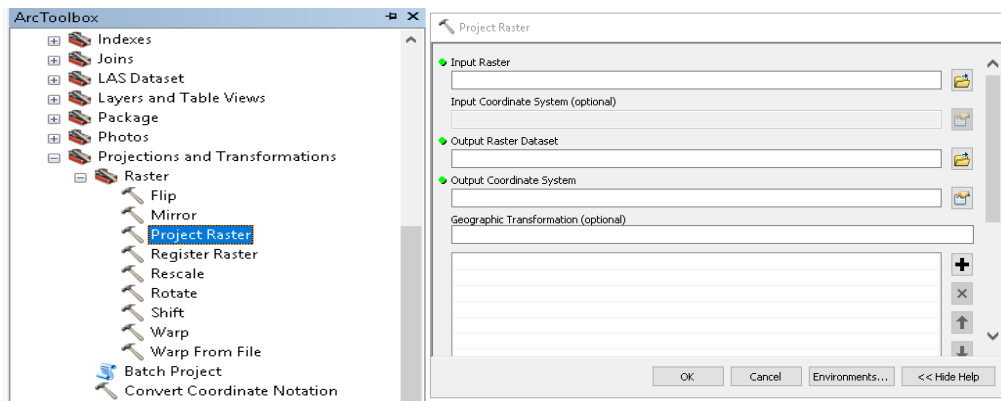


Figura 2.21. Herramienta Project to Ráster para proyectar rásters

Fuente: Elaboración propia

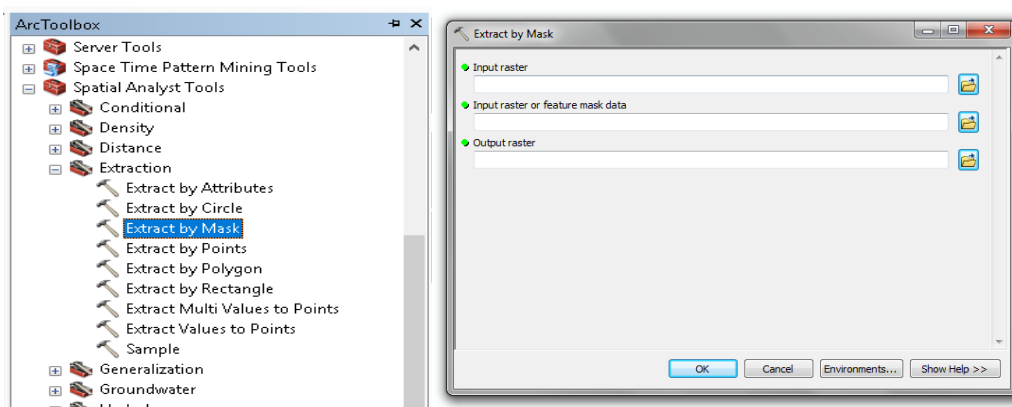


Figura 2.22. Herramienta Extract by Mask con lo que se delimitó el área de trabajo

Fuente: Elaboración propia

Para las temperaturas medias se ha usado la herramienta Ráster Calculator, con la cual se han promediado entre los dos datos rásters (temperaturas máximas y mínimas) (Figura 2.23).

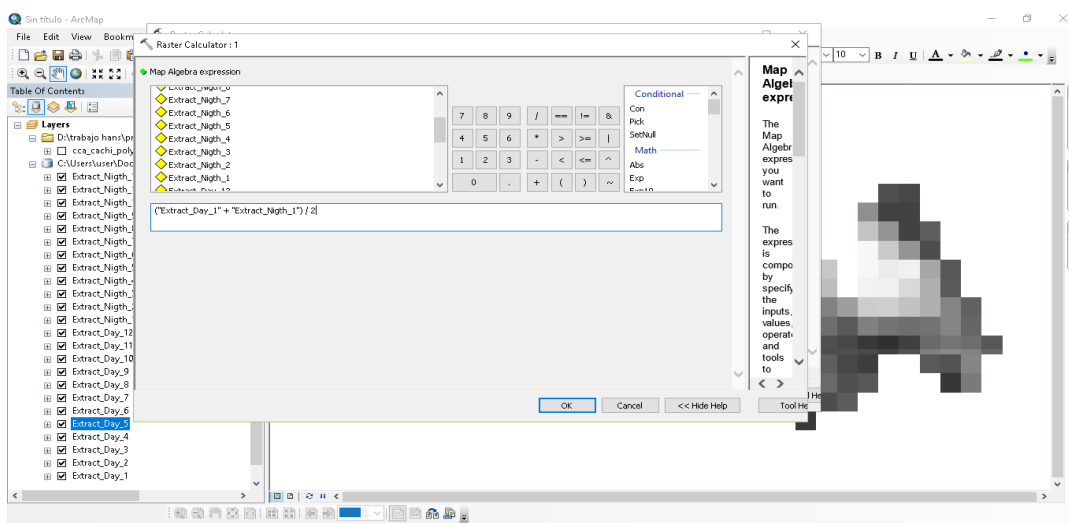


Figura 2.23. Aplicación de la herramienta Ráster Calculator para obtener temperatura media

Fuente: Elaboración propia

Se tomó en cuenta que al descargar los datos de temperaturas se han obtenido en grados Kelvin, por lo tanto, se ha usado la herramienta Ráster Calculator (Figuras 2.24 y 2.25), para convertirlos a grados Fahrenheit con la ecuación 2.2, que es requisito para la aplicación de la ecuación de Hargreaves en base a la radiación.

$$\left((K - 273.15) * \frac{9}{5} \right) + 32 = \text{°F} \quad \dots\dots\dots(\text{Ec. 2.2})$$

Dónde:

K: Dato en grados Kelvin.

°F: Dato en grados Fahrenheit.

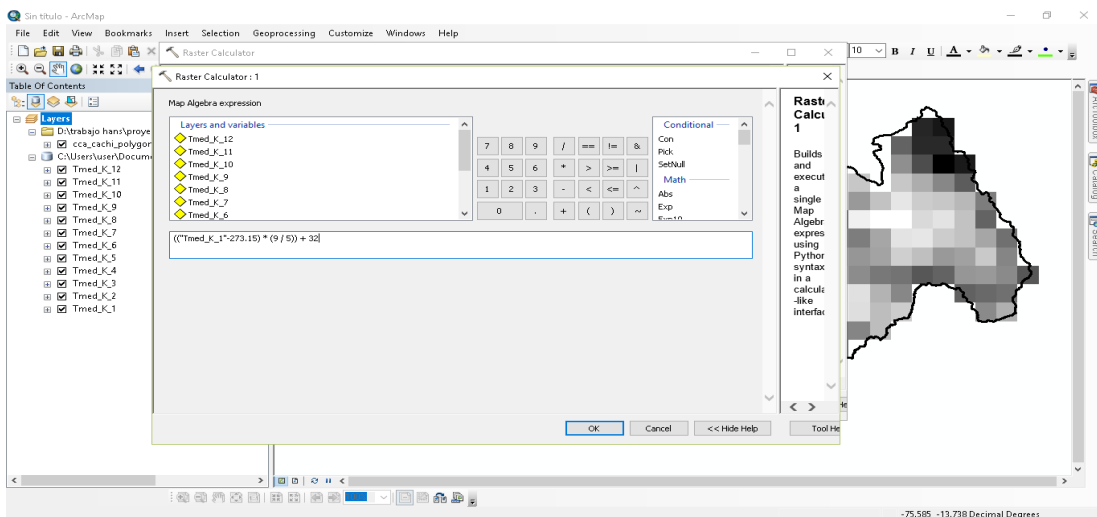


Figura 2.24. Aplicación de herramienta Ráster Calculator para cambiar unidad de temperatura
Fuente: Elaboración propia

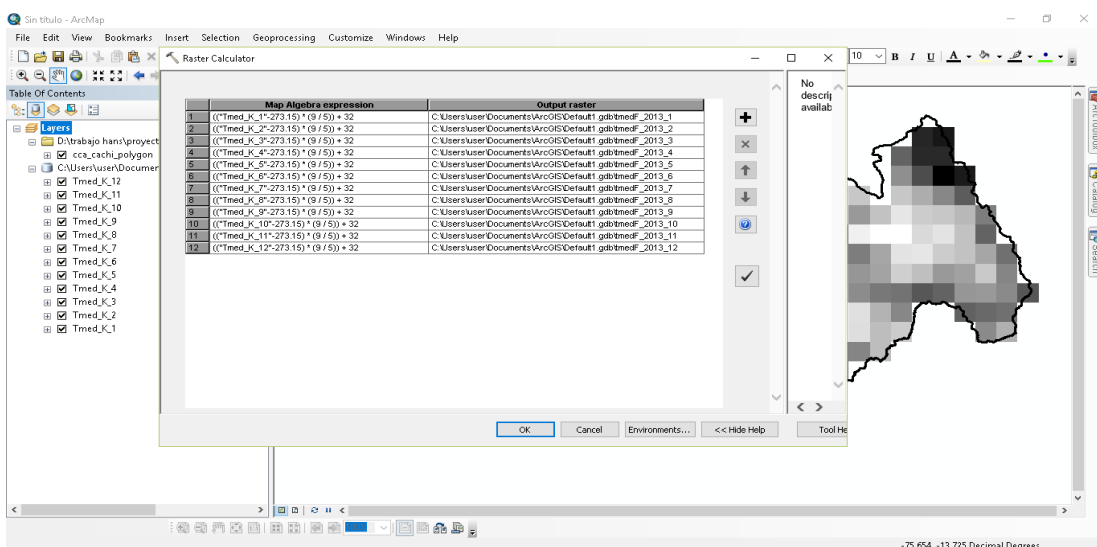


Figura 2.25. Aplicación de la herramienta Batch - Ráster Calculator
Fuente: Elaboración propia

Para la variable de radiación solar se ha usado el DEM de la cuenca Cachi y la herramienta Spatial Analyst Tool (Herramienta de Análisis Espacial) donde se encuentran Solar Radiation y Area Solar Radiation, los cuales son herramientas del ArcGIS que nos permiten calcular la radiación solar a nivel espacial de un área determinada, seleccionando así el año y la fecha de inicio y fin (Figura 2.26).

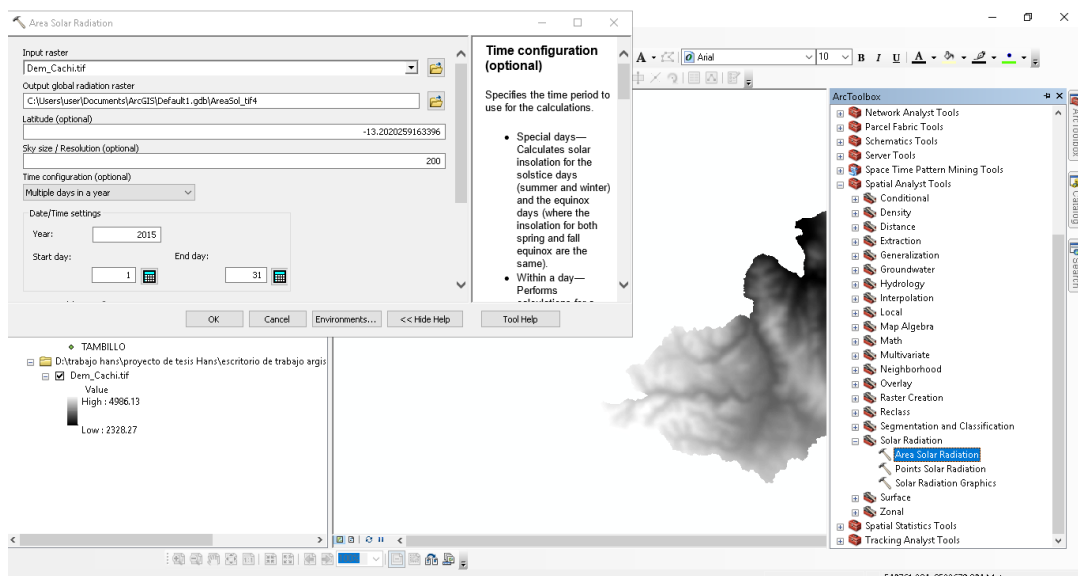


Figura 2.26. Aplicación de la herramienta Area Solar Radiation

Fuente: Elaboración propia

D. Estimación de la evapotranspiración potencial a través de información satelital

Con los datos obtenidos del Nasa Giovanni y USGS Earth Explorer, previamente procesados se continuó con la estimación de la evapotranspiración potencial.

Se empleó Map Algebra (Algebra de Mapas), lo que nos permitió realizar cálculos matemáticos con las imágenes ráster obtenidas (Figura 2.27), y así se obtuvieron las evapotranspiraciones potenciales mensuales, para cada año logrando los objetivos planteados.

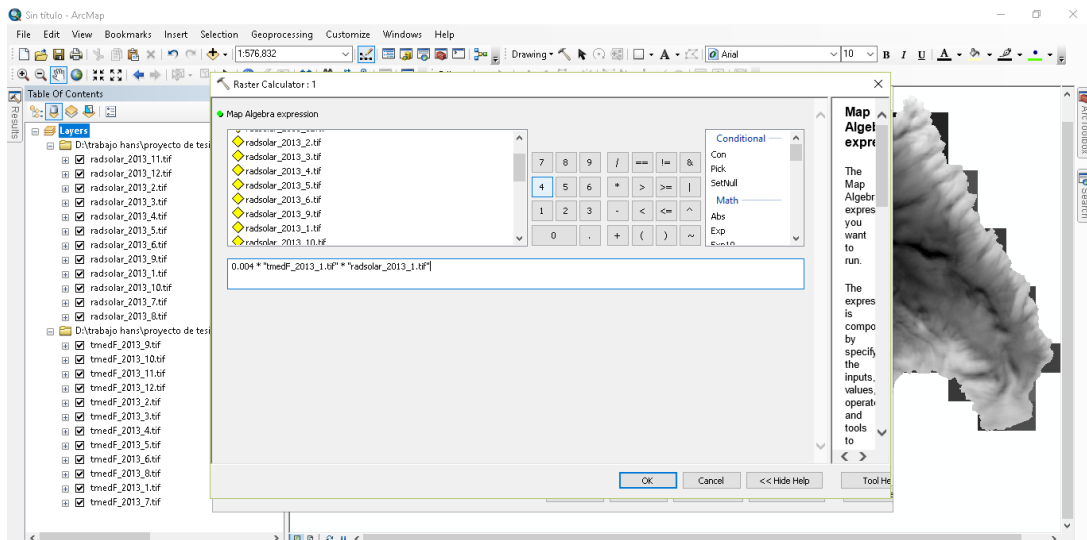


Figura 2.27. Estimación de evapotranspiración potencial con la herramienta Raster Calculator

Fuente: Elaboración propia

2.3.2. ¿En la cuenca Cachi no se ha realizado un estudio de la identificación de los mejores métodos indirectos para estimar la evapotranspiración?

2.3.2.1. Identificación y selección de los métodos indirectos para estimar la evapotranspiración en la cuenca Cachi

Se calculó la evapotranspiración potencial utilizando los métodos: tanque evaporímetro Clase A, FAO Penman Monteith, Hargreaves en base a datos registrados de radiación solar y Hargreaves en base a datos de temperatura. Para el cálculo de la evapotranspiración potencial con las distintas ecuaciones se utilizaron los datos climáticos registrados en la Estación Meteorológica del INIA, pertenecientes a la cuenca Cachi, para lo cual se solicitó los datos al Gobierno Regional, a la oficina de OPEMAN, institución encargada del resguardo de la información meteorológica en el ámbito de la cuenca Cachi. Los criterios para identificar y seleccionar los métodos antes mencionados son los siguientes:

- Se eligió el método del tanque evaporímetro Clase A, debido a que es un método semiempírico; pues estima la evapotranspiración potencial al multiplicar la evaporación y el coeficiente del tanque K_p ; para encontrar el K_p se utilizan las velocidades del viento y humedades relativas, los cuales se obtuvieron de la Estación Meteorológica del INIA además que está recomendado por la FAO.
- Se eligió la ecuación de FAO Penman Monteith, debido a que es considerado como el método estándar para el cálculo de la evapotranspiración potencial en base a la

información meteorológica. De acuerdo a la última publicación de la FAO: evapotranspiración del cultivo FAO - 56, el método de FAO Penman Monteith se recomienda como el único método para determinar la evapotranspiración potencial.

- Al respecto, Núñez (2010) concluye que el método de Hargreaves es el más recomendable para la sierra peruana. Pues en su trabajo utilizó la ecuación de Hargreaves en base a la radiación extraterrestre.
- Por su parte, De la Torre et al. (2009) determinan que los métodos Hargreaves por radiación, Hargreaves en base a la temperatura y Penman Monteith FAO describen una variación similar al descrito utilizando el método del tanque evaporímetro Clase A. Los métodos de Hargreaves en base a radiación extraterrestre, Thornthwaite y Serruto muestran divergencias. Como se podrá concluir, el método del tanque evaporímetro Clase A nos da una idea de la variación del fenómeno de la evapotranspiración potencial, lo que sirve para seleccionar el método para calcular la evapotranspiración potencial. En este caso el método de FAO Penman Monteith es el seleccionado, por dar resultados similares a la del tanque evaporímetro Clase A.
- Así mismo, Olarte (1987) recomienda la ecuación de Hargreaves en base a la radiación, y es por ello que se ha elegido como un método más para esta investigación.

Para este subcapítulo se realizó el trabajo de campo en el que se visitó la Estación Meteorológica del INIA, que se detalla a continuación:

Fase de campo

En esta fase se redacta todo lo realizado fuera de gabinete para conseguir los objetivos planteados.

- Se visitó la Estación Meteorológica del INIA, perteneciente a la cuenca Cachi, con el fin de observar y corroborar el funcionamiento de cada instrumento meteorológico y que no haya carencia de datos registrados los cuales son indispensables para el presente trabajo, que se evidencia a través de la visita (Figura 2.28).



Figura 2.28. Visita a la estación meteorológica del INIA

Fuente: Elaboración propia

- Con el apoyo de la representante de la estación del INIA, se comprobó la operatividad y funcionamiento de cada instrumento meteorológico (Figura 2.29 y anexo D).



Figura 2.29 Instrumentos meteorológicos de la estación del INIA

Fuente: Elaboración propia

- Una vez realizada la comprobación del buen funcionamiento y la operatividad de los equipos meteorológicos, se procedió a la recopilación de la información respectiva, información confiable. Al respecto, Conde (2018) afirma que el registro de las demás estaciones meteorológicas analizadas en la cuenca Cachi presentan subestimación exceptuando la estación del INIA para el período de 2014 - 2016.
- Se elaboraron solicitudes al Gobierno Regional de Ayacucho - OPEMAN, institución encargada de administrar dicha estación meteorológica (Anexo E).
- Se midió y se comprobó la distancia a barlovento, la cual cambia la cobertura (dato necesario para la estimación de la evapotranspiración potencial por el método de tanque evaporímetro Clase A), el cual mide 100 m de cultivo verde de poca altura (Figura 2.30) y fue corroborado por la ingeniera responsable de la estación.



Figura 2.30. Medición de la distancia a barlovento en la estación del INIA

Fuente: Elaboración propia

Ya identificados los métodos y obtenido los datos meteorológicos de la estación del INIA, se procedió a la estimación de la evapotranspiración potencial por los métodos convencionales que se detallan a continuación.

A. Métodos para estimar la evapotranspiración potencial

a. Método del tanque evaporímetro Clase A

La evapotranspiración potencial también se puede obtener de la evaporación del tanque evaporímetro Clase A. Los tanques han probado su uso práctico y han sido utilizados con éxito para estimar la evapotranspiración potencial observando la evaporación del

tanque y aplicando coeficientes empíricos para relacionar la evaporación del tanque con la evapotranspiración potencial. Sin embargo, para la aplicación de este método se deben considerar ciertas precauciones y debe estar garantizado un óptimo manejo del tanque (Allen et al., 2006).

Los métodos apoyados en la evaporación del tanque copian las limitaciones de estimar la evapotranspiración potencial basándose en datos de evaporación libre del agua. Estos métodos son vulnerables a las condiciones microclimáticas bajo las cuales los tanques están funcionando y al rigor de mantenimiento de la estación (Allen et al., 2006).

Se ha elegido este método puesto que se cuenta con datos meteorológicos de evaporación, lo cual no es una limitante para el uso de este método como lo anuncia el párrafo anterior.

$$ET_o = K_p * E_{pan} \dots\dots\dots(Ec. 2.3)$$

Dónde:

ET_o: Evapotranspiración de potencial (mm/día).

K_p: Coeficiente del tanque evaporímetro.

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

b. Método de FAO Penman Monteith

Dado a los mejores resultados y consistencia del método FAO Penman Monteith en el ámbito mundial, este es el único que se recomienda como método estándar de cálculo. Esto es debido a que existe una alta probabilidad de que este método prediga óptimamente los valores de evapotranspiración potencial en una extensa gama climática y geográfica y cuenta con previsiones para su empleo en situaciones de escasez de datos (Allen et al., 2006).

Recientemente, la FAO 56 adoptó la ecuación de Penman Monteith para el cálculo de la evapotranspiración potencial del cultivo de referencia. La ecuación es la siguiente:

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \left(\frac{900}{T + 273} \right) u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \dots\dots\dots(Ec. 2.4)$$

Dónde:

ETo: Evapotranspiración potencial (mm/día)

Rn: Radiación neta en la superficie del cultivo ($\text{MJ}/\text{m}^2/^\circ\text{C}$)

Ra: Radiación extraterrestre ($\text{MJ}/\text{m}^2/^\circ\text{C}$)

G: Flujo del calor de suelo ($\text{MJ}/\text{m}^2/^\circ\text{C}$)

T: Temperatura media del aire a 2 m de altura ($^\circ\text{C}$)

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

es: Presión de vapor de saturación (kPa)

ea: Presión real de vapor (kPa)

es - ea: Déficit de presión de vapor (kPa)

Δ : Pendiente de la curva de presión de vapor ($\text{kPa}/^\circ\text{C}$)

γ : Constante psicométrica ($\text{kPa}/^\circ\text{C}$)

c. Método de Hargreaves en base a datos de radiación solar equivalente y en base a la temperatura

Se han elegido estos métodos debido a las recomendaciones descritas en las bibliografías revisadas, las cuales aprueban bajo buenos resultados la estimación de la evapotranspiración potencial y se mencionan a continuación.

- El método de Hargreaves que ha producido resultados razonables de evapotranspiración potencial con cierta validez global (Allen et al., 2006).
- La ecuación 2.5, la misma que ha sido comparada experimentalmente con ensayos de cultivos de pastos en lisímetros en dos localidades de la sierra: Huayao en Huancayo y Weberbauer en Cajamarca, por el ingeniero Abelardo de la Torre V. del programa de asistencia técnica CID - ATA/ CLASS del Plan Meris I en 1978, de cuyas conclusiones y recomendaciones se ha derivado la aptitud del método a desarrollar (Olarde, 1987).

La cuenca Cachi pertenece a la sierra peruana, por eso, se ha elegido el método de Hargreaves en base a datos de radiación solar equivalente, ya que las comparaciones experimentales anteriormente mencionadas también se han realizado en la sierra peruana.

Las ecuaciones son:

- **En base a datos de radiación solar equivalente**

$$ETP = 0.004 \times TMF \times R_s \dots\dots\dots(Ec. 2.5)$$

Dónde:

ETP: Evapotranspiración potencial (mm/mes)

TMF: Temperatura media mensual (°F)

R_s: Radiación solar media mensual (cal/cm²/día) (piranómetros)

La mayoría de estaciones meteorológicas en nuestro país no están implementadas de piranómetros; por esta razón, la falta de datos es una limitante para el cálculo de la evapotranspiración potencial por este método. Una manera práctica de determinar la radiación solar es a través de la aplicación de la ecuación de Angstrom, que relaciona la radiación solar con la radiación extraterrestre y la duración relativa de la insolación:

$$R_s = \left(0.25 + 0.50 * \left(\frac{n}{N} \right) \right) * R_a \dots\dots\dots(Ec. 2.6)$$

Dónde:

R_s: Radiación solar media mensual (cal/cm²/día)

n: Duración real de la insolación (horas) (heliógrafo)

N: Duración máxima diaria media de las horas de fuerte insolación posible de la insolación (horas) (Anexo A, Tabla A.4)

n/N: Duración relativa de la insolación.

R_a: Radiación extraterrestre (cal/cm²/día) (Anexo A, Tablas A.2 y A.3).

- **Hargreaves en base a la temperatura**

$$ET_o = MF * TMF * CH * CE \dots\dots\dots(Ec. 2.7)$$

Dónde:

ET_o: Evapotranspiración potencial (mm/mes)

MF: Factor mensual de latitud, se (Anexo A, Tabla A.5)

TMF: Temperatura media mensual (°F), medida

CH: Factor de calibración para la humedad relativa

CE: Factor de calibración para la altura o elevación del lugar

B. Software PETP 2.0 para calcular la evapotranspiración potencial

PETP 2.0 es un software trabajado en el año 2016, por el ingeniero agrícola César Vidal Gutiérrez Ninahuamán, cuyo fin es calcular la evapotranspiración potencial en base a datos de estaciones meteorológicas y mediante varios métodos empíricos:

- Método de Thorntwaite
- Método de Hargreaves
- Método de Chirstiansen
- Método de Penman Monteith
- Método de Penman modificado
- Método de Turc
- Método de Jersen Haise
- Método de Stephens - Stewart
- Método de Linacre
- Método de Papadakis
- Método de Blaney - Criddle
- Método de radiación
- Método de Serruto
- Método de Priestley - Taylor
- Método de Makkink
- Método de Valiantzas
- Método de García - López

Para el uso de este software, primero se almacena información básica, como es la ubicación política y geográfica de la zona de estudio (Figura 2.31).

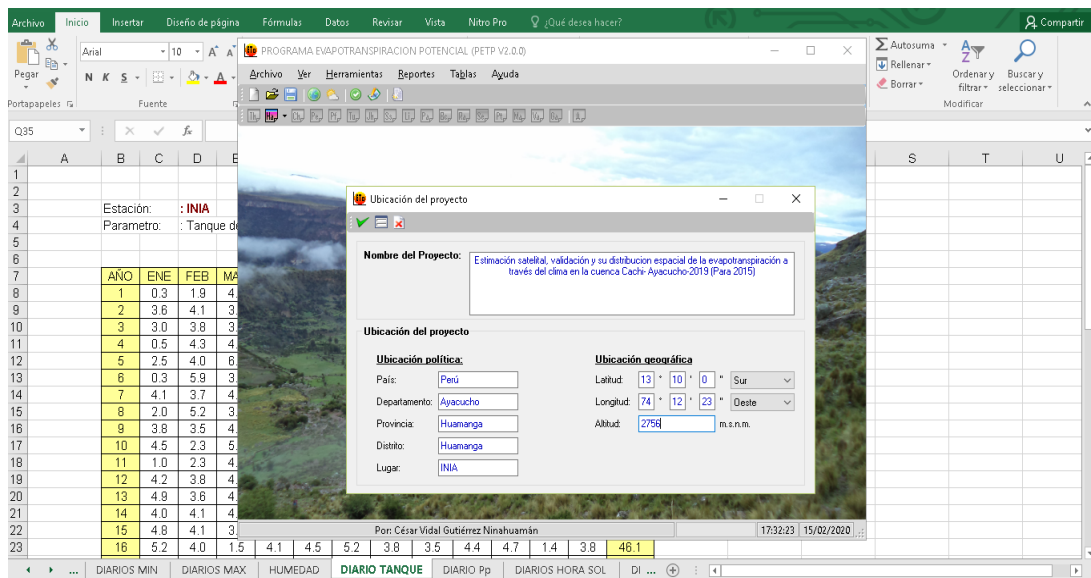


Figura 2.31. Ubicación política y geográfica en PETP V.2.0

Fuente: Gutiérrez (2016) y elaboración propia

Luego se ingresaron los datos meteorológicos necesarios: número de días por mes, temperaturas medias, mínimas y máximas, horas de sol, humedades relativas y velocidades del viento (Figura 2.32).

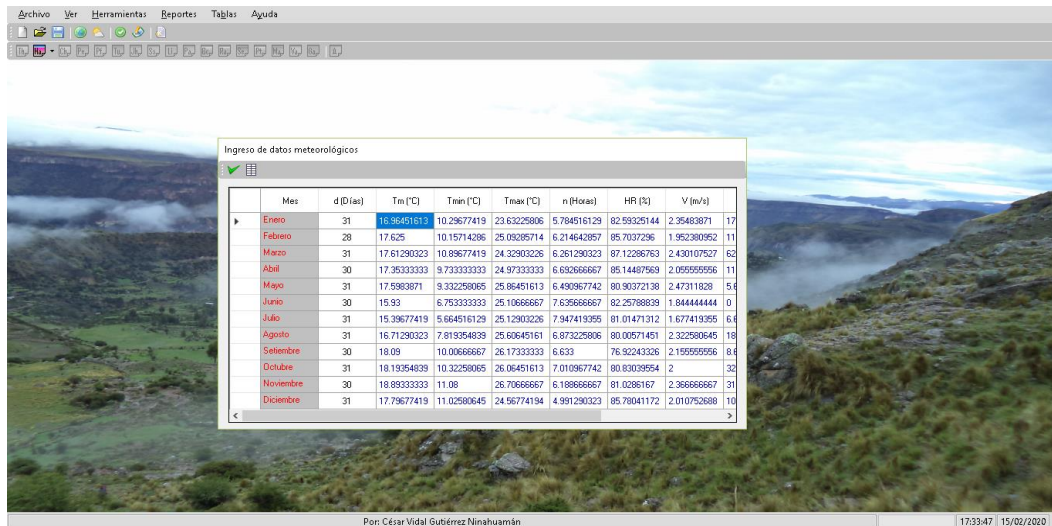


Figura 2.32. Datos meteorológicos en PETP V.2.0

Fuente: Gutiérrez (2016) y elaboración propia

2.3.3. ¿Es necesario que en la investigación se garanticen los resultados obtenidos de evapotranspiración de las estimaciones satelitales con el ajuste y la validación del modelo?

2.3.3.1. Métodos para ajustar y validar los resultados

A. Calibración lineal de los resultados

Se procedió a calibrar los resultados de la estimación satelital de evapotranspiración potencial mediante la regresión simple, utilizando los resultados promedios multianuales obtenidos por los métodos convencionales. Obteniendo coeficientes de ajuste de intercepción y pendiente para emplearlos en la siguiente ecuación:

$$ETo \text{ corregida} = \text{pendiente} \times ETo \text{ satelital} + \text{intersección} \quad \dots\dots\dots(\text{Ec. 2.8})$$

Donde la variable “Y” representa los valores de ETo corregida, y “X” representa los valores de ETo por el método satelital.

La ecuación anterior es también empleada por Conde (2018) y Aguilera (2018) en sus respectivas tesis.

Una vez calibrado y obtenido los valores de los coeficientes, se ha generalizado y aplicado a todos los mapas temáticos - satelitales de evapotranspiración potencial (Figura 2.33) obtenidos en una fase inicial; así, se generaron nuevas distribuciones espaciales corregidas para cada año con sus respectivos meses.

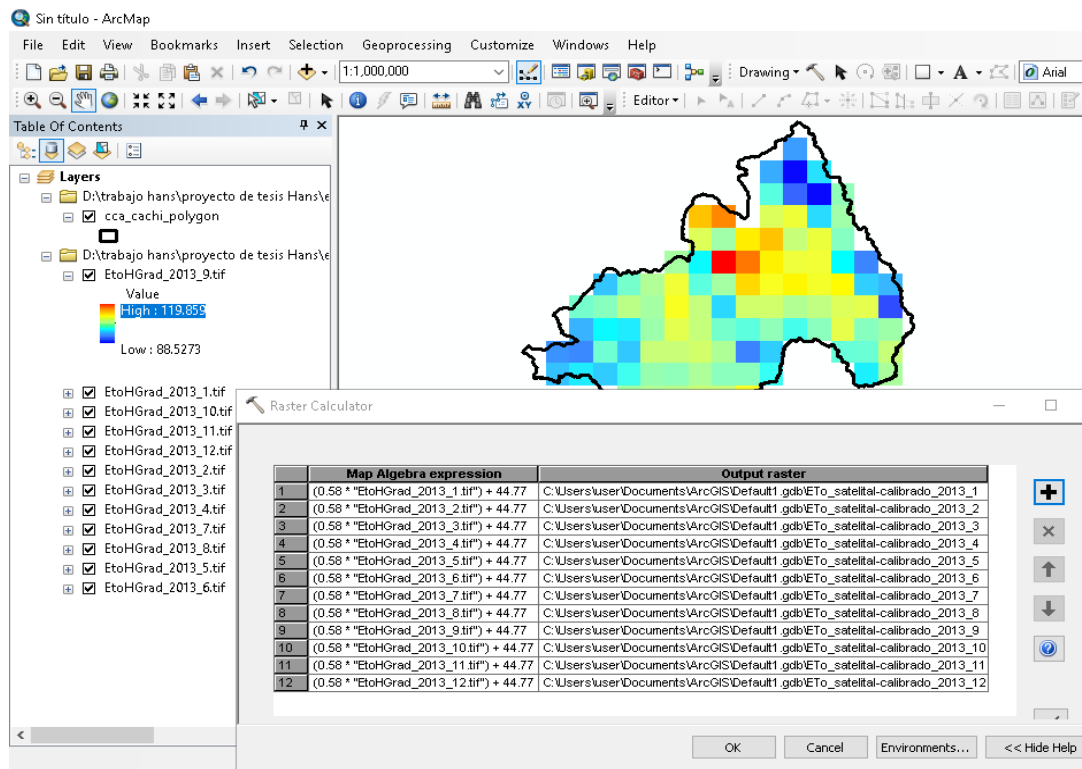


Figura 2.33. Aplicación de los coeficientes de calibración en los mapas satelitales

Fuente: Elaboración propia

B. Validación de los resultados

Se evaluó la precisión y el desempeño de las imágenes rásters obtenidas como estimación de la evapotranspiración potencial; se elaboró una matriz de dos columnas: evapotranspiración potencial con métodos convencionales O_i (variable X) y evapotranspiración potencial con método satelital P_i (variable Y). Este procedimiento se repitió con los datos de los 12 meses y para cada año. Para ello se calculó los siguientes índices estadísticos: Número de Nash - Sutcliffe (NSE), Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE), Error Porcentual Absoluto Medio (MAPE), Índice de concordancia (d), Coeficiente de correlación (r) e Índice de confianza (c) (Tabla 2.12), y que representan cuánto los valores de evapotranspiración potencial estimados por la forma satelital se ajustan a los valores obtenidos por los métodos empíricos. Para el Índice de confianza, el valor 1 indica una concordancia perfecta, mientras que, valores de 0 indican una mala concordancia (Lujano et al., 2019, cita a Legates y McCabe, 1999).

El NSE clasifica la relación del método satelital frente a los métodos convencionales. Sus criterios de interpretación se presentan en la tabla 1.5.

El Índice de confianza se utilizó para clasificar la relación entre cada método con el método satelital, según criterios de interpretación presentado en la tabla 1.6.

Tabla 2.12. Índices estadísticos empleados

Índice	Ecuación	Valor óptimo
Número de Nash - Sutcliffe (NSE)	$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - O)^2} \right]$	1
Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE)	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{N}}$	0
Error Porcentual Absoluto Medio (MAPE)	$MAPE = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{ O_i - P_i }{ O_i }}{N} \times 100$	0
Índice de concordancia (d)	$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (P_i - O + O_i - O)^2} \right]$	1
Coefficiente de correlación lineal (r)	$r = \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - O)(P_i - P)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - O)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (P_i - P)^2}}$	1
Índice de confianza (c)	$c = r \times d$	1

Fuente: Lujano et al. (2019)

Dónde:

O_i: Son datos correspondientes a resultados obtenidos con los métodos convencionales.

P_i: Son datos correspondientes a resultados estimados con métodos satelitales.

O: Es la media de los datos obtenidos con los métodos convencionales.

P: Es la media de los datos estimados con los métodos satelitales.

d: Índice de concordancia.

r: Coeficiente de correlación lineal.

c: Índice de confianza.

Para todos los cálculos posteriores, los datos calculados son considerados como variable X o datos observados (evapotranspiración potencial con métodos convencionales O_i), mientras que los determinados representan la variable Y o datos estimados (evapotranspiración potencial con método satelital P_i). Es importante resaltar que la notación X, Y no indica que una variable sea explicativa, ya que no se busca comprobar una hipótesis de causalidad. Nuestros procedimientos son apreciados en el anexo C.

C. Aplicación de los resultados para calcular la evapotranspiración real en una cédula de cultivos planteados

Se han elegido cultivos característicos de la región: papa, maíz choclo, quinua, trigo, cebada y rye grass inglés; cultivos comunes en el ámbito de la cuenca Cachi. En la tabla 2.13 se aprecia las épocas de siembra y cosecha de algunos cultivos de la región. Estos datos fueron extraídos del perfil técnico del proyecto Instalación del servicio de agua en el sistema de riego por aspersión del comité de usuarios de agua Ccaccañan, de la comunidad de Ccaccañan, distrito de Tambillo, provincia de Huamanga, Región Ayacucho. Teniendo en cuenta que los períodos vegetativos de los cultivos seleccionados son en campaña grande.

Los agricultores de las comunidades de la unidad de riego, conocedores de las fases de desarrollo de los cultivos, tradicionalmente comienzan la siembra entre los meses de setiembre y noviembre, tras el inicio de las primeras lluvias de la estación que, por cierto, son muy escasas en estos meses. Para solventar la demanda de agua durante la etapa inicial de desarrollo del cultivo emplean para el riego el agua proveniente del sistema de riego río Cachi, según la rotación interna de los comités (Vásquez, 2015).

Tabla 2.13. Época de siembra y cosecha para cultivos característicos de la cuenca Cachi

Cultivo	Época de siembra	Época de cosecha
Achita, Kiwicha	Noviembre - diciembre	Abril - mayo
Arveja grano seco	Octubre - enero	Abril - junio
Arveja grano verde	Agosto - setiembre	Enero - febrero
Cebada grano	Noviembre - enero	Mayo - junio
Haba grano seco	Octubre - noviembre	Mayo
Haba grano verde	Octubre - diciembre	Marzo - abril
Maíz amiláceo	Octubre- enero	Mayo - junio
Maíz choclo	Setiembre - noviembre	Febrero - marzo
Papa	Agosto - diciembre	Enero - junio
Quinua	Noviembre - diciembre	Mayo - junio
Trigo	Noviembre - enero	Mayo - junio

Fuente: Vásquez (2015)

La época de siembra que asumen los agricultores para los cultivos es variable, dependiendo de las condiciones climáticas y de cómo se presentaran los inicios de las

temporadas de lluvias. La siembra en el Comité de Usuarios Ccacañan se efectúa en una sola campaña (Tabla 2.13), basado en la estación de lluvias mayormente a secano. El agua de riego se emplea únicamente como complemento para poder salvar las cosechas en caso de producirse los períodos de sequía (Vásquez, 2015).

Para la estimación del Kc se ha seguido la metodología presentada en el libro Manual de riego por gravedad de Olarte (1987), puesto que cuenta con un ejemplo práctico y utiliza la tabla A.8 del anexo A. Dicha tabla se basa en los porcentajes de crecimiento de los cultivos.

Ya obtenidos los Kc ponderados, fueron aplicados en los mapas temáticos de evapotranspiración potencial (calibrados) (Figura 2.34).

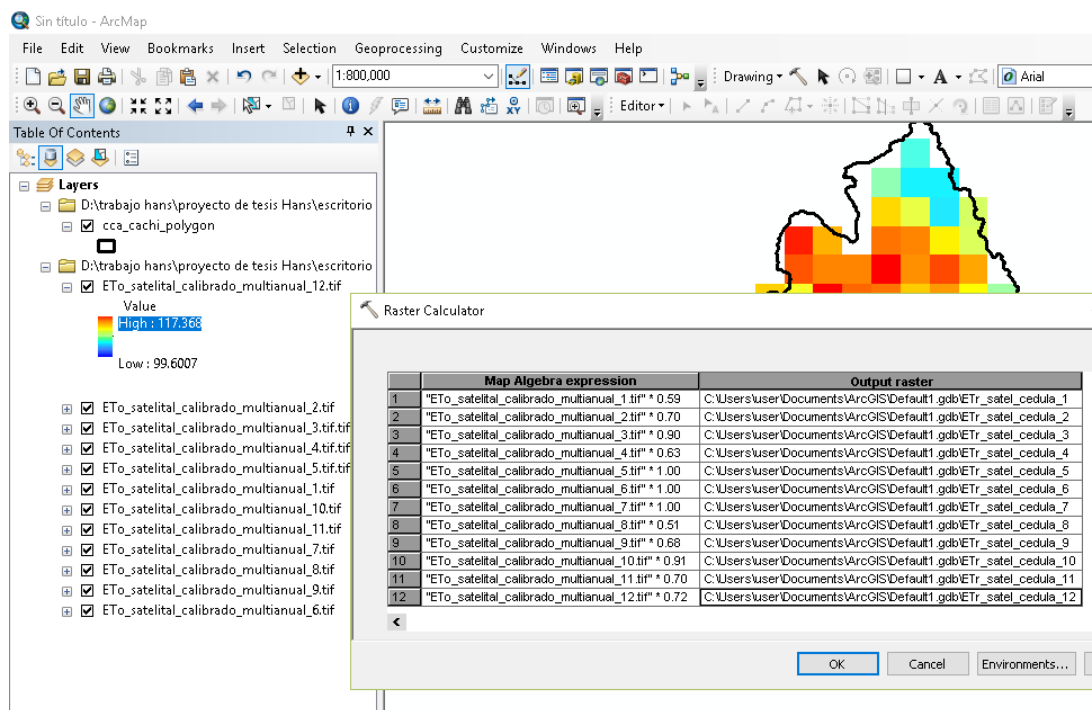


Figura 2.34. Cálculo de distribución espacial de evapotranspiración real para cédula de cultivos

Fuente: Elaboración propia

D. Estimación del a precipitación por los métodos satelitales

Se descargó las imágenes satelitales de precipitación del satélite GPM 3IMERG de la plataforma NASA GIOVANNI (Figuras 2.35 y 2.36).



Figura 2.35. Selección de datos del satélite GPM 3IMERG en el geoservidor Nasa Giovanni

Fuente: Cita web 7



Figura 2.36. Previsualización de datos de precipitación del geoservidor Nasa Giovanni

Fuente: Cita web 7

Se ha recortado y ajustado los datos satelitales de precipitación respecto a la cuenca Cachi con las herramientas del software ArcGIS, similar procedimiento del subcapítulo 2.31, obteniendo precipitaciones promedio para los años 2013 al 2017 a nivel mensual (Figura 2.37).

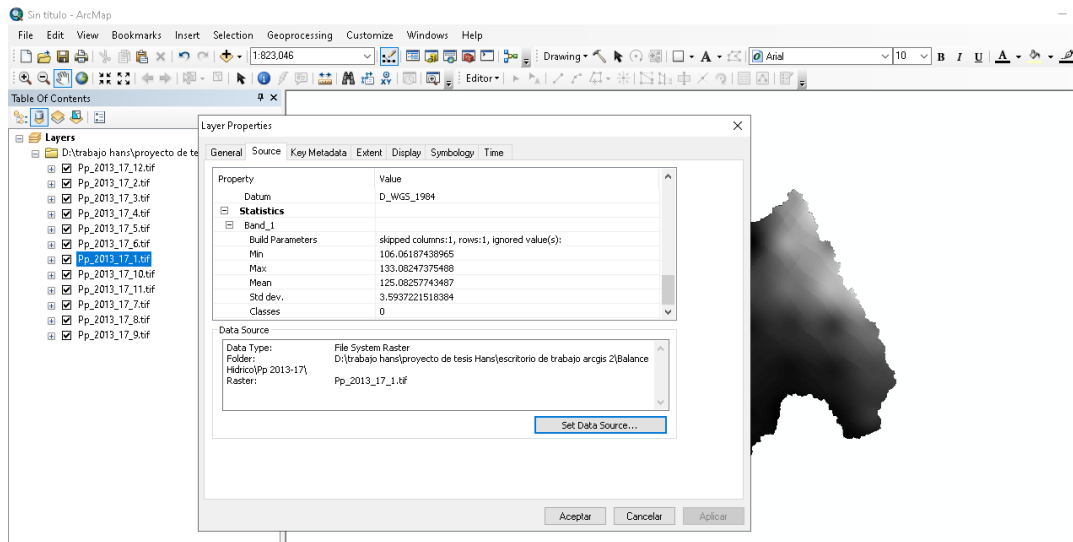


Figura 2.37. Datos de precipitación satelital en el ArcGIS

Fuente: Elaboración propia

E. Balance hídrico

Para el balance hídrico se ha seguido la metodología propuesta por Martelo (1995):

- $Pp \geq ETo$: en este caso hay suficiente agua, la resta entre precipitación y evapotranspiración ($Pp - ETo$) va a almacenarse en el suelo. Esto puede suceder solo hasta el momento en que el contenido de humedad en el suelo llegue a su valor máximo en función del agua que pueden extraer las raíces (capacidad de almacenamiento). Llegado ese momento, la diferencia $Pp - ETo$ se anota como un exceso.
- $Pp \leq ETo$: en este caso la resta $Pp - ETo$ se anota como un déficit. Es decir, en este caso, el cultivo sólo puede gastar lo que entró como precipitación más la cantidad que pueda obtener del suelo, que había quedado almacenada en el momento anterior.

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se exponen los resultados obtenidos en el presente trabajo de investigación y que han permitido obtener los objetivos propuestos. Es decir, la estimación satelital y distribución espacial de evapotranspiración a través de la ecuación empírica seleccionada mediante los datos satelitales, la estimación de evapotranspiración por los métodos convencionales identificados y seleccionados, y el respectivo ajuste y validación mediante los índices estadísticos del método satelital frente a los métodos convencionales seleccionados para la cuenca Cachi.

3.1. Estimación satelital y distribución espacial de evapotranspiración a través de la ecuación empírica seleccionada

En base a la bibliografía de diversos autores y a los datos requeridos por cada método (Capítulo II, sección 2.3.1), se seleccionó el método de Hargreaves en base a datos registrados de radiación solar para estimar la evapotranspiración mediante los datos satelitales.

3.1.1. Datos para la estimación satelital de evapotranspiración potencial

Los datos requeridos para las ecuaciones de Hargreaves en base a datos registrados de radiación solar son la temperatura media y la radiación solar, los cuales son obtenidos de los geoservidores Nasa Giovanni y USGS Earth Explorer, respectivamente, para luego ser procesados y ajustados al área de la cuenca Cachi. A través de la plataforma ArcGIS y sus diversas herramientas de trabajo se ha elaborado mapas temáticos, mensuales y para cada año de temperaturas medias y radiaciones solares, en unidades °F y cal/cm²/día, respectivamente, con su distribución espacial a lo largo del área de la cuenca Cachi (Figura 3.1). Resaltando que para la radiación solar se ha usado la herramienta Area Radiation Solar, obteniendo así mapas temáticos mensuales y para cada año de radiación solar, con su distribución espacial a lo largo del área de la cuenca.

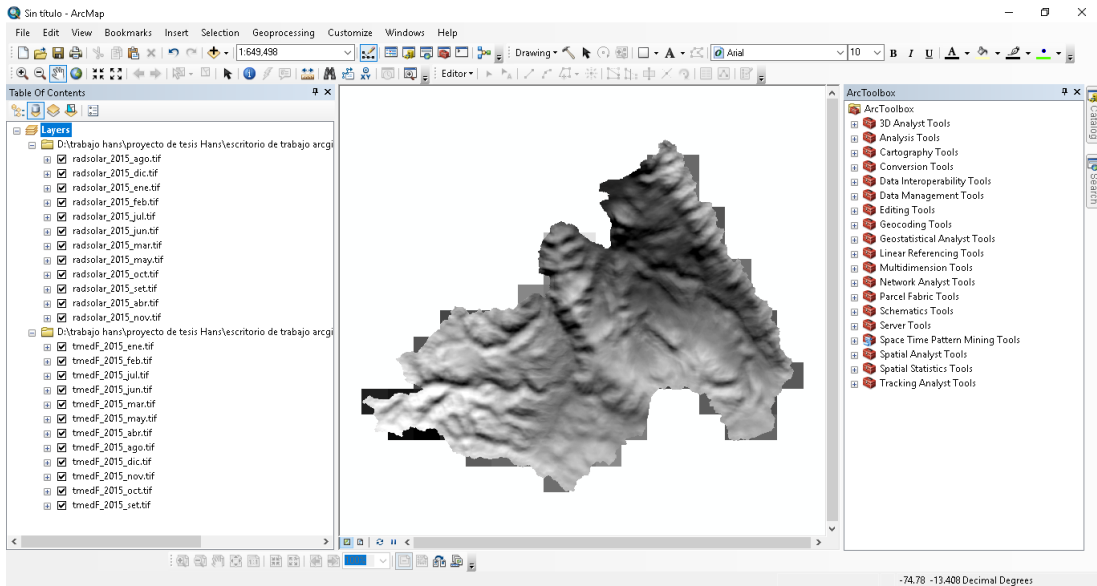


Figura 3.1. Imágenes rásters de temperatura media y radiación solar distribuidos espacialmente en la cuenca Cachi - Fuente: Elaboración propia

Se observan mapas temáticos de temperatura media y radiación solar distribuidos espacialmente al largo de la cuenca Cachi, a nivel mensual y en formato TIFF requerido por el software ArcGIS (Figura 3.1). Mediante la ecuación de Hargreaves en base a datos registrados de radiación solar y plasmada en la herramienta Map Algebra de la interfaz ArcGIS se ha obtenido mapas temáticos de evapotranspiración potencial a lo largo del área de la cuenca Cachi (Figura 3.2).

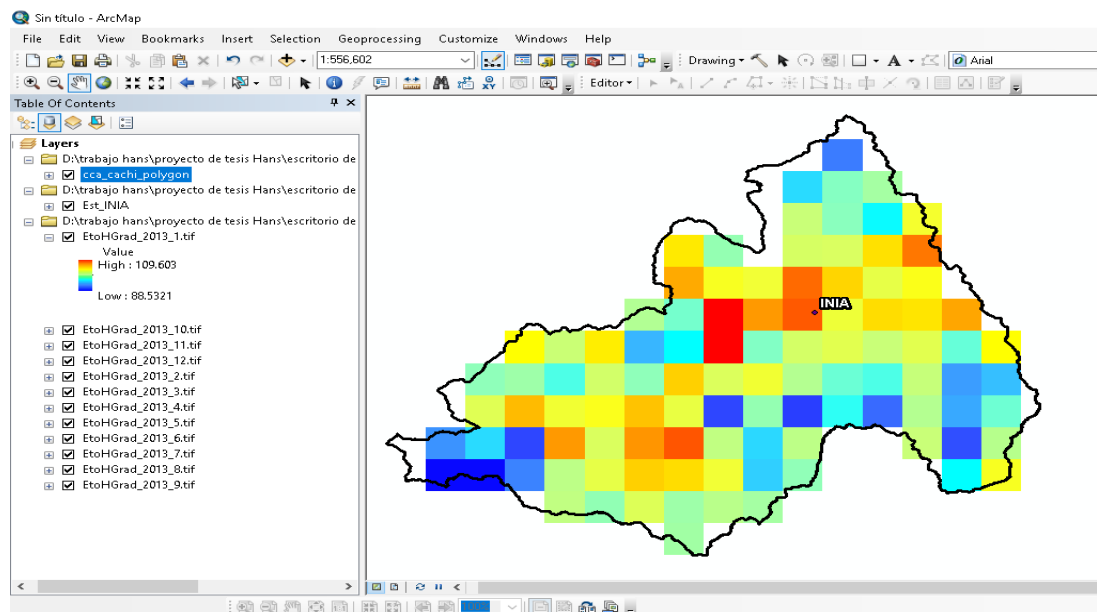


Figura 3.2. Imagen ráster de la evapotranspiración potencial distribuido espacialmente en la cuenca Cachi - Fuente: Elaboración propia

Se aprecia resultados de evapotranspiración potencial distribuidos espacialmente en cuenca Cachi a nivel mensual y delimitado por valores máximos (High) y mínimos (Low) de evapotranspiración potencial a nivel mensual. De los mapas temáticos, se extrajeron valores de evapotranspiraciones potenciales para el punto de estación conocida, y luego fueron comparados con los resultados de los métodos convencionales. El punto pertenece a la estación del INIA, con su coordenada UTM: 13° 10' 00.06" S, 74° 12' 22.92" W, y se ha ubicado en el pixel correspondiente en las imágenes rásters de enero a diciembre de los años 2013 al 2017 (Figura 3.2).

3.1.2. Evapotranspiración potencial satelital con ArcGIS 10.3

Con el método satelital se han obtenido valores de evapotranspiraciones potenciales mensuales y para cada año (2013 a 2017), los cuales se muestran en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Estimación satelital de la evapotranspiración potencial promedio mensual, para los años 2013 a 2017

Meses	2013		2014		2015		2016		2017	
	mm/día	mm/mes	mm/día	mm/mes	mm/día	mm/mes	mm/día	mm/mes	mm/día	mm/mes
Enero	3.45	106.80	4.19	129.87	3.98	123.33	3.85	119.26	3.18	98.61
Febrero	3.23	90.43	3.96	110.99	4.25	119.01	3.68	106.70	3.46	96.88)
Marzo	3.00	92.93	4.02	124.74	4.47	138.54	3.52	109.18	3.08	95.33
Abril	3.24	97.10	4.05	121.42	3.64	109.10	3.25	97.41	3.03	90.80
Mayo	2.70	83.76	3.46	107.38	3.45	107.02	2.76	85.53	2.53	78.58
Junio	2.22	66.61	3.04	91.15	3.01	90.45	2.31	69.28	2.30	68.99
Julio	2.57	79.74	3.30	102.22	3.44	106.52	2.69	83.28	2.64	81.76
Agosto	3.07	95.27	4.09	126.64	4.08	126.50	3.22	99.73	3.13	96.98
Setiembre	3.68	110.50	4.32	129.72	5.04	151.25	3.66	109.65	3.66	109.74
Octubre	3.90	120.96	5.10	158.15	5.41	167.57	3.97	123.00	4.04	125.32
Noviembre	3.90	116.99	5.01	150.35	5.29	158.71	4.30	129.11	3.90	116.92
Diciembre	3.34	103.39	4.52	140.01	4.91	152.10	3.75	116.15	2.81	87.22
Anual (mm/año)	1164.48		1492.64		1550.10		1248.28		1147.14	

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 3.1 se muestran los resultados calculados por el método satelital, a nivel anual, mensual y por día. En el año 2015, se tuvo 1550.10 mm/año, siendo la mayor respecto a los demás; mientras que en el año 2013, se tuvo 1164.48 mm/año, siendo el menor valor. Con los resultados de la tabla 3.1 se graficó la variación mensual y anual de evapotranspiración potencial con el método satelital obteniendo la figura 3.3.

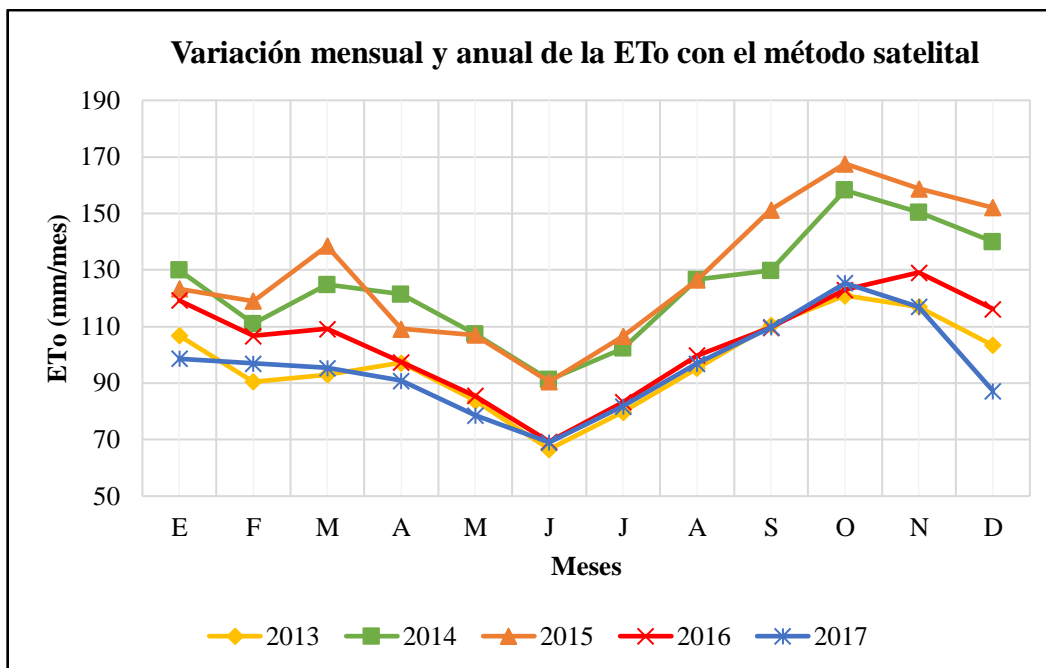


Figura 3.3. Comparación de la evapotranspiración potencial satelital, años 2013 al 2017

Fuente: Elaboración propia

En la figura 3.3, los resultados son bastante razonables pues todos llevan una misma tendencia con respecto a su variación mensual, siendo junio el punto más bajo, y el más alto está entre octubre y noviembre (para todos los años). Se tuvo el valor máximo en el año 2015, y en el mes de octubre con 167.57 mm/mes; y como valor mínimo en el año 2013, en el mes de junio con 66.61 mm/mes.

3.1.3. Discusión de la estimación de evapotranspiración por el método satelital

Alejo (2015) utilizó la plataforma ArcGIS en su versión 10.2.2, en la cual descargó datos de la plataforma WorldClim (Capítulo I, sección 1.3.6). Es notorio que obtuvo mejores resoluciones ($1 \times 1 \text{ km}^2$), pero dicha plataforma del geoservidor WorldClim trabaja con datos para períodos anuales promedios 1970 – 2000, y con una proyección a futuro, lo cual se ha mejorado en el presente trabajo, pues de la plataforma Nasa Giovanni se han descargado datos por años y meses seleccionados. En sus resultados presenta distribución espacial de temperaturas y precipitaciones, más no de evapotranspiración potencial, en lugar de ello solo estima la evapotranspiración potencial con los métodos convencionales. Respecto a ello, en el presente trabajo se obtuvo la distribución espacial de la evapotranspiración potencial al periodo deseado, lo cual es muy importante para tener una información completa e idónea.

Alejo (2015) obtuvo resultados considerablemente aprobados, pero Fernández y Milla (2018) afirman que WorldClim ofrece una base de datos de precipitación media mensual y de otros elementos climáticos que podrían ser aprovechados para elaborar estudios ambientales. Sin embargo, en Venezuela, los datos del modelo no reflejan adecuadamente los valores de precipitación media mensual, así como tampoco los regímenes pluviométricos. Por tanto, no sería válido para ser utilizado en Venezuela en estudios que requieran una línea de base de la precipitación precisa. Lo afirmado anteriormente puede ser debido a las distintas zonas de estudio (Bolivia y Venezuela).

Por su parte, Retamozo (2015) obtuvo un promedio multianual de $ET_o = 1018.24$ mm/año (2011 al 2014), mediante la plataforma MOD16A2 del satélite Modis a escala mensual y a una resolución de $1 \times 1 \text{ Km}^2$ (solo una celda), una resolución mejor al presente trabajo, pero solo es válido para estimar la evapotranspiración potencial en un solo punto, más no presenta la distribución espacial a lo largo de una región determinada, lo cual se ha mejorado en el presente trabajo obteniendo satelitalmente, para el mismo punto, un promedio multianual de $ET_o = 1320.53$ mm/año (2013 al 2017), considerando también los mapas temáticos de la evapotranspiración potencial y real.

Así mismo, Maldonado et al. (2019), obtuvieron la evapotranspiración potencial mediante la ecuación de Penman Monteith y el geoservidor NASA - POWER, en el cual utilizó datos a una resolución espacial de $1 \times 1^\circ$, que es equivalente a un área de aproximadamente 12347 km^2 ($111.12 \times 111.12 \text{ km}^2$) a tiempo real (no permite seleccionar un rango de tiempo deseado). En el presente trabajo los datos son a una resolución de $0.05 \times 0.05^\circ$, que es equivalente a un área de aproximadamente 30.98 km^2 ($5.57 \times 5.57 \text{ km}^2$) y con selección de fecha deseada (permite descargar hasta el presente). En conclusión, si quisiéramos trabajar con los resultados del artículo científico no sería válido para la cuenca Cachi, pues su resolución abarca a toda la cuenca y no tendríamos precisión en los datos. Los resultados del artículo científico son válidos para regiones extensas, como, por ejemplo, departamentos o países; también se debe considerar el relieve del área en estudio, pues la sierra es muy accidentada; por lo tanto, la evapotranspiración potencial tendrá mayor variación respecto a las alturas de cada zona, mientras que en un ámbito donde el relieve sea menor como en la costa y selva, la variación de la evapotranspiración potencial será menor.

3.2. Estimación de evapotranspiración por métodos indirectos identificados y seleccionados

A continuación, se presentan los resultados obtenidos por los métodos convencionales seleccionados, con los que frecuentemente se estima la evapotranspiración. Se identificaron y seleccionaron los métodos de acuerdo a la metodología descrita en el capítulo II, sección 2.3.2 del presente trabajo de investigación.

3.2.1. Estimación de la evapotranspiración potencial por el método tanque evaporímetro Clase A

En la ecuación 2.3, se usaron como datos meteorológicos la velocidad del viento (m/s), la humedad relativa (%) y la evaporación media diaria del tanque de evaporación (mm/día), obtenidos del anexo B de las tablas B.1, B.2 y B.3, respectivamente. Conociendo que la distancia a barlovento, a la cual cambia la cobertura verde alrededor de la estación del INIA, es de 100 m y con la tabla A.1 del anexo A, se calculó el coeficiente de tanque (Kp), obteniendo la evapotranspiración potencial para el año 2013, que se presenta en la tabla 3.2.

Tabla 3.2. Evapotranspiración potencial mensual con el método tanque evaporímetro Clase A, año 2013

Mes	Días	Extensión Distancia (m)	Velocidad del viento (m/s)	Humedad relativa (%)	Evaporación tanque		Coef. (Ktan)	ETo	
					mm/día	mm/mes		(mm/día)	(mm/mes)
Enero	31	100	1.94	82.10	4.45	137.88	0.85	3.78	117.20
Febrero	28	100	1.86	83.87	4.05	113.42	0.85	3.44	96.41
Marzo	31	100	2.02	82.35	3.81	118.02	0.80	3.05	94.42
Abril	30	100	1.91	74.98	4.19	125.56	0.85	3.56	106.73
Mayo	31	100	1.91	75.57	4.02	124.62	0.85	3.42	105.93
Junio	30	100	2.20	74.24	3.55	106.60	0.80	2.84	85.28
Julio	31	100	2.02	76.03	4.37	135.36	0.80	3.49	108.29
Agosto	31	100	1.76	71.08	4.48	138.94	0.85	3.81	118.10
Setiembre	30	100	2.26	67.81	5.03	151.02	0.75	3.78	113.27
Octubre	31	100	2.15	74.15	4.68	145.10	0.80	3.74	116.08
Noviembre	30	100	2.78	71.47	5.34	160.16	0.80	4.27	128.13
Diciembre	31	100	2.00	79.80	5.14	159.24	0.80	4.11	127.39
Anual (mm/año)								1317.21	

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 3.2, se presentan los resultados de evapotranspiraciones potenciales por el método tanque evaporímetro Clase A, colocado en una superficie cultivada para todos los meses del año 2013, resultando la evapotranspiración potencial anual de 1317.21 mm/año.

Los mismos procedimientos de la tabla 3.2 se realizaron para todos los años; se utilizaron los anexos A y B para obtener los resultados de la evapotranspiración potencial con el método de tanque evaporímetro Clase A, con lo que se construyó la tabla 3.3.

Tabla 3.3. Evapotranspiración potencial promedio mensual mediante el método tanque evaporímetro Clase A, años 2013 al 2017

Meses	2013	2014	2015	2016	2017
	mm/mes	mm/mes	mm/mes	mm/mes	mm/mes
Enero	117.20	100.18	82.10	107.28	77.07
Febrero	96.41	93.56	83.78	75.28	80.00
Marzo	94.42	94.50	88.66	92.939	95.82
Abril	106.73	95.79	101.02	96.08	96.36
Mayo	105.93	105.71	99.20	115.84	112.61
Junio	85.28	101.12	102.09	106.13	109.16
Julio	108.29	105.57	116.50	115.57	112.08
Agosto	118.10	114.68	97.41	109.75	117.54
Setiembre	113.27	102.77	97.07	101.70	113.41
Octubre	116.08	109.34	101.61	97.44	104.80
Noviembre	128.13	88.20	89.55	114.53	112.82
Diciembre	127.39	96.53	78.98	97.47	110.77
Anual (mm/año)	1317.21	1207.94	1137.95	1230.00	1242.43

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 3.3 se muestra el resumen de todo lo obtenido a partir del método tanque evaporímetro Clase A con los datos de la Estación Meteorológica del INIA para los años del 2013 al 2017.

3.2.2. Estimación de evapotranspiración potencial por los métodos de Penman Monteith y Hargreaves a través del software PETP V2.0.0

A continuación, se presentan los resultados para todos los meses de los años 2013 al 2017 de la evapotranspiración potencial por los métodos indirectos: FAO Penman

Monteith, Hargreaves en base a datos registrados de radiación solar y en base a la temperatura; todo ello fue obtenido a partir del software PETP V2.0.0 (programa creado y elaborado por el ingeniero agrícola César Vidal Gutiérrez Ninahuamán).

3.2.2.1. Método de FAO Penman Monteith

En la ecuación 2.4, se utilizaron como datos meteorológicos: temperaturas mínimas y máximas (°C), horas sol (horas), humedades relativas (%) y velocidades del viento (m/s) obtenidas del anexo B, tablas: B.5, B.6, B.7, B.2 y B.1, respectivamente; los demás datos de la ecuación 2.4 fueron estimadas con las tablas del anexo A. Con lo descrito se construyó la tabla 3.4.

Tabla 3.4. Evapotranspiración potencial mensual - método FAO Penman Monteith, año 2013

Mes	d (Días)	Tmín (°C)	Tmáx (°C)	n (horas)	HR (%)	V (m/s)	ETo (mm/día)	ETo (mm/mes)
Enero	31	10.32	24.21	6.20	82.10	1.94	3.90	121.01
Febrero	28	11.82	22.99	4.94	83.87	1.86	3.48	97.45
Marzo	31	11.24	23.86	5.94	82.35	2.02	3.60	111.70
Abril	30	9.19	25.51	7.94	74.98	1.91	3.91	117.38
Mayo	31	8.89	24.11	7.37	75.57	1.91	3.31	102.65
Junio	30	8.43	23.29	7.78	74.24	2.20	3.17	94.99
Julio	31	6.98	22.54	7.63	76.03	2.02	3.07	95.09
Agosto	31	7.52	24.28	7.97	71.08	1.76	3.56	110.46
Setiembre	30	9.13	25.64	8.03	67.81	2.26	4.33	129.82
Octubre	31	10.75	24.79	6.07	74.15	2.15	3.99	123.56
Noviembre	30	10.57	26.13	6.80	71.47	2.78	4.62	138.51
Diciembre	31	10.39	23.54	3.12	79.80	2.00	3.27	101.37
Anual (mm/año)							1343.99	

Fuente: Gutiérrez (2016)

En la tabla 3.4, se muestran los resultados de evapotranspiraciones potenciales por el método FAO Penman Monteith, para el año 2013, obteniendo evapotranspiración potencial anual de 1343.99 mm/año.

Los mismos procedimientos de la tabla 3.4 se realizaron para todos los años; se utilizaron los anexos A y B para obtener los resultados de evapotranspiración potencial por el método de FAO Penman Monteith, con lo que se construyó la tabla 3.5.

Tabla 3.5. Evapotranspiración potencial promedio mensual con el método FAO Penman Monteith, años 2013 al 2017

Meses	2013	2014	2015	2016	2017
	mm/mes	mm/mes	mm/mes	mm/mes	mm/mes
Enero	121.01	117.36	117.47	133.37	116.01
Febrero	97.45	103.17	107.76	94.35	106.23
Marzo	111.70	102.57	111.38	104.96	96.07
Abril	117.38	98.98	102.75	107.54	103.22
Mayo	102.65	103.59	102.80	106.56	130.80
Junio	94.99	94.54	91.62	93.29	91.99
Julio	95.09	89.36	97.11	98.35	100.14
Agosto	110.46	108.71	106.97	110.42	111.56
Setiembre	129.82	109.29	116.54	123.37	125.28
Octubre	123.56	125.41	127.03	133.08	132.96
Noviembre	138.51	141.83	125.36	134.05	137.90
Diciembre	101.37	120.22	111.82	128.17	126.27
Anual (mm/año)	1343.99	1315.03	1318.61	1367.52	1378.44

Fuente: Elaboración propia

3.2.2.2. Método de Hargreaves en base a datos registrados de radiación solar

En la ecuación 2.5, se utilizaron como datos meteorológicos: temperaturas medias (°C) y horas sol (horas), obtenidas del anexo B, tablas: B.4 y B.7, respectivamente; para las estimaciones de las radiaciones solares se utilizó la ecuación 2.6, donde se estima los datos de las radiaciones extraterrestres (R_a) (Tablas A.2 y A.3) y la duración máxima diaria media de las horas de fuerte insolación (N) de la tabla A.4 del anexo A. Con lo descrito anteriormente se construyó la tabla 3.6.

Tabla 3.6. Evapotranspiración potencial mensual con el método Hargreaves en base a datos registrados de radiación solar, año 2013

Mes	d (Días)	T _m (°C)	n (Horas)	TMF (°F)	R _a (mm/día)	R _a (cal/cm ² /día)	R _s (cal/cm ² /día)	ET _o (mm/mes)	ET _o (mm/día)
Enero	31	17.27	6.20	63.08	16.66	974.80	479.97	121.11	3.91
Febrero	28	17.41	4.94	63.33	16.36	957.24	428.05	108.44	3.87
Marzo	31	17.55	5.94	63.59	15.34	897.75	443.79	112.89	3.64
Abril	30	17.35	7.94	63.23	13.83	809.00	474.45	120.00	4.00
Mayo	31	16.50	7.37	61.70	12.27	717.81	410.13	101.22	3.27
Junio	30	15.86	7.78	60.54	11.37	665.15	394.91	95.63	3.19
Julio	31	14.76	7.63	58.56	11.77	688.55	402.46	94.28	3.04
Agosto	31	15.90	7.97	60.61	13.03	762.19	450.74	109.28	3.53
Setiembre	30	17.38	8.03	63.29	14.58	853.38	498.72	126.26	4.21
Octubre	31	17.77	6.07	63.98	15.80	924.57	457.01	116.96	3.77
Noviembre	30	18.35	6.80	65.04	16.46	963.10	497.94	129.54	4.32
Diciembre	31	16.96	3.12	62.54	16.56	968.95	359.50	89.93	2.90
Anual (mm/año)								1325.54	

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 3.6, se muestran los resultados de evapotranspiraciones potenciales por el método Hargreaves en base a datos registrados de radiación solar para el año 2013, obteniendo evapotranspiración potencial anual de 1325.54 mm/año.

Los mismos procedimientos de la tabla 3.6 se realizaron para todos los años, se utilizaron los anexos A y B para obtener los resultados de evapotranspiraciones potenciales por el método de Hargreaves en base a datos registrados de radiación solar con lo que se construyó la tabla 3.7.

Tabla 3.7. Evapotranspiración potencial promedio mensual con el método Hargreaves en base a datos registrados de radiación solar, años 2013 al 2017

Meses	2013	2014	2015	2016	2017
	mm/mes	mm/mes	mm/mes	mm/mes	mm/mes
Enero	121.11	115.04	116.10	131.76	121.74
Febrero	108.44	112.28	121.53	106.60	121.96
Marzo	112.89	101.11	116.07	109.81	100.88
Abril	120.00	98.26	109.19	114.24	112.51
Mayo	101.22	105.35	97.43	110.06	107.37
Junio	95.63	93.97	94.85	103.63	102.64
Julio	94.28	86.25	98.39	108.22	110.93
Agosto	109.28	106.55	103.04	116.39	112.53
Setiembre	126.26	116.41	116.00	125.26	134.09
Octubre	116.96	120.93	127.41	130.97	127.59
Noviembre	129.54	135.64	125.40	129.04	143.94
Diciembre	89.93	116.65	110.10	126.93	126.57
Anual (mm/año)	1325.54	1308.46	1335.51	1412.91	1422.76

Fuente: Elaboración propia

3.2.2.3. Método de Hargreaves en base a la temperatura

En la ecuación 2.7, se usaron como datos meteorológicos: temperaturas medias (°C) y humedades relativas (%), obtenidas del anexo B, tablas B.4 y B.2, respectivamente. El factor mensual de latitud (MF) se obtuvo de la tabla A.5 del anexo A. Para calcular el factor de corrección para la humedad relativa (CH) y el factor de corrección para la altura del lugar (CE) se utilizaron las ecuaciones 1.13 y 1.14, respectivamente. Con lo descrito anteriormente se construyó la tabla 3.8.

Tabla 3.8. Evapotranspiración potencial mensual con el método Hargreaves en base a la temperatura, año 2013

Mes	d (Días)	Tm (°C)	HR (%)	MF (mm/mes)	TMF (°F)	CH	CE	ETo (mm/mes)	ETo (mm/día)
Enero	31	17.3	82.102	2.657	63.082	0.702	1.055	124.18	4.01
Febrero	28	17.4	83.869	2.307	63.333	0.667	1.055	102.78	3.67
Marzo	31	17.6	82.348	2.344	63.593	0.697	1.055	109.70	3.54
Abril	30	17.4	74.976	1.977	63.230	0.830	1.055	109.54	3.65
Mayo	31	16.5	75.569	1.761	61.703	0.821	1.055	94.09	3.04
Junio	30	15.9	74.236	1.566	60.542	0.843	1.055	84.29	2.81
Julio	31	14.8	76.033	1.678	58.565	0.813	1.055	84.27	2.72
Agosto	31	15.9	71.08	1.918	60.614	0.893	1.055	109.48	3.53
Setiembre	30	17.4	67.809	2.155	63.290	0.942	1.055	135.53	4.52
Octubre	31	17.8	74.148	2.468	63.982	0.844	1.055	140.64	4.54
Noviembre	30	18.4	71.465	2.547	65.036	0.887	1.055	154.97	5.17
Diciembre	31	17	79.795	2.680	62.536	0.746	1.055	131.96	4.26
Anual (mm/año)								1381.42	

Fuente: Gutiérrez (2016)

En la tabla 3.8, se muestran los resultados de evapotranspiraciones potenciales por el método Hargreaves en base a la temperatura para el año 2013, obteniendo evapotranspiración potencial anual de 1381.42 mm/año. Los mismos procedimientos de la tabla 3.8 se realizaron para todos los años, se utilizaron los anexos A y B para obtener los resultados de evapotranspiraciones potenciales por el método de Hargreaves en base a la temperatura, con lo que se construyó la tabla 3.9.

Tabla 3.9. Evapotranspiración potencial promedio mensual con el método Hargreaves en base a la temperatura, años 2013 al 2017

Meses	2013 mm/mes	2014 mm/mes	2015 mm/mes	2016 mm/mes	2017 mm/mes
Enero	124.18	126.00	121.41	132.89	101.71
Febrero	102.78	109.10	97.36	83.72	96.40
Marzo	109.70	101.98	93.86	88.83	82.74
Abril	109.54	101.87	84.41	86.70	83.78
Mayo	94.09	96.21	85.84	85.48	115.26
Junio	84.29	88.69	70.10	66.41	68.74
Julio	84.27	91.31	76.47	73.52	67.43
Agosto	109.48	112.32	93.23	90.49	103.03
Setiembre	135.53	107.19	117.06	114.14	120.24
Octubre	140.64	144.94	122.56	126.41	131.05
Noviembre	154.97	161.40	128.25	140.84	126.53
Diciembre	131.96	130.33	113.35	130.18	119.87
Anual (mm/año)	1381.42	1371.35	1203.90	1219.60	1216.78

Fuente: Elaboración propia

3.2.3. Discusiones de la estimación de evapotranspiración por los métodos indirectos

En el análisis anterior, es notorio que el tanque evaporímetro Clase A aleja las estimaciones de evapotranspiración potencial, pues Allen et al. (2006) mencionan que el tanque evaporímetro responde de igual manera a los mismos factores climáticos que afectan la transpiración de la planta. Muchos factores hacen diferencias significativas en la pérdida de agua de una superficie libre evaporante y de una superficie cultivada. El almacenaje de calor dentro del tanque puede ser considerable y puede causar una significativa evaporación durante la noche, mientras que la mayoría de las plantas transpiran solamente durante el día. También se aprecian diferencias en la turbulencia, humedad del aire y temperatura, que se encuentran inmediatamente sobre estas dos superficies. La transferencia de calor mediante las paredes del tanque también afecta el balance energético, también menciona que el uso de la evaporación del tanque puede ser efectivo para períodos de diez días, si se usa de manera adecuada.

Por su parte, Retamozo (2015) obtuvo resultados similares al presente trabajo, pues la evapotranspiración potencial por el tanque evaporímetro Clase A desvía la estimación frente a sus demás resultados, obteniendo en promedio multianual (2011 al 2014): tanque evaporímetro Clase A = 1295.41 mm/año, FAO Penman Monteith = 1043.59 mm/año y Hargreaves en base a la temperatura = 1369.66 mm/año.

En el presente trabajo se obtuvieron resultados: tanque evaporímetro Clase A = 1227.11 mm/año, FAO Penman Monteith = 1344.72 mm/año, Hargreaves en base a datos registrados de radiación solar = 1361.03 mm/año y Hargreaves en base a la temperatura = 1278.61 mm/año para el periodo 2013 al 2017.

3.3. Ajuste y validación de los resultados obtenidos mediante los índices estadísticos

Con los resultados obtenidos en los subcapítulos anteriores (evapotranspiración por método satelital y métodos convencionales) se procedió a ajustar y validar estos resultados mediante los índices estadísticos, pues este paso es muy necesario e importante para garantizar los resultados del método satelital y sean aplicados de manera confiable.

3.3.1. Comparación del método satelital frente a los métodos convencionales

Con los resultados anuales (2013 al 2017) para cada método presentados en las tablas 3.1, 3.3, 3.5, 3.7 y 3.9 (resultados de la evapotranspiración potencial por año y mes) se agruparon y se construyeron las tablas 3.10, 3.11, 3.12, 3.13 y 3.14.

Tabla 3.10. Evapotranspiración potencial promedio día, mensual y anual mediante el método satelital y los métodos convencionales, año 2013

Meses	Método satelital		Tanque evaporímetro Clase A		FAO Penman Monteith		Hargreaves en base a datos de radiación solar		Hargreaves en base a la temperatura	
	mm/día	mm/mes	mm/día	mm/mes	mm/día	mm/mes	mm/día	mm/mes	mm/día	mm/mes
Enero	3.45	106.80	3.78	117.20	3.90	121.01	3.91	121.11	4.01	124.18
Febrero	3.23	90.43	3.44	96.41	3.48	97.45	3.87	108.44	3.67	102.78
Marzo	3.00	92.93	3.05	94.42	3.60	111.70	3.64	112.89	3.54	109.70
Abril	3.24	97.10	3.56	106.73	3.91	117.38	4.00	120.00	3.65	109.54
Mayo	2.70	83.76	3.42	105.93	3.31	102.65	3.27	101.22	3.04	94.09
Junio	2.22	66.61	2.84	85.28	3.17	94.99	3.19	95.63	2.81	84.29
Julio	2.57	79.74	3.49	108.29	3.07	95.09	3.04	94.28	2.72	84.27
Agosto	3.07	95.27	3.81	118.10	3.56	110.46	3.53	109.28	3.53	109.48
Setiembre	3.68	110.50	3.78	113.27	4.33	129.82	4.21	126.26	4.52	135.53
Octubre	3.90	120.96	3.74	116.08	3.99	123.56	3.77	116.96	4.54	140.64
Noviembre	3.90	116.99	4.27	128.13	4.62	138.51	4.32	129.54	5.17	154.97
Diciembre	3.34	103.39	4.11	127.39	3.27	101.37	2.90	89.93	4.26	131.96
Anual (mm/año)		1164.48		1317.21		1343.99		1325.54		1381.42

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 3.10, se presenta la comparación de los resultados para el año 2013 por los métodos seleccionados. Anualmente, el mayor valor fue el método de Hargreaves en base a la temperatura con 1381.42 mm/año, seguido del método FAO Penman Monteith con 1343.99 mm/año. Luego está el método de Hargreaves en base a datos registrados de radiación solar con 1325.54 mm/año, luego el método del tanque evaporímetro Clase A con 1317.21 mm/año y, finalmente, con menor valor se presenta el método satelital con 1164.48mm/año.

Para una mejor visualización con la tabla 3.10 se graficaron las variaciones mensuales de evapotranspiración potencial para el año 2013 y para todos los métodos (Figura 3.4).

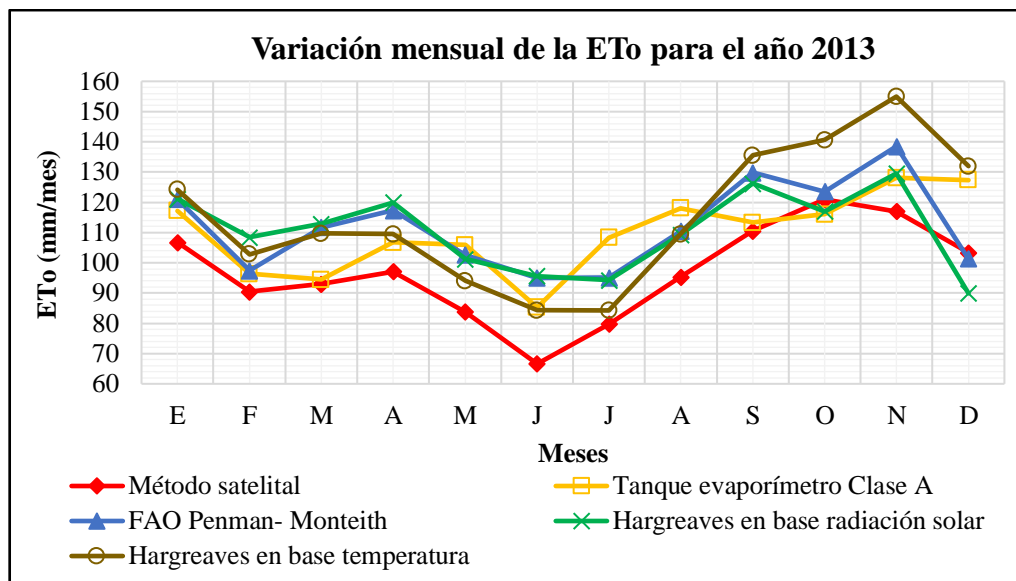


Figura 3.4. Variación mensual de la evapotranspiración potencial para el año 2013

Fuente: Elaboración propia

En la figura 3.4, se presentan variaciones mensuales de la evapotranspiración potencial para el año 2013, calculadas por el método satelital y los métodos convencionales seleccionados. Todos los métodos tienen similar tendencia: de enero a febrero descienden, de febrero a abril ascienden, de abril a junio descienden, de junio a noviembre ascienden y, finalmente, descienden para el mes de diciembre. El mayor pico se da en el mes de noviembre para todos los métodos. También se debe considerar que el método del tanque evaporímetro Clase A es el que más difiere de los demás métodos.

Tabla 3.11. Evapotranspiración potencial promedio día, mensual y anual mediante el método satelital y los métodos convencionales para el año 2014

Meses	Método satelital		Tanque evaporímetro Clase A		FAO Penman Monteith		Hargreaves en base a datos de radiación solar		Hargreaves en base a la temperatura	
	mm/día	mm/mes	mm/día	mm/mes	mm/día	mm/mes	mm/día	mm/mes	mm/día	mm/mes
Enero	4.19	129.87	3.23	100.18	3.79	117.36	3.71	115.04	4.06	126.00
Febrero	3.96	110.99	3.34	93.56	3.68	103.17	4.01	112.28	3.90	109.10
Marzo	4.02	124.74	3.05	94.50	3.31	102.57	3.26	101.11	3.29	101.98
Abril	4.05	121.42	3.19	95.79	3.30	98.98	3.28	98.26	3.40	101.87
Mayo	3.46	107.38	3.41	105.71	3.34	103.59	3.40	105.35	3.10	96.21
Junio	3.04	91.15	3.37	101.12	3.15	94.54	3.13	93.97	2.96	88.69
Julio	3.30	102.22	3.41	105.57	2.88	89.36	2.78	86.25	2.95	91.31
Agosto	4.09	126.64	3.70	114.68	3.51	108.71	3.44	106.55	3.62	112.32
Setiembre	4.32	129.72	3.43	102.77	3.64	109.29	3.88	116.41	3.57	107.19
Octubre	5.10	158.15	3.53	109.34	4.05	125.41	3.90	120.93	4.68	144.94
Noviembre	5.01	150.35	2.94	88.20	4.73	141.83	4.52	135.64	5.38	161.40
Diciembre	4.52	140.01	3.11	96.53	3.88	120.22	3.76	116.65	4.20	130.33
Anual (mm/año)	1492.64		1207.94		1315.03		1308.46		1371.35	

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 3.11, se presenta la comparación de los resultados para el año 2014 por los métodos seleccionados. Anualmente, el mayor valor fue el método satelital con 1492.64 mm/año, seguido del método Hargreaves en base a la temperatura con 1371.35 mm/año. Luego está el método de FAO Penman Monteith con 1315.03 mm/año, luego el método de Hargreaves en base a datos registrados de radiación solar con 1308.46 mm/año y, finalmente, con menor valor se presenta el método de tanque evaporímetro Clase A con 1207.94 mm/año. Para una mejor visualización con la tabla 3.11, se graficaron las variaciones mensuales de evapotranspiración potencial para el año 2014 y para todos los métodos (Figura 3.5).

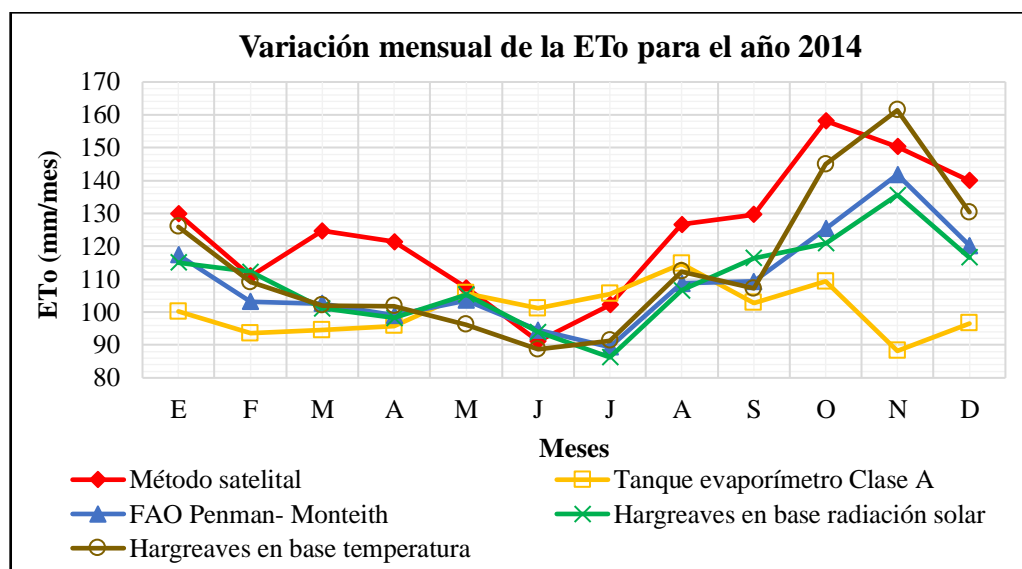


Figura 3.5. Variación mensual de la evapotranspiración potencial para el año 2014

Fuente: Elaboración propia

En la figura 3.5, se presentan variaciones mensuales de la evapotranspiración potencial para el año 2014, calculadas por el método satelital y los métodos convencionales seleccionados. La tendencia del método satelital y el método tanque evaporímetro Clase A presentan picos discordantes con respecto a los demás métodos, esto es apreciado en los meses de marzo y abril, en los cuales, las evapotranspiraciones potenciales para el método satelital están elevados con valores de 124.74 y 121.42 mm/mes, respectivamente. Para el método tanque evaporímetro Clase A, se presenta un pico discordante que difiere la tendencia con respecto a los demás métodos. Esto se da en el mes de noviembre con 88.20 mm/año. También se debe considerar que el método del tanque evaporímetro Clase A es el que más difiere a los demás métodos para el año 2014.

Tabla 3.12. Evapotranspiración potencial promedio día, mensual y anual mediante el método satelital y los métodos convencionales para el año 2015

Meses	Método satelital		Tanque evaporímetro Clase A		FAO Penman Monteith		Hargreaves en base a datos de radiación solar		Hargreaves en base a la temperatura	
	mm/día	mm/mes	mm/día	mm/mes	mm/día	mm/mes	mm/día	mm/mes	mm/día	mm/mes
Enero	3.98	123.33	2.65	82.10	3.79	117.47	3.75	116.10	3.92	121.41
Febrero	4.25	119.01	2.99	83.78	3.85	107.76	4.34	121.53	3.48	97.36
Marzo	4.47	138.54	2.86	88.66	3.59	111.38	3.74	116.07	3.03	93.86
Abril	3.64	109.10	3.37	101.02	3.42	102.75	3.64	109.19	2.81	84.41
Mayo	3.45	107.02	3.20	99.20	3.32	102.80	3.14	97.43	2.77	85.84
Junio	3.01	90.45	3.40	102.09	3.05	91.62	3.16	94.85	2.34	70.10
Julio	3.44	106.52	3.76	116.50	3.13	97.11	3.17	98.39	2.47	76.47
Agosto	4.08	126.50	3.14	97.41	3.45	106.97	3.32	103.04	3.01	93.23
Setiembre	5.04	151.25	3.24	97.07	3.88	116.54	3.87	116.00	3.90	117.06
Octubre	5.41	167.57	3.28	101.61	4.10	127.03	4.11	127.41	3.95	122.56
Noviembre	5.29	158.71	2.99	89.55	4.18	125.36	4.18	125.40	4.27	128.25
Diciembre	4.91	152.10	2.55	78.98	3.61	111.82	3.55	110.10	3.66	113.35
Anual (mm/año)	1550.10		1137.95		1318.61		1335.51		1203.90	

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 3.12, se presentan las comparaciones de los resultados para el año 2015 por los métodos seleccionados. Anualmente, el mayor valor fue el método satelital con 1550.10 mm/año, seguido del método Hargreaves en base a datos registrados de radiación solar con 1335.51 mm/año; luego está el método FAO Penman Monteith, con 1318.61 mm/año, luego el método Hargreaves en base a la temperatura con 1203.90 mm/año y, finalmente, con menor valor se presenta el método de tanque evaporímetro Clase A 1137.95 mm/año. Para una mejor visualización con la tabla 3.12, se graficaron las variaciones mensuales de la evapotranspiración potencial para el año 2015 y para todos los métodos (Figura 3.6).

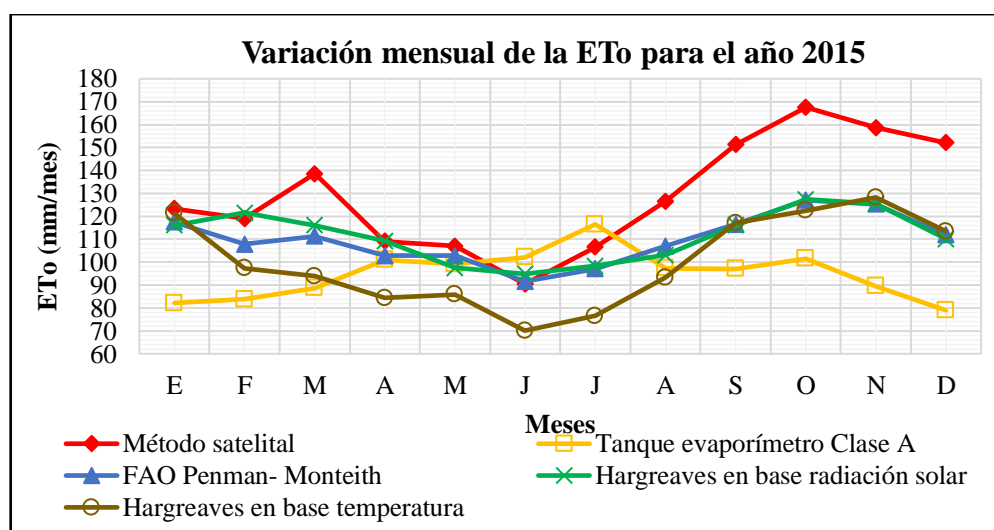


Figura 3.6. Variación mensual de la evapotranspiración potencial para el año 2015

Fuente: Elaboración propia

En la figura 3.6, se presentan las variaciones mensuales de la evapotranspiración potencial para el año 2015, calculadas por el método satelital y los métodos convencionales seleccionados. Las tendencias del método satelital y el método tanque evaporímetro Clase A presentan picos discordantes con respecto a los demás métodos. Esto es apreciado en el mes de marzo, en el cual, la evapotranspiración potencial para el método satelital está elevado con valor 138.54 mm/mes, que genera diferencia en la tendencia. En cambio, el método del tanque evaporímetro Clase A presenta mayor discordancia en la tendencia, y esto se da en casi toda la trayectoria.

Tabla 3.13. Evapotranspiración potencial promedio día, mensual y anual mediante el método satelital y los métodos convencionales para el año 2016

Meses	Método satelital		Tanque evaporímetro Clase A		FAO Penman Monteith		Hargreaves en base a datos de radiación solar		Hargreaves en base a la temperatura	
	mm/día	mm/mes	mm/día	mm/mes	mm/día	mm/mes	mm/día	mm/mes	mm/día	mm/mes
Enero	3.85	119.26	3.46	107.28	4.30	133.37	4.25	131.76	4.29	132.89
Febrero	3.68	106.70	2.60	75.28	3.25	94.35	3.68	106.60	2.89	83.72
Marzo	3.52	109.18	3.00	92.94	3.39	104.96	3.54	109.81	2.87	88.83
Abril	3.25	97.41	3.20	96.08	3.58	107.54	3.81	114.24	2.89	86.70
Mayo	2.76	85.53	3.74	115.84	3.44	106.56	3.55	110.06	2.76	85.48
Junio	2.31	69.28	3.54	106.13	3.11	93.29	3.45	103.63	2.21	66.41
Julio	2.69	83.28	3.73	115.57	3.17	98.35	3.49	108.22	2.37	73.52
Agosto	3.22	99.73	3.54	109.75	3.56	110.42	3.75	116.39	2.92	90.49
Setiembre	3.66	109.65	3.39	101.70	4.11	123.37	4.18	125.26	3.80	114.14
Octubre	3.97	123.00	3.14	97.44	4.29	133.08	4.22	130.97	4.08	126.41
Noviembre	4.30	129.11	3.82	114.53	4.47	134.05	4.30	129.04	4.69	140.84
Diciembre	3.75	116.15	3.14	97.47	4.13	128.17	4.09	126.93	4.20	130.18
Anual (mm/año)	1248.28		1230.00		1367.52		1412.91		1219.60	

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 3.13, se presentan las comparaciones de los resultados para el año 2016 por los métodos seleccionados. Anualmente, el mayor valor fue el método Hargreaves en base a datos registrados de radiación solar con 1412.91 mm/año, seguido del método FAO Penman Monteith con 1367.52 mm/año. Luego el método satelital con 1248.28 mm/año, posteriormente, el método del tanque evaporímetro Clase A con 1230 mm/año y, finalmente, con menor valor se presenta el método Hargreaves en base a la temperatura con 1219.60 mm/año. Para una mejor visualización con la tabla 3.13 se graficaron las variaciones mensuales de las evapotranspiraciones potenciales para el año 2016 y para todos los métodos (Figura 3.7).

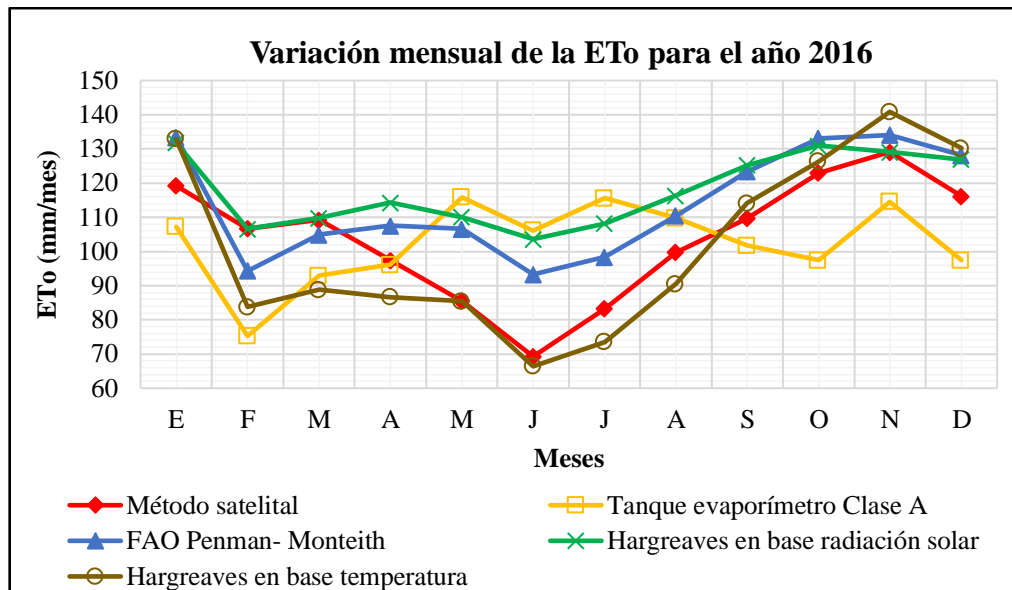


Figura 3.7. Variación mensual de la evapotranspiración potencial para el año 2016

Fuente: Elaboración propia

En la figura 3.7 se presentan las variaciones mensuales de la evapotranspiración potencial para el año 2016, calculadas por el método satelital y los métodos convencionales seleccionados. Todos los métodos tienen una similar tendencia, con excepción del método tanque evaporímetro Clase A, que es el que presenta una tendencia diferente a los demás. Esto es debido a los picos discordantes en los meses de abril, mayo, agosto, setiembre y octubre. También se debe mencionar que para el método satelital en el mes de abril se presenta cierta diferencia en la tendencia.

Tabla 3.14. Evapotranspiración potencial promedio día, mensual y anual mediante el método satelital y los métodos convencionales para el año 2017

Meses	Método satelital		Tanque evaporímetro Clase A		FAO Penman Monteith		Hargreaves en base a datos de radiación solar		Hargreaves en base a la temperatura	
	mm/día	mm/mes	mm/día	mm/mes	mm/día	mm/mes	mm/día	mm/mes	mm/día	mm/mes
Enero	3.18	98.61	2.49	77.07	3.74	116.01	3.93	121.74	3.28	101.71
Febrero	3.46	96.88	2.86	80.00	3.79	106.23	4.36	121.96	3.44	96.40
Marzo	3.08	95.33	3.09	95.82	3.10	96.07	3.25	100.88	2.67	82.74
Abril	3.03	90.80	3.21	96.36	3.44	103.22	3.75	112.51	2.79	83.78
Mayo	2.53	78.58	3.63	112.61	4.22	130.80	3.46	107.37	3.72	115.26
Junio	2.30	68.99	3.64	109.16	3.07	91.99	3.42	102.64	2.29	68.74
Julio	2.64	81.76	3.62	112.08	3.23	100.14	3.58	110.93	2.18	67.43
Agosto	3.13	96.98	3.79	117.54	3.60	111.56	3.63	112.53	3.32	103.03
Setiembre	3.66	109.74	3.78	113.41	4.18	125.28	4.47	134.09	4.01	120.24
Octubre	4.04	125.32	3.38	104.80	4.29	132.96	4.12	127.59	4.23	131.05
Noviembre	3.90	116.92	3.76	112.82	4.60	137.90	4.80	143.94	4.22	126.53
Diciembre	2.81	87.22	3.57	110.77	4.07	126.27	4.08	126.57	3.87	119.87
Anual (mm/año)	1147.14		1242.43		1378.44		1422.76		1216.78	

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 3.14, se presentan las comparaciones de los resultados para el año 2017 por los métodos seleccionados. Anualmente, el mayor valor fue el método Hargreaves en base a datos registrados de radiación solar con 1422.76 mm/año, seguido del método FAO Penman Monteith con 1378.44 mm/año, luego el método del tanque evaporímetro Clase A con 1242.43 mm/año. Posteriormente, el método Hargreaves en base a la temperatura con 1216.78 mm/año y, finalmente, con menor valor se presenta el método satelital con 1147.14 mm/año. Para una mejor visualización con la tabla 3.14, se graficaron las variaciones mensuales de la evapotranspiración potencial para el año 2017 y para todos los métodos (Figura 3.8).

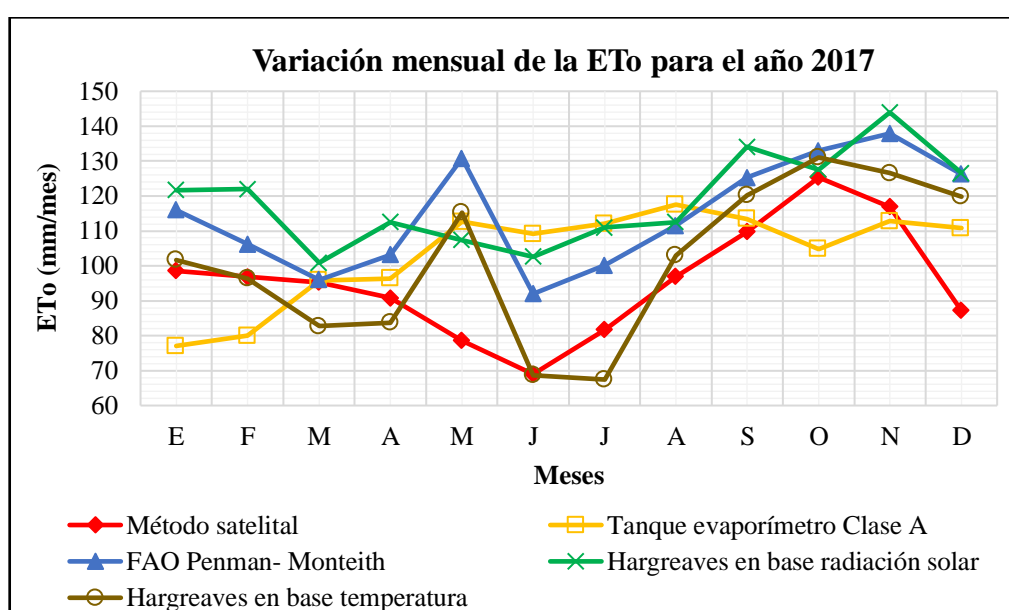


Figura 3.8. Variación mensual de la evapotranspiración potencial para el año 2017

Fuente: Elaboración propia

En la figura 3.8, se presentan las variaciones mensuales de la evapotranspiración potencial para el año 2017, calculadas por el método satelital y los métodos convencionales seleccionados. Todos los métodos presentan diferencias en la tendencia; los más asemejados son el método FAO Penman Monteith, con el método Hargreaves en base a la temperatura.

3.3.2. Calibración del método satelital frente a los métodos convencionales

Se han promediado los resultados de la evapotranspiración potencial a nivel mensual y multianual para los años 2013 a 2017 obteniendo un promedio multianual - mensual de la evapotranspiración potencial por cada método (Tabla 3.15).

Tabla 3.15. Evapotranspiración potencial promedio multianual y mensual para los métodos seleccionados

Meses	Método satelital mm/mes	Tanque evaporímetro Clase A mm/mes	FAO Penman Monteith mm/mes	Hargreaves en base a datos de radiación solar mm/mes	Hargreaves en base a la temperatura mm/mes
Enero	115.57	96.76	121.04	121.15	121.24
Febrero	104.80	85.80	101.79	114.16	97.87
Marzo	112.14	93.27	105.33	108.15	95.42
Abril	103.16	99.19	105.97	110.84	93.26
Mayo	92.45	107.86	109.28	104.29	95.38
Junio	77.30	100.76	93.29	98.14	75.65
Julio	90.70	111.60	96.01	99.61	78.60
Agosto	109.02	111.50	109.62	109.56	101.71
Setiembre	122.17	105.64	120.86	123.60	118.83
Octubre	139.00	105.85	128.41	124.78	133.12
Noviembre	134.41	106.64	135.53	132.71	142.40
Diciembre	119.78	102.23	117.57	114.03	125.14
Tota (mm/año)	1320.53	1227.11	1344.72	1361.03	1278.61

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 3.15, los valores totales - anuales presentan resultados próximos, pero esto se validará más adelante. A continuación, mediante los resultados de la tabla 3.15 se han construido las figuras 3.9 al 3.12, en las cuales, se presenta la comparación del promedio multianual - mensual de las curvas de la evapotranspiración potencial, obtenidas con el método satelital frente a los diferentes métodos convencionales.

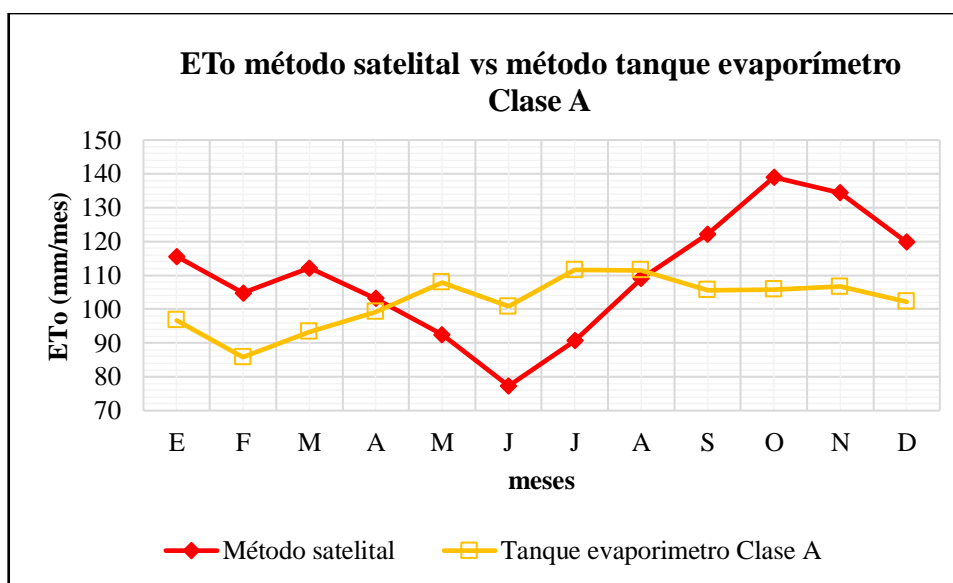


Figura 3.9. Comparación del promedio multianual y mensual de la evapotranspiración potencial satelital frente al método tanque evaporímetro Clase A

Fuente: Elaboración propia

En la figura 3.9, se da la comparación del método satelital frente al método tanque evaporímetro Clase A, en la cual, se observa un comportamiento disparejo entre las curvas de la evapotranspiración potencial, pero no en su totalidad. Esta diferencia es apreciable desde el mes de marzo hasta el mes de octubre.

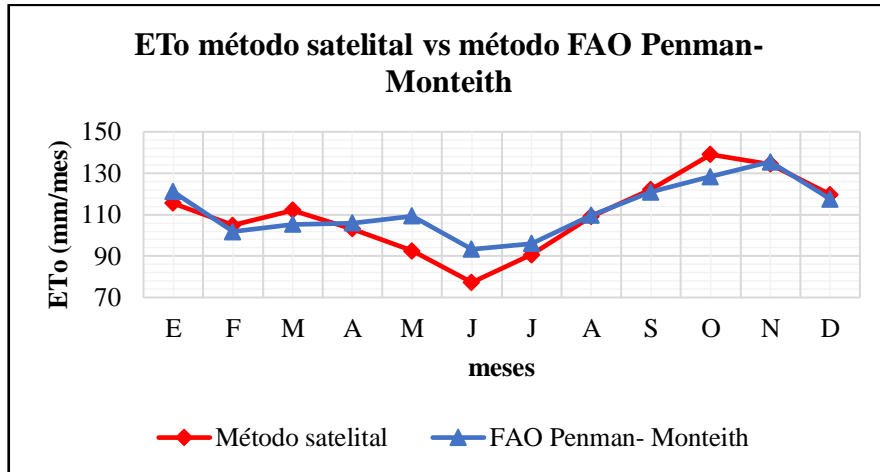


Figura 3.10. Comparación del promedio multianual y mensual de la evapotranspiración potencial satelital frente al método FAO Penman Monteith. **Fuente:** Elaboración propia

En la figura 3.10, los resultados de la evapotranspiración potencial por el método FAO Penman Monteith se asemeja al método satelital, pues las tendencias de la curva de la evapotranspiración potencial presentan buena similitud, pero presenta discrepancias no tan significativas en los meses de mayo, junio y octubre, quedando así en segundo lugar, siendo superado por el método Hargreaves en base a la temperatura.

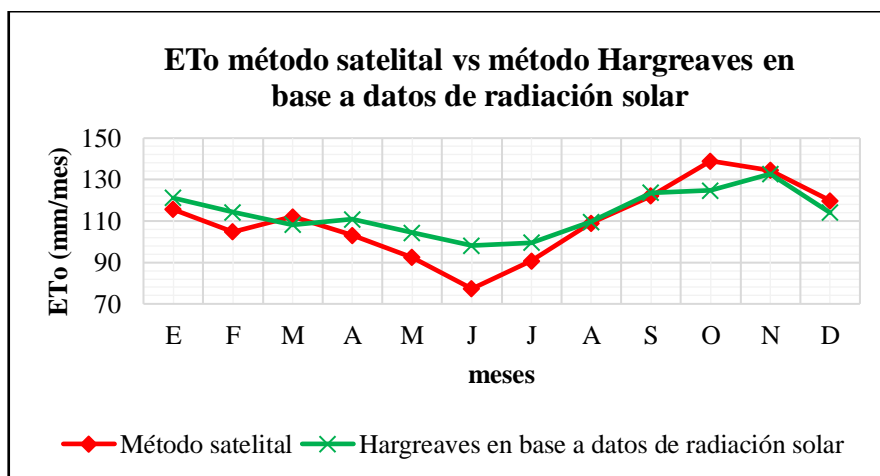


Figura 3.11. Comparación del promedio multianual y mensual de la evapotranspiración potencial satelital frente al método Hargreaves en base a datos de radiación solar **Fuente:** Elaboración propia

En la figura 3.11, el método de Hargreaves en base a datos registrados de radiación solar, presenta picos discordantes en junio y en octubre, quedando así en tercer lugar en similitud frente al método satelital.

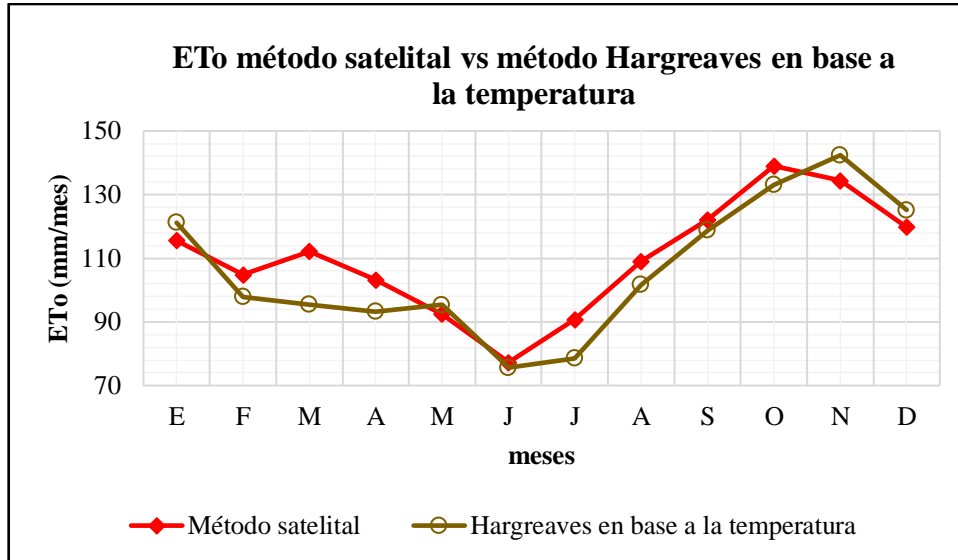


Figura 3.12. Comparación del promedio multianual y mensual de la evapotranspiración potencial satelital frente al método Hargreaves en base a la temperatura

Fuente: Elaboración propia

En la figura 3.12, la tendencia de la curva de la evapotranspiración potencial del método Hargreaves en base a datos de temperatura, es el que se asemeja más al método satelital, quedando en primer lugar frente a los demás métodos.

Los métodos de Hargreaves en base a datos registrados de radiación solar y el de FAO Penman Monteith, presentan resultados positivos respecto a la similitud de la tendencia frente al método satelital, pero los picos discordantes son los que hacen que sean resultados inferiores a los del método Hargreaves en base a la temperatura, el cual da resultados más próximos.

Se han calibrado los resultados de la evapotranspiración potencial por los métodos satelitales frente a los métodos convencionales; se ha utilizado la calibración por regresión lineal simple mediante las ecuaciones 1.40 y 1.41, para calcular la pendiente y la intersección, respectivamente. De la tabla 3.15, se ha promediado los métodos convencionales y luego se ha construido la tabla 3.16.

Tabla 3.16. Evapotranspiración potencial promedios multianuales, cálculo de los coeficientes de calibración

Meses	Promedio de los métodos convencionales	Método satelital
	mm/mes	mm/mes
Enero	115.05	115.57
Febrero	99.91	104.80
Marzo	100.54	112.14
Abril	102.32	103.16
Mayo	104.20	92.45
Junio	91.96	77.30
Julio	96.46	90.70
Agosto	108.10	109.02
Setiembre	117.23	122.17
Octubre	123.04	139.00
Noviembre	129.32	134.41
Diciembre	114.74	119.78
Anual (mm/año)	1302.87	1320.53
Pendiente =		0.58
Intersección =		44.77

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 3.16, considerando que la columna de promedio de los métodos convencionales representa el valor de Y (ETo corregida) y la columna del método satelital representa a valores de X (ETo satelital) y, una vez obtenido la pendiente y la intersección, los cuales son nuestros coeficientes de calibración, se han aplicado la ecuación 2.8 a la tabla 3.1 (resultados del método satelital), para obtener valores calibrados de la evapotranspiración potencial para el método satelital, tal como se muestra en la tabla 3.17.

Tabla 3.17. Evapotranspiración potencial satelital afectados por los coeficientes de calibración

Meses	2013	2014	2015	2016	2017	Promedio
	mm/mes	mm/mes	mm/mes	mm/mes	mm/mes	
Enero	106.71	120.09	116.30	113.94	101.97	111.80
Febrero	97.22	109.15	113.80	106.66	100.96	105.56
Marzo	98.67	117.12	125.12	108.09	100.06	109.81
Abril	101.09	115.20	108.05	101.27	97.43	104.61
Mayo	93.35	107.05	106.84	94.38	90.34	98.39
Junio	83.40	97.64	97.23	84.95	84.79	89.60
Julio	91.02	104.06	106.55	93.07	92.19	97.38
Agosto	100.03	118.22	118.14	102.62	101.02	108.00
Setiembre	108.86	120.01	132.50	108.37	108.42	115.63
Octubre	114.93	136.50	141.96	116.11	117.45	125.39
Noviembre	112.62	131.97	136.82	119.65	112.59	122.73
Diciembre	104.74	125.97	132.99	112.14	95.36	114.24
Anual (mm/año)	1212.64	1402.97	1436.30	1261.24	1202.58	1303.15

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 3.17, se muestran los valores de la evapotranspiración potencial por el método satelital ya calibrado respecto a los métodos convencionales, con ello se ha uniformizado los resultados, que serán validados en el siguiente subcapítulo.

En las tablas 3.10 al 3.14, donde se muestran los resultados iniciales de la evapotranspiración potencial calculados por todos los métodos y agrupados para cada año, se han reemplazado las columnas del método satelital (sin calibrar) por los resultados de la tabla 3.17 (evapotranspiración potencial método satelital calibrado) y se ha vuelto a graficar y comparar para cada año con los resultados de la evapotranspiración potencial por el método satelital frente a los métodos convencionales, obteniendo las figuras 3.13 al 3.17.

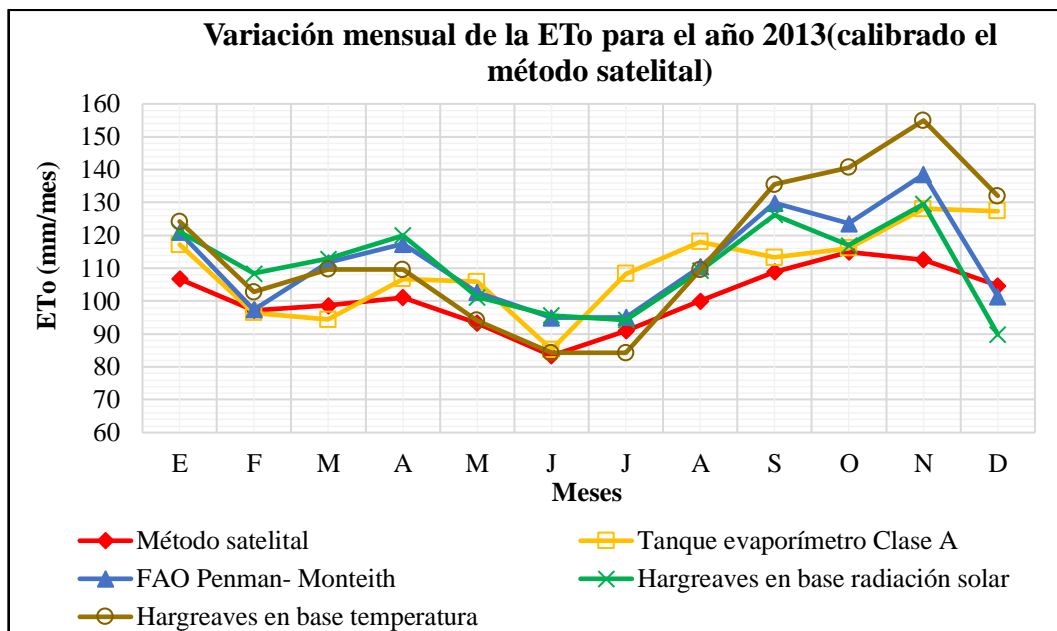


Figura 3.13. Variación mensual de la evapotranspiración potencial para el año 2013, calibrado el método satelital

Fuente: Elaboración propia

En la figura 3.13, la curva del método satelital se ha ajustado a los demás métodos, esto se da con mayor intensidad en todos los meses, con excepción de enero en el cual no es muy apreciable el ajuste. Se han reducido los picos discordantes (Figura 3.4).

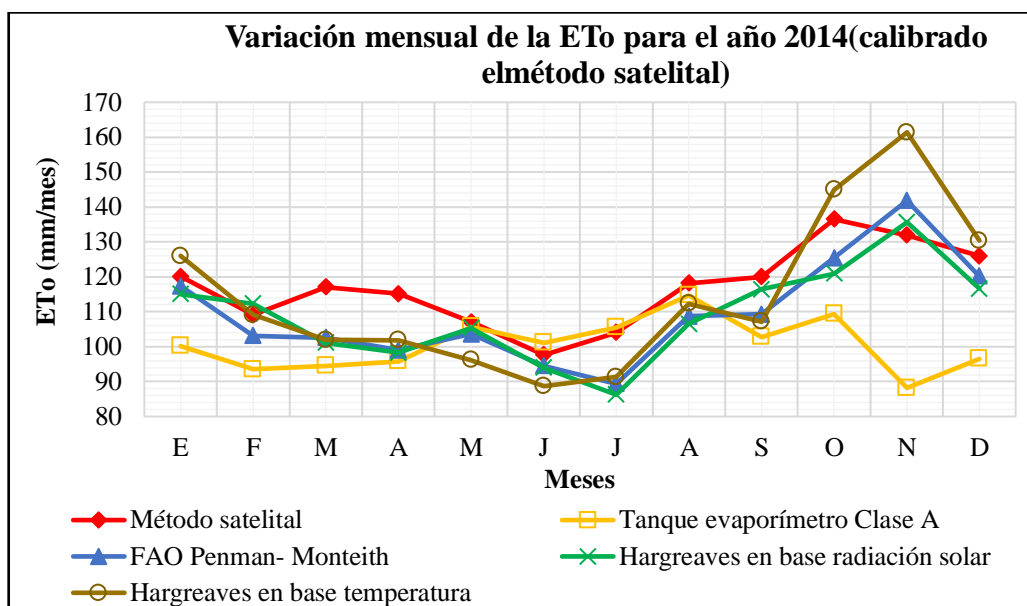


Figura 3.14. Variación mensual de la evapotranspiración potencial para el año 2014, calibrado el método satelital

Fuente: Elaboración propia

En la figura 3.14, la curva del método satelital se ha ajustado a los demás métodos, esto se da con mayor intensidad en todos los meses, con excepción de mayo en el cual no es muy apreciable el ajuste. Se han reducido los picos discordantes (Figura 3.5).

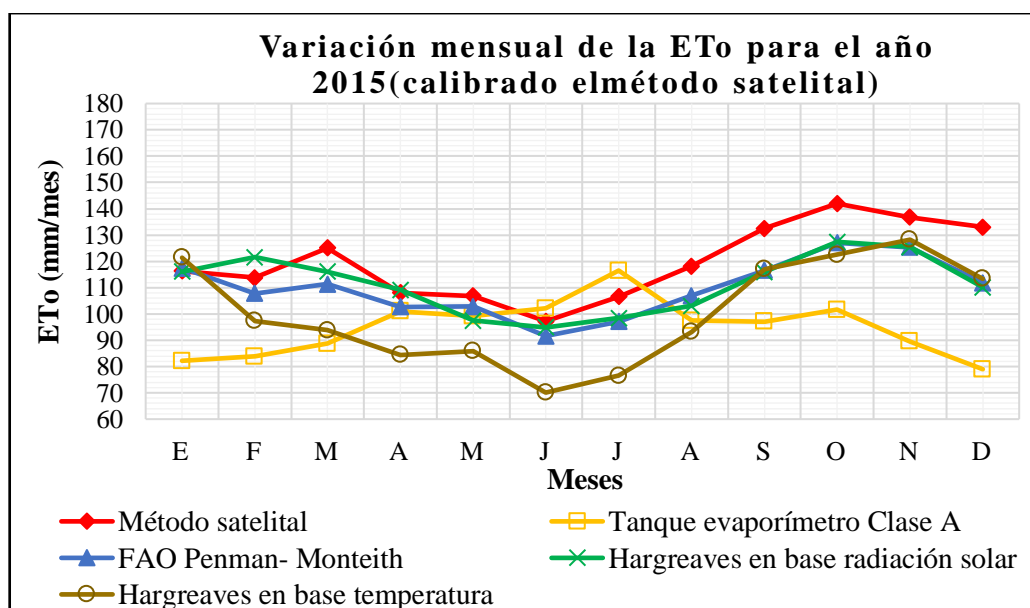


Figura 3.15. Variación mensual de la evapotranspiración potencial para el año 2015, calibrado el método satelital

Fuente: Elaboración propia

En la figura 3.15, la curva del método satelital se ha ajustado a los demás métodos, esto se da con mayor intensidad en todos los meses, con excepción de mayo en el cual no es muy apreciable el ajuste. Se han reducido los picos discordantes (Figura 3.6).

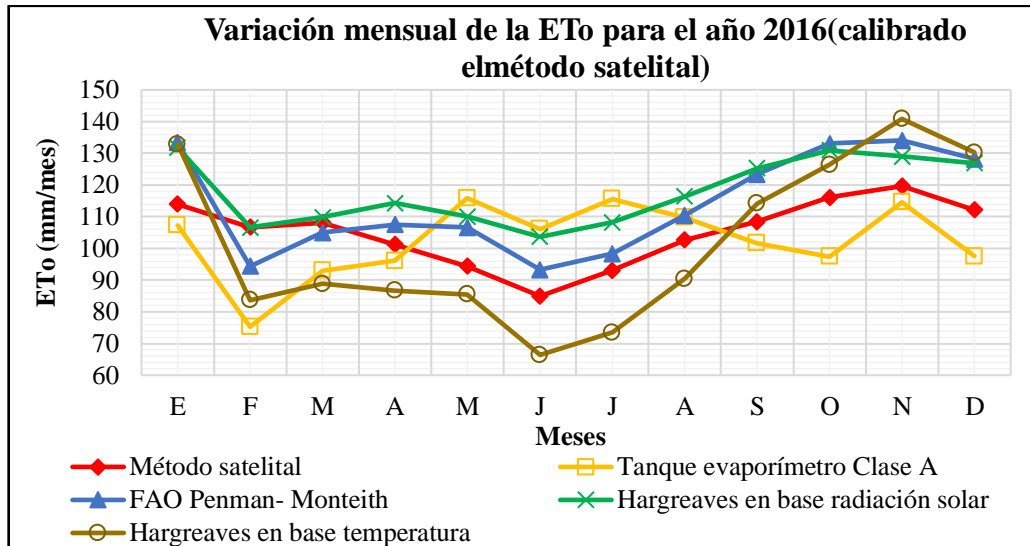


Figura 3.16. Variación mensual de la evapotranspiración potencial para el año 2016, calibrado el método satelital

Fuente: Elaboración propia

En la figura 3.16, la curva del método satelital se ha ajustado a los demás métodos, esto se da con mayor intensidad en todos los meses, con excepción de febrero, en el cual, no es muy apreciable el ajuste. Se han reducido los picos discordantes (Figura 3.7).

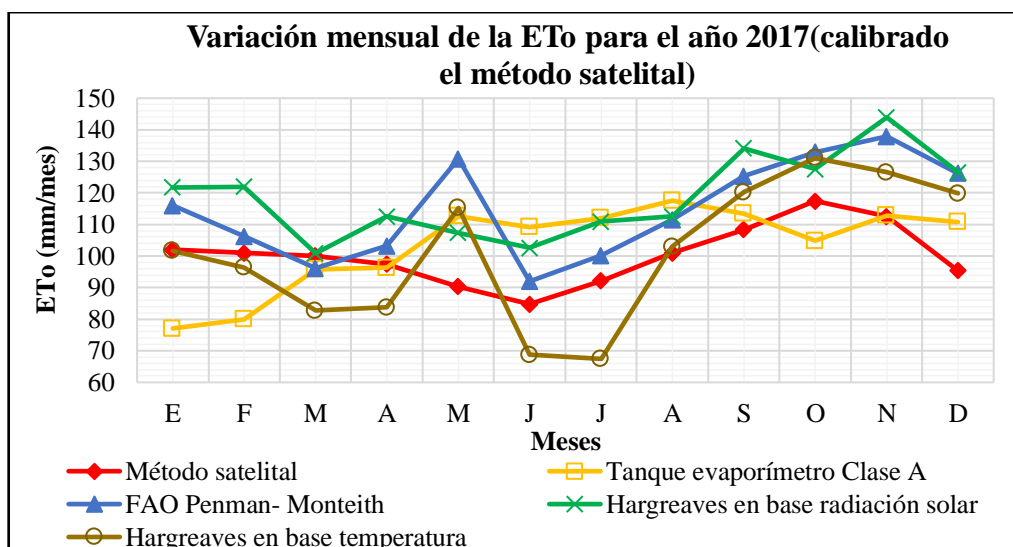


Figura 3.17. Variación mensual de la evapotranspiración potencial para el año 2017, calibrado el método satelital

Fuente: Elaboración propia

En la figura 3.17, la curva del método satelital se ha ajustado a los demás métodos, esto se da con mayor intensidad en todos los meses sin excepciones. Se han reducido los picos discordantes (Figura 3.8).

En las figuras 3.13 al 3.17, se aprecian que la calibración nos ha permitido obtener resultados más próximos y ajustados a los demás métodos convencionales, pues se aprecia que las curvas de la evapotranspiración potencial por el método satelital, se ha ajustado a las demás curvas a diferencia de la fase inicial (Figuras 3.4 a 3.8).

Para corroborar y apreciar cuánto ha mejorado la calibración del método satelital frente a los promedios de métodos convencionales, hemos comparado estas diferencias tanto para los resultados sin calibrar y los resultados calibrados, obteniendo las tablas 3.18 y 3.19.

Tabla 3.18. Diferencia de error para los resultados sin calibrar

Diferencia de error sin calibrar					
Meses	2013	2014	2015	2016	2017
Enero	14.08	15.23	14.06	7.06	5.52
Febrero	10.84	6.46	16.41	16.71	4.26
Marzo	14.24	24.70	36.05	10.05	1.45
Abril	16.31	22.70	9.76	3.73	8.17
Mayo	17.21	4.67	10.70	18.96	37.94
Junio	23.44	3.44	0.79	23.08	24.14
Julio	15.74	9.09	9.40	15.64	15.89
Agosto	16.56	16.07	26.34	7.03	14.19
Setiembre	15.72	20.80	39.58	6.46	13.51
Octubre	3.35	33.00	47.92	1.02	1.22
Noviembre	20.80	18.58	41.57	0.51	13.37
Diciembre	9.27	24.07	48.54	4.54	33.64
Error anual	177.56	191.94	301.11	59.23	167.96

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.19. Diferencia de error para los resultados calibrados

Diferencia de error calibrado					
Meses	2013	2014	2015	2016	2017
Enero	14.18	5.42	7.01	12.41	2.19
Febrero	4.07	4.59	11.17	16.65	0.20
Marzo	8.52	17.05	22.60	8.94	6.16
Abril	12.34	16.45	8.68	0.11	1.55
Mayo	7.64	4.32	10.50	10.13	26.18
Junio	6.66	3.03	7.55	7.42	8.36
Julio	4.48	10.91	9.41	5.86	5.47
Agosto	11.82	7.63	17.95	4.17	10.17
Setiembre	17.38	11.06	20.79	7.77	14.86
Octubre	9.41	11.31	22.27	5.89	6.67
Noviembre	25.19	0.17	19.65	9.99	17.74
Diciembre	7.95	10.01	29.40	8.58	25.53
Error anual	129.64	101.96	186.97	46.53	112.76

Fuente: Elaboración propia

En las tablas 3.18 y 3.19, podemos apreciar que la calibración nos ha permitido reducir el error en los resultados, no en su totalidad, pero se ha conseguido reducirlos considerablemente tanto a nivel mensual y en lo absoluto a nivel anual.

Una vez ya comprobado la eficiencia de los coeficientes de calibración se han empleado dichos coeficientes en los mapas temáticos de distribución espacial de la evapotranspiración potencial obtenidos satelitalmente en una primera instancia, y así se construyeron mapas temáticos calibrados y ajustados (Figuras 3.18 al 3.23).

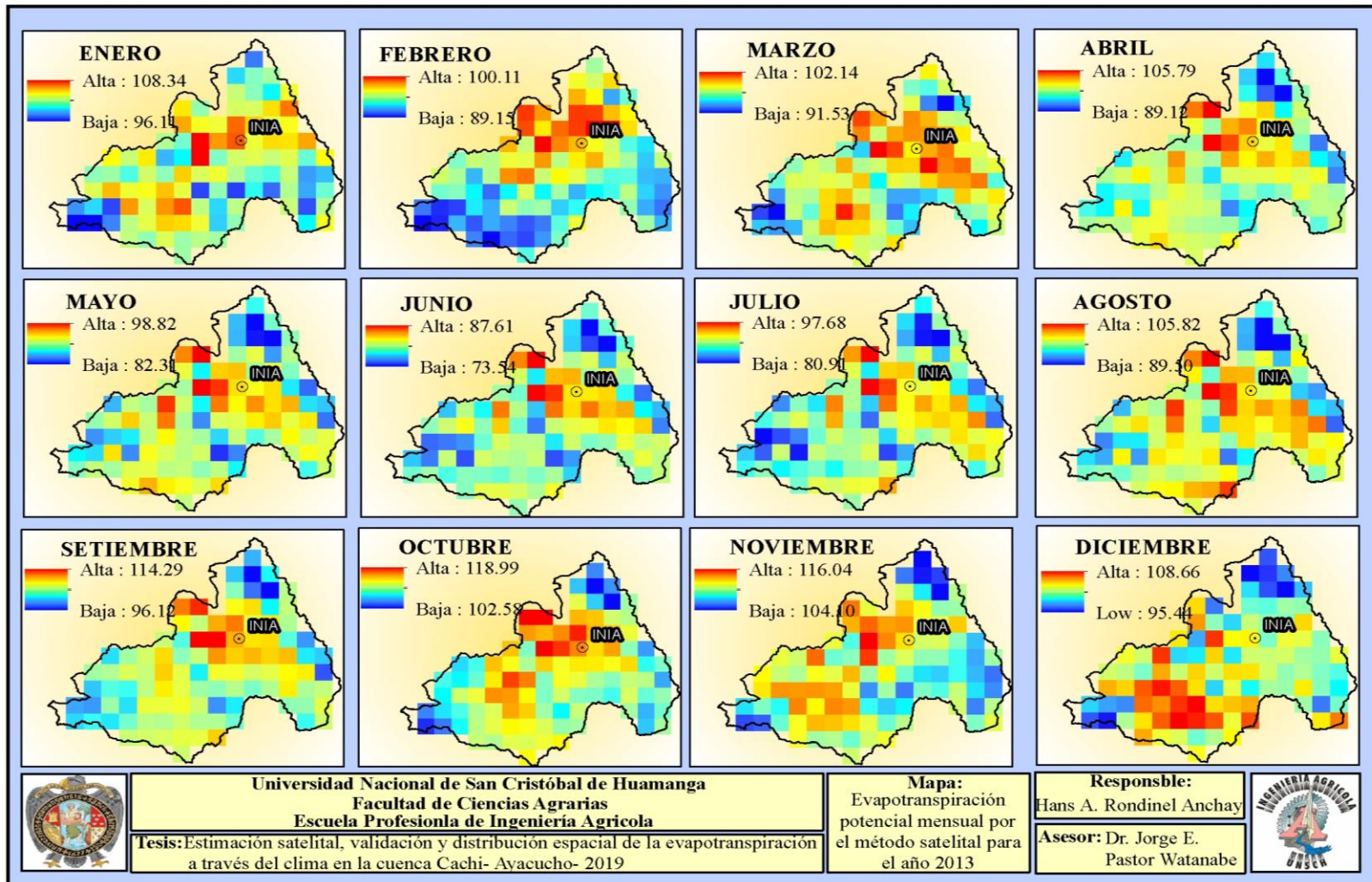


Figura 3.18. Mapas temáticos de la evapotranspiración potencial por el método satelital calibrado para el año 2013

Fuente: Elaboración propia

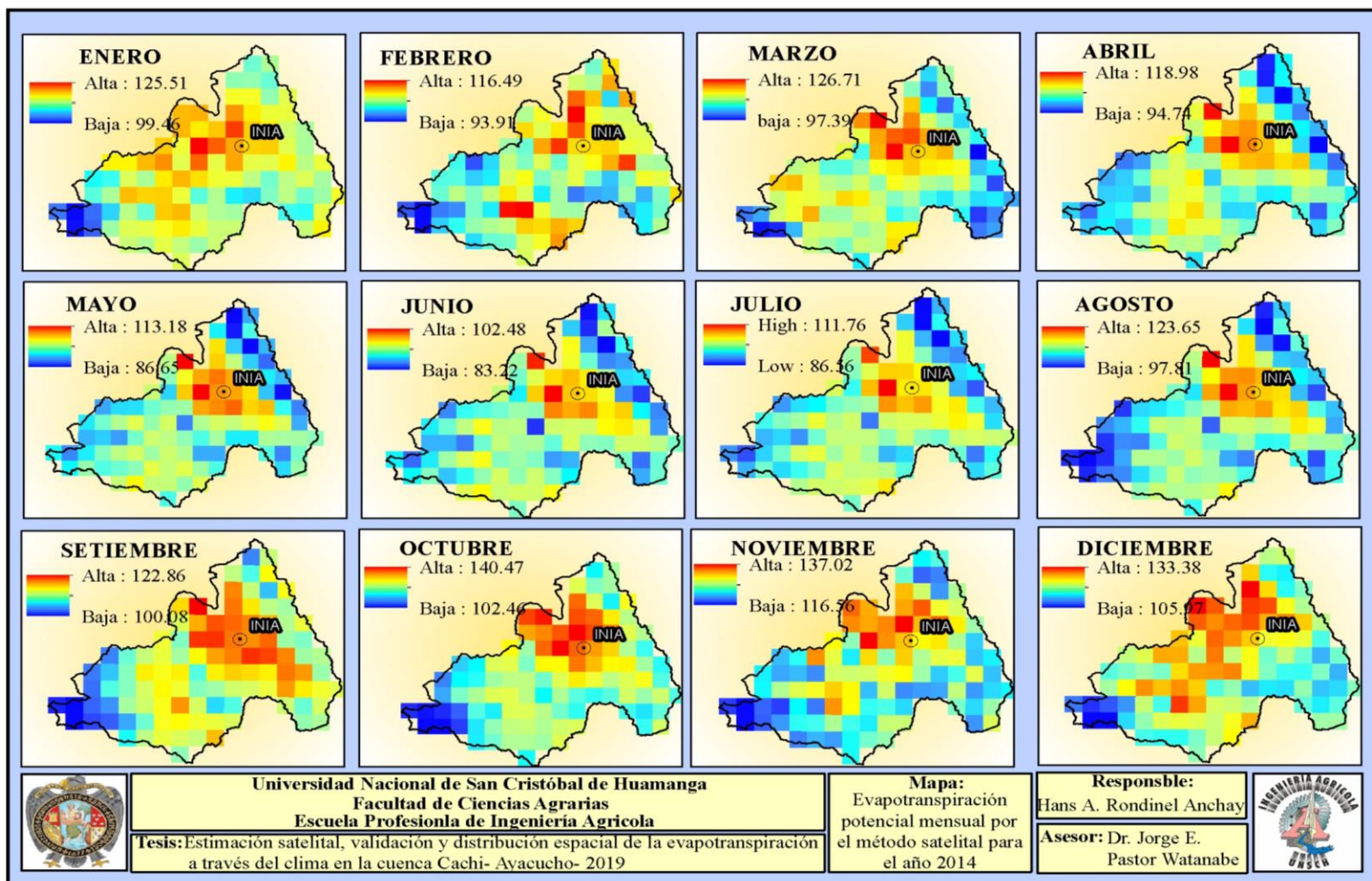


Figura 3.19. Mapas temáticos de la evapotranspiración potencial por el método satelital calibrado para el año 2014

Fuente: Elaboración propia

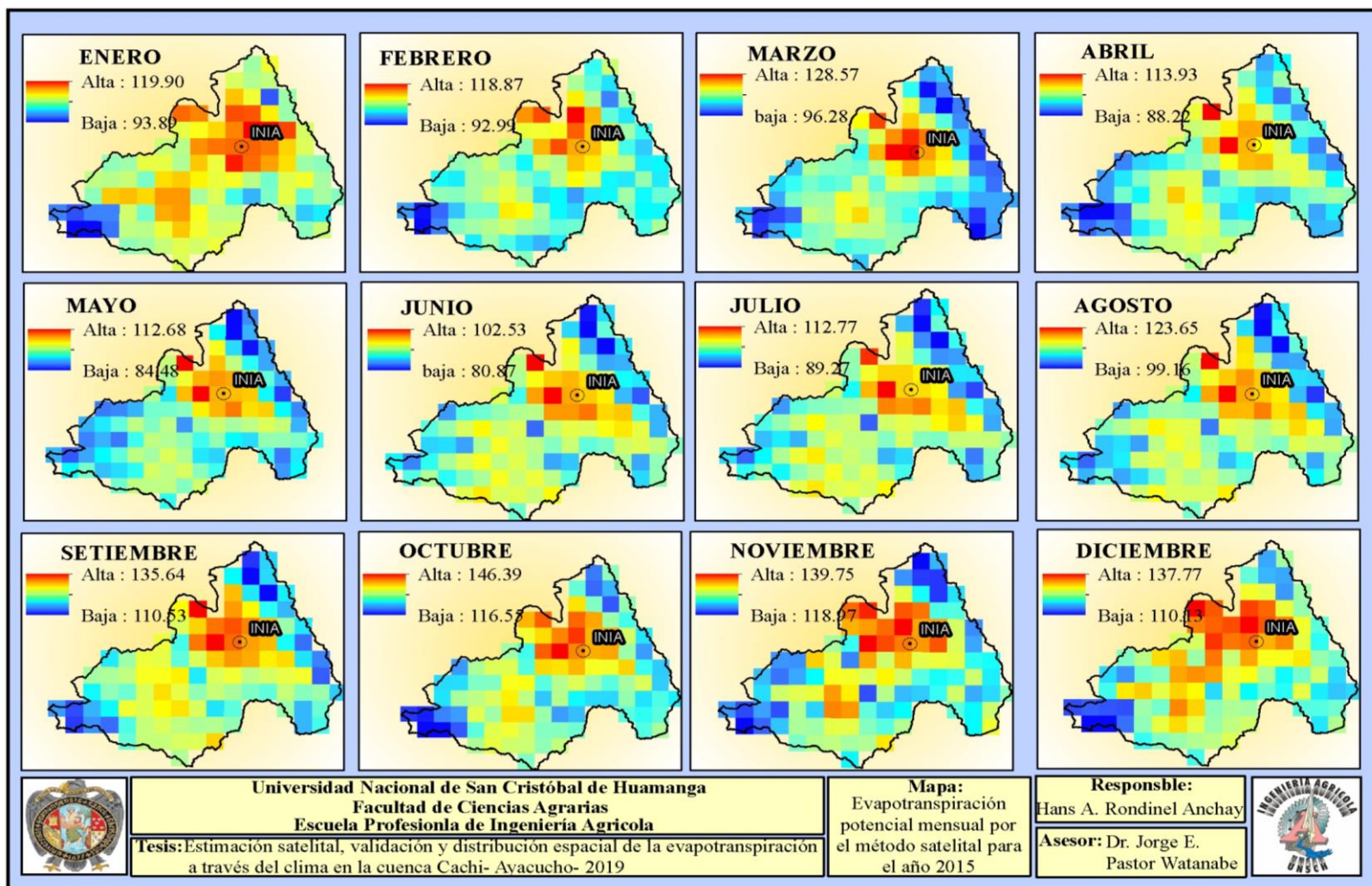


Figura 3.20. Mapas temáticos de la evapotranspiración potencial por el método satelital calibrado para el año 2015

Fuente: Elaboración propia

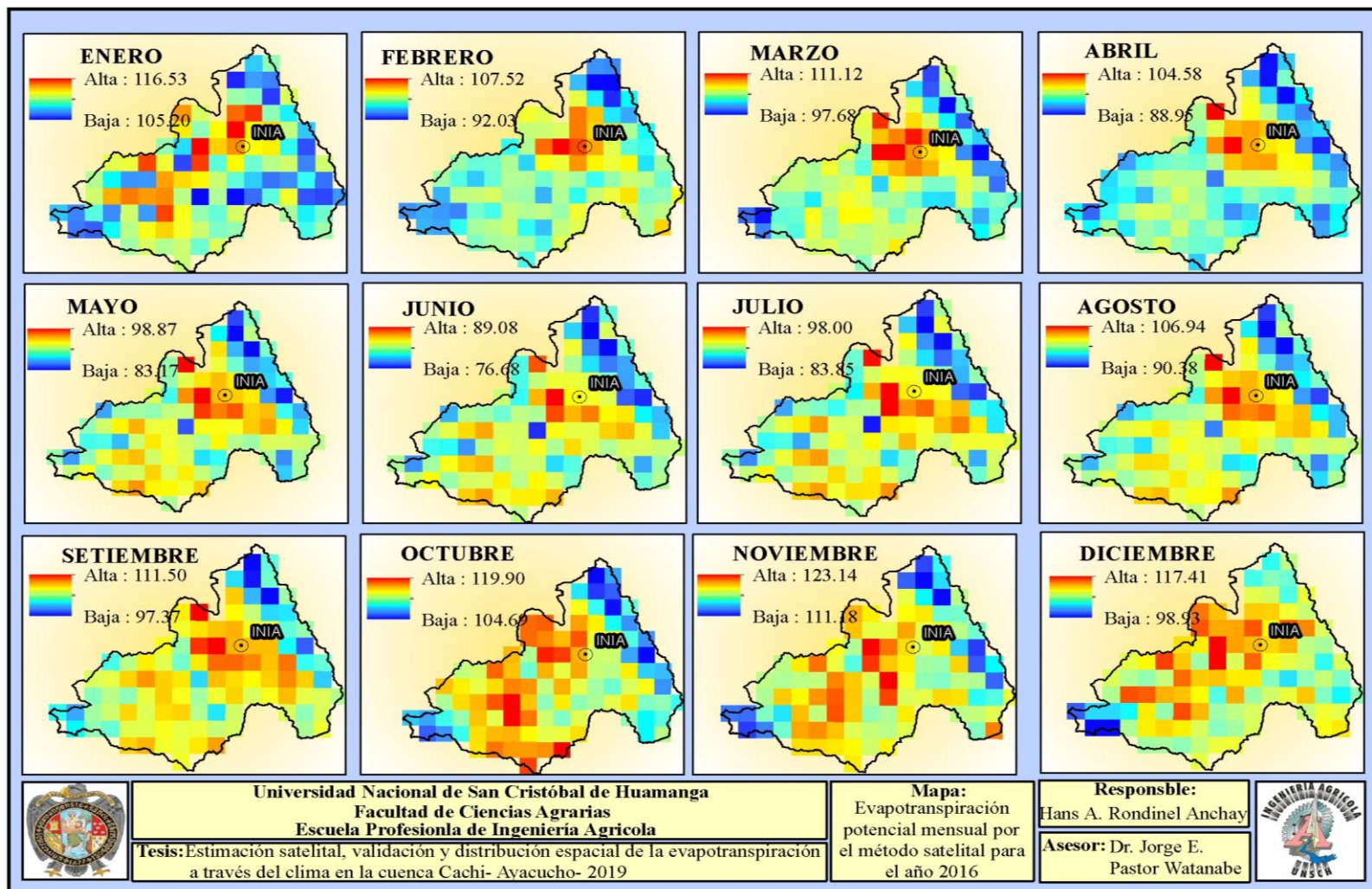


Figura 3.21. Mapas temáticos de la evapotranspiración potencial por el método satelital calibrado para el año 2016

Fuente: elaboración propia

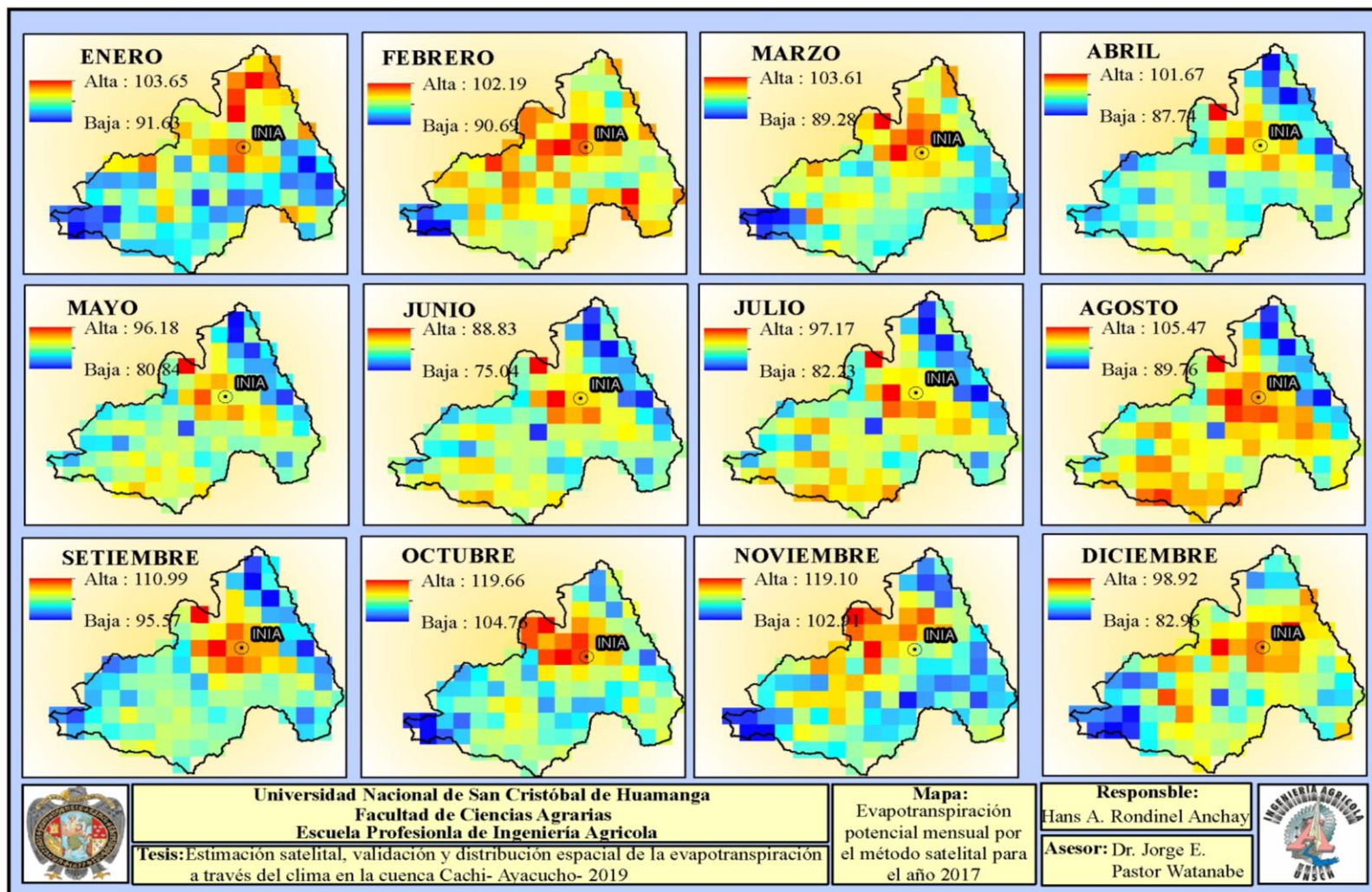


Figura 3.22. Mapas temáticos de la evapotranspiración potencial por el método satelital calibrado para el año 2017

Fuente: Elaboración propia

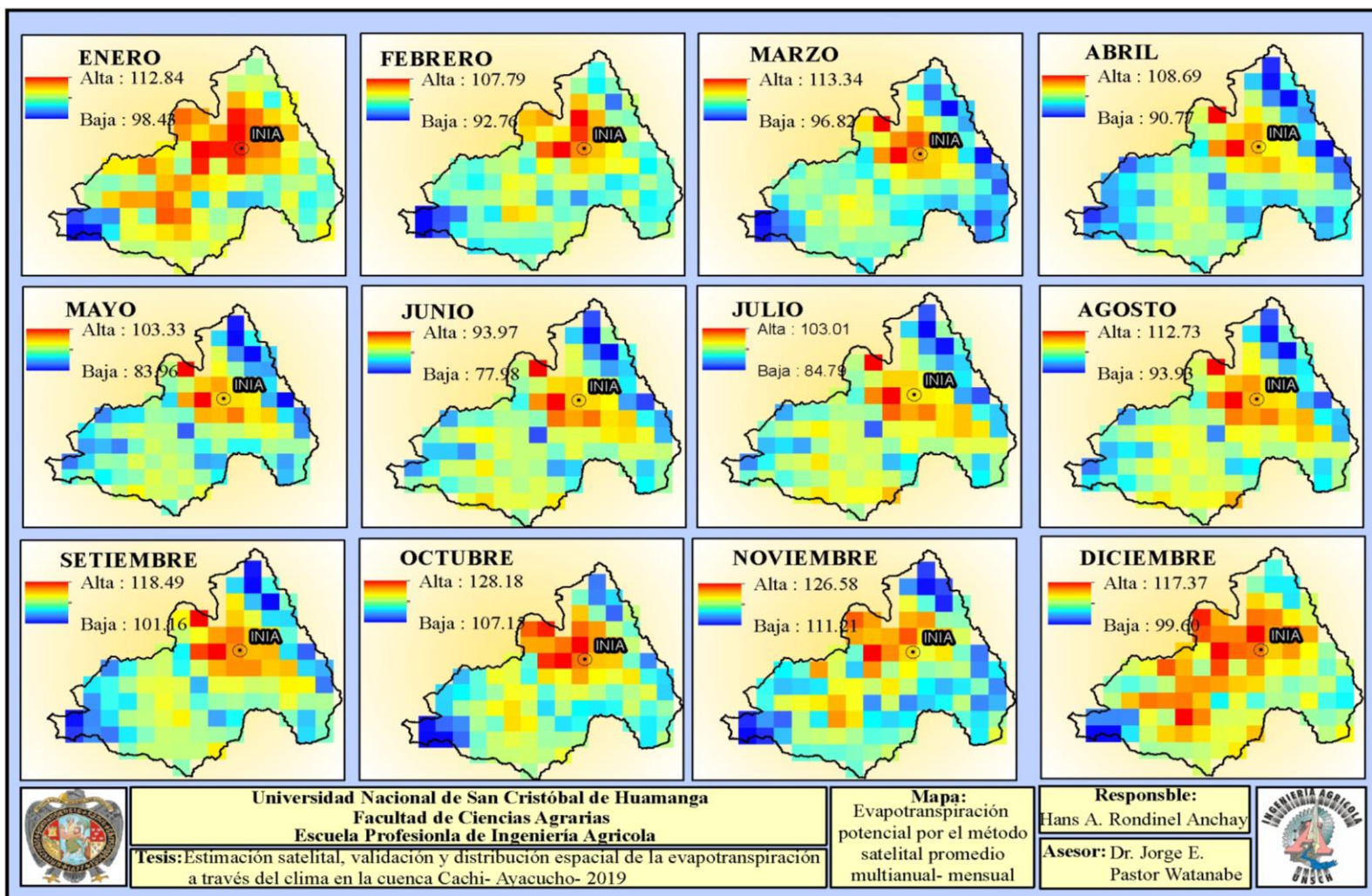


Figura 3.23. Mapas temáticos de la evapotranspiración potencial por el método satelital calibrado promedio multianual - mensual

Fuente: Elaboración propia

En las figuras 3.18 al 3.22, se presentan los mapas temáticos con sus distribuciones espaciales de la evapotranspiración potencial previamente calibrados frente a los métodos convencionales seleccionados. En la figura 3.23, se aprecia el promedio multianual - mensual de todos los mapas temáticos. En el lado izquierdo superior de cada mapa, se encuentran los rangos de valores de evapotranspiración potencial distribuidos y agrupados por los colores descritos, las áreas de color rojo representan el rango de valores más altos y las áreas de azul representan el rango de valores más bajos de evapotranspiración potencial. Estos mapas están listos y disponibles para la aplicación en diferentes trabajos.

3.3.3. Validación del método satelital frente a los métodos convencionales

Ya calibrado el método satelital, se construyó la tabla 3.20, para luego ser validados por los índices estadísticos.

Tabla 3.20. Evapotranspiración potencial promedio multianual y mensual para los métodos seleccionados (calibrado)

Meses	Método satelital mm/mes	Tanque evaporímetro Clase A mm/mes	FAO Penman Monteith mm/mes	Hargreaves en base a datos de radiación solar mm/mes	Hargreaves en base a la temperatura mm/mes
Enero	111.80	96.76	121.04	121.15	121.24
Febrero	105.56	85.80	101.79	114.16	97.87
Marzo	109.81	93.27	105.33	108.15	95.42
Abril	104.61	99.19	105.97	110.84	93.26
Mayo	98.39	107.86	109.28	104.29	95.38
Junio	89.60	100.76	93.29	98.14	75.65
Julio	97.38	111.60	96.01	99.61	78.60
Agosto	108.00	111.50	109.62	109.56	101.71
Setiembre	115.63	105.64	120.86	123.60	118.83
Octubre	125.39	105.85	128.41	124.78	133.12
Noviembre	122.73	106.64	135.53	132.71	142.40
Diciembre	114.24	102.23	117.57	114.03	125.14
Total (mm/año)	1303.15	1227.11	1344.72	1361.03	1278.61

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 3.20, se muestran los promedios multianuales - mensuales de la evapotranspiración potencial por todos los métodos, tomando en cuenta el método satelital calibrado.

Se ha realizado la correlación lineal entre el método satelital calibrado frente a los métodos convencionales para determinar los coeficientes de determinación (R^2), teniendo en cuenta que los valores óptimos son los que se acercan a la unidad (Tabla 2.12).

Las correlaciones lineales entre las estimaciones de la evapotranspiración potencial con el método satelital frente a los métodos convencionales, se muestra en las figuras 3.24 al 3.27.

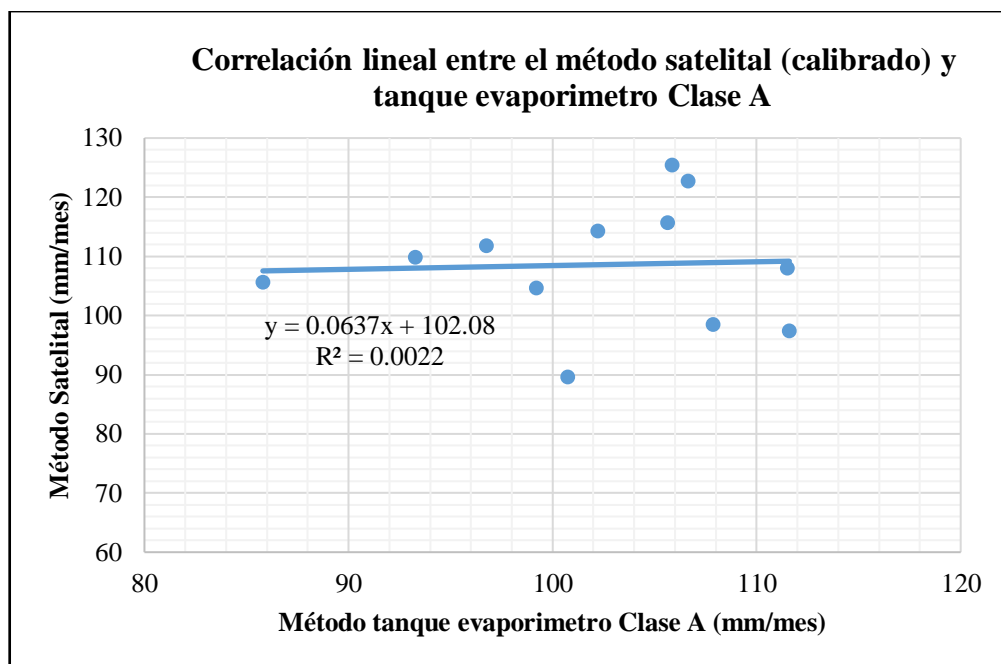


Figura 3.24. Correlación lineal del método satelital (calibrado) frente al método tanque evaporímetro Clase A

Fuente: Elaboración propia

En la figura 3.24, se muestra que frente al método tanque evaporímetro Clase A se obtuvo el coeficiente de determinación (R^2) = 0.0022. Según los criterios de interpretación del desempeño del coeficiente R^2 (Tabla 2.12), el método satelital presenta deficiente correlación frente al método tanque evaporímetro Clase A.

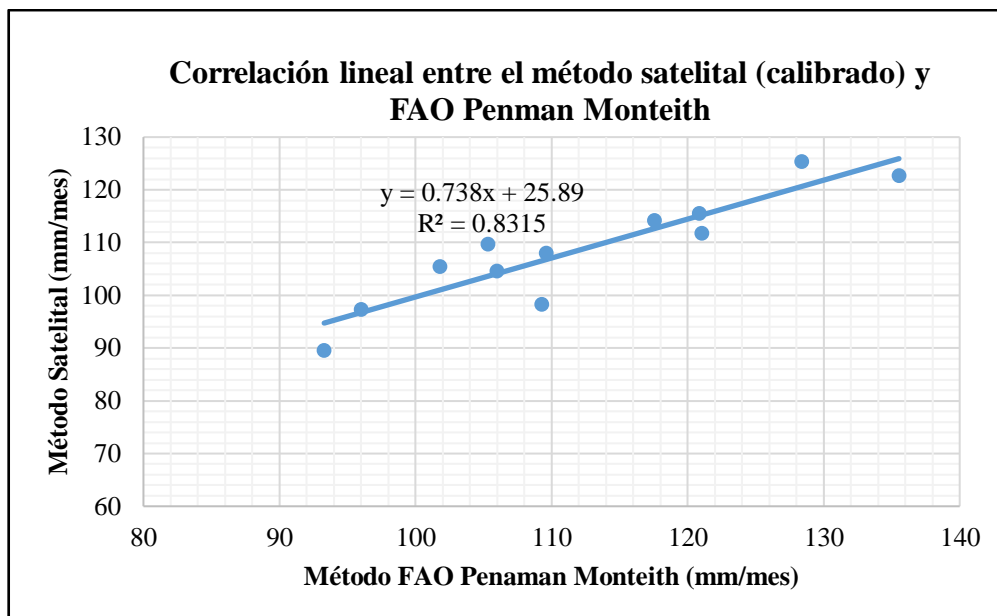


Figura 3.25. Correlación lineal del método satelital (calibrado) frente al método FAO Penman Monteith

Fuente: Elaboración propia

En la figura 3.25, se muestra que frente al método FAO Penman Monteith se obtuvo el coeficiente de determinación (R^2) = 0.8315. Según los criterios de interpretación del desempeño del coeficiente R^2 (Tabla 2.12), el método satelital presenta buena correlación frente al método FAO Penman Monteith.

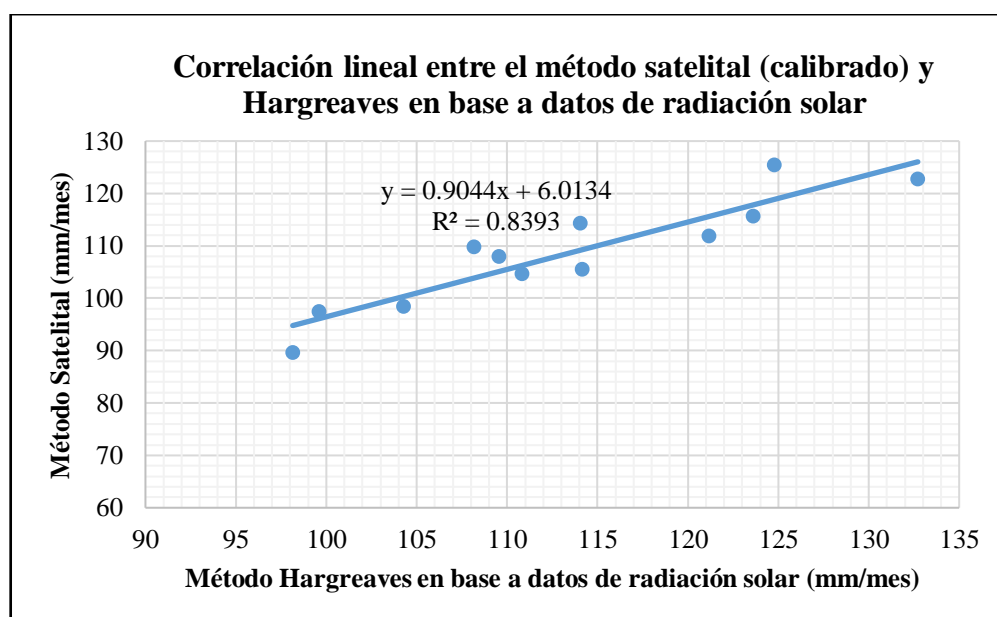


Figura 3.26. Correlación lineal del método satelital (calibrado) frente al método Hargreaves en base a datos de radiación solar

Fuente: Elaboración propia

En la figura 3.26, se muestra que frente al método Hargreaves en base a datos de radiación solar, se obtuvo el coeficiente de determinación (R^2) = 0.8393. Según los criterios de interpretación del desempeño del coeficiente R^2 (Tabla 2.12), el método satelital presenta buena correlación frente al método Hargreaves en base a datos de la radiación solar.

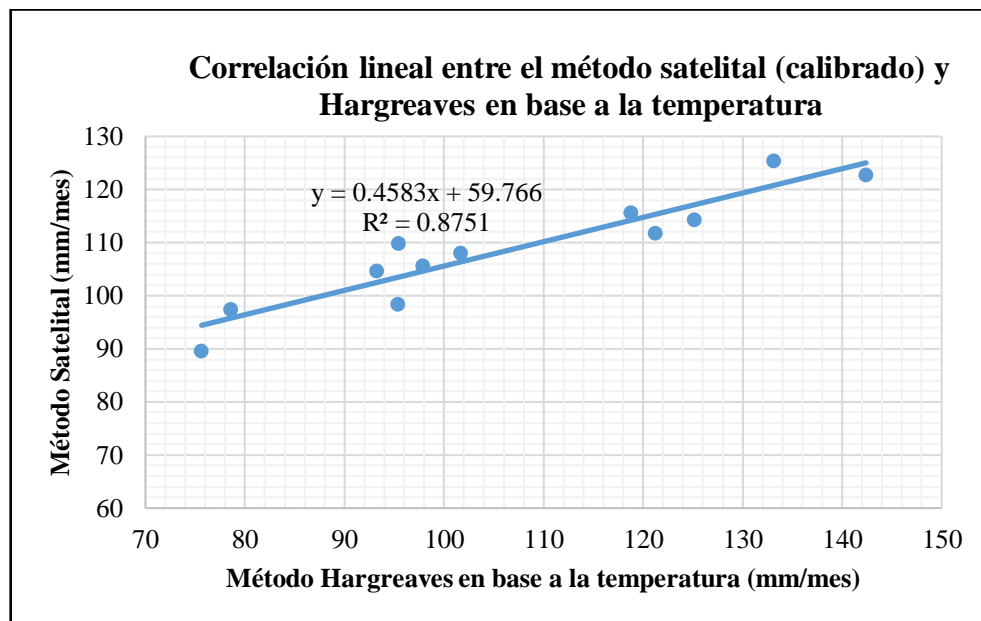


Figura 3.27. Correlación lineal del método satelital (calibrado) frente al método Hargreaves en base a la temperatura

Fuente: Elaboración propia

En la figura 3.27, se muestra que frente al método Hargreaves en base a la temperatura, se obtuvo el coeficiente de determinación (R^2) = 0.8751. Según los criterios de interpretación del desempeño del coeficiente R^2 (Tabla 2.12), el método satelital presenta buena correlación frente al método Hargreaves en base a la temperatura.

Los resultados presentaron coeficientes de determinación R^2 , que varían entre 0.0022 a 0.8751. Según los parámetros evaluados, se observa que el método satelital se ajusta más al método Hargreaves en base a la temperatura, pues presenta un R^2 igual a 0.8751, el cual se acerca más a la unidad respecto a los otros métodos, tal como se muestra en la figura 3.27.

Por otra parte, el método satelital difiere más respecto al método tanque evaporímetro Clase A, pues presenta un R^2 igual a 0.0022, el cual es el más alejado a la unidad, tal como se muestra en la figura 3.24.

Con las ecuaciones presentadas en la tabla 2.12 de los índices estadísticos, se construyó la tabla 3.21, donde se muestran los rendimientos del método satelital frente a los métodos convencionales, teniendo en cuenta los criterios de desempeño de los índices estadísticos (Tabla 1.5, 1.6 y 2.5).

Tabla 3.21. Validación de los resultados calibrados mediante los índices estadísticos

Índice	Tanque evaporímetro Clase A		FAO Penman Monteith		Hargreaves en base a datos de radiación solar		Hargreaves en base a la temperatura	
	Valor	Desempeño	Valor	Desempeño	Valor	Desempeño	Valor	Desempeño
Nash - Sutcliffe (NSE)	-2.483	Insuficiente	0.742	Muy bueno	0.606	Muy bueno	0.666	Muy bueno
RMSE (mm/día)	0.452	*	0.205	*	0.212	*	0.386	*
MAPE (%)	12.685	*	4.387	*	4.590	*	10.47	*
Concordancia (d)	0.342	**	0.920	**	0.903	**	0.848	**
Determinación (R^2)	0.002	**	0.831	**	0.839	**	0.875	**
Correlación (r)	0.047	**	0.912	**	0.916	**	0.935	**
Confianza (c)	0.016	Pésimo	0.839	Muy bueno	0.827	Muy bueno	0.794	Muy bueno

(*) El valor óptimo es 0; (**) El valor óptimo es 1

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 3.21, se muestra que el método satelital tuvo resultados muy buenos frente a los métodos: FAO Penman Monteith, Hargreaves en base a datos registrados de radiación solar y Hargreaves en base a la temperatura; mientras que los resultados fueron insuficientes para el método tanque evaporímetro Clase A.

El Número de Nash - Sutcliffe (NSE) se evaluó bajo los criterios de la tabla 1.5, determinando que es muy bueno frente a los métodos FAO Penman Monteith, Hargreaves en base a datos registrados de radiación solar, y Hargreaves en base a la temperatura, e insuficiente para el método del tanque evaporímetro Clase A.

La raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE) varió entre 0.205 y 0.452 mm/día, según la tabla 2.12; el valor óptimo será el que se acerque a cero. En la tabla 3.21, notamos que el método que se aleja más a la unidad es el tanque evaporímetro Clase A, el cual tiene

un RMSE igual a 0.452 mm/día, mientras que se obtuvo un RMSE de 0.205 mm/día para el método FAO Penman Monteith, el cual es el que se acerca más a cero obteniendo un valor positivo frente a los demás métodos. Lo mismo sucede con los demás índices estadísticos. Para el método FAO Penman Monteith obtuvimos resultados más aceptables que los demás métodos, los cuales son resultados bastante apreciables.

Los resultados deberían asemejarse más al método de Hargreaves en base a datos registrados de radiación solar, pues el método satelital es una simplificación de ello; pero esto no sucede. Probablemente, se deba a los datos aplicados, pues en la ecuación indica que se debe considerar datos de radiación solar registrada en estaciones meteorológicas, pero en la cuenca Cachi, al no contar con piranómetros, se procede a estimar estos valores a través del anexo A, tablas: A.2, A.3, A.4, mientras que el método satelital obtiene valores a partir del DEM de la cuenca Cachi (obtenidos del geoservidor USGS Earth Explorer) y procesados en la plataforma computacional ArcGIS 10.3, tal como se explica en el subcapítulo 2.3.1, figura 2.27.

3.3.4. Discusiones del ajuste y validación de los resultados obtenidos mediante los índices estadísticos

Al respecto, Retamozo (2015) comparó los resultados de la evapotranspiración potencial y obtuvo confiabilidad en ellos, los calibró y validó por los índices estadísticos. En la calibración, obtuvo factores de 0.1, para los meses que cuenta con cuatro imágenes, y 0.14 para los meses que cuenta con tres imágenes. En su validación obtuvo la tabla 3.22.

Tabla 3.22. Desempeño de cada método de acuerdo al valor “c”. 2011 - 2014, INIA

Coefficiente	Tanque evaporímetro Clase A	FAO Penman Monteith	Hargreaves en base a la temperatura
Determinación (R^2)	0.55	0.79	0.62
Correlación lineal (r)	0.74	0.89	0.79
Concordancia (d)	0.41	0.91	0.44
Confianza (c)	0.30	0.81	0.35
Desempeño	Pésimo	Muy bueno	Pésimo

Fuente: (Retamozo, 2015)

En el presente trabajo, se muestra la calibración en la tabla 3.16, obteniendo coeficientes de 0.58 y 44.77, que serán multiplicado y sumado, respectivamente. Los

resultados de la validación se muestran en la tabla 3.21, que de acuerdo a los criterios de interpretación del desempeño de los índices estadísticos, muestra que los resultados son: insuficiente respecto al método de tanque evaporímetro Clase A, y muy bueno respecto a los demás métodos, resultado similar obtenido por Retamozo (2015), pues en la tabla 3.22 se aprecia pésimo para el método tanque evaporímetro Clase A y Hargreaves en base a la temperatura, y muy bueno respecto al método de FAO Penman Monteith.

Así mismo, Maldonado et al. (2019) determinaron el índice de concordancia (d), error cuadrático medio sistemático (RMSE) e índice de determinación (R^2), en los cuales, sus resultados obtenidos fueron satisfactorios, con valores medios de 0.67, 0.95 (mm) y 0.72, respectivamente.

También Aguilera (2018) afirma que se realizó la calibración del método de Hargreaves mediante un coeficiente de ajuste anual (Ca), para cada estación (ET_{0HG_a}), a partir de los valores diarios calculados de evapotranspiración potencial en el período 2008 - 2011. El ajuste se llevó a cabo mediante el método de mínimos cuadrados, con una recta de regresión forzada al origen: $y = Ca * x$, obteniendo un coeficiente anual de calibración de 0.0021. Con respecto a la validación de sus resultados, obtuvo un promedio del coeficiente de determinación ($R^2 = 0.91$) y la Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE) varió entre 0.96 y 0.26 mm/día, con un promedio de 0.57 mm/día.

Lujano et al. (2019) obtuvieron índices estadísticos cuantitativos de Error Porcentual (PE), Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE), Índice de concordancia (d), Coeficiente de correlación (r) e Índice de confianza (c). Los resultados son alentadores para el método de HS_Berti, pues estadísticamente tiene un desempeño óptimo respecto a los demás métodos, con $RMSE = 0.22$ mm/día, $PE = 3.24$ %, $d = 0.29$, $r = 0.95$ y $c = 0.27$. Se concluye que el método de HS_Berti, al tener el mejor desempeño, puede ser utilizado como una alternativa para la estimación de la evapotranspiración potencial, en casos de limitación de datos meteorológicos.

En el presente trabajo, se obtuvieron resultados para el método del tanque evaporímetro Clase A: Número de Nash - Sutcliffe ($NSE = -2.483$), Raíz del Error Cuadrático Medio ($RMSE = 0.452$ mm/día), Error Porcentual Absoluto Medio ($MAPE = 12.685$ %), Índice de concordancia ($d = 0.342$), Coeficiente de correlación ($r = 0.047$) e Índice de

confianza ($c = 0.016$) y para los demás métodos: $NSE = 0.671$, $RMSE = 0.268$ mm/día, $MAPE = 6.482$ %, $d = 0.89$, $r = 0.921$ y $c = 0.82$ en promedio. Determinando insuficiente para el método tanque evaporímetro Clase A y muy buenos para los demás métodos de acuerdo a la escala de interpretación del desempeño de los índices estadísticos.

3.3.5. Aplicación de la evapotranspiración potencial por el método satelital para calcular la evapotranspiración real de una cédula de cultivos planteada

Con los datos propuestos en la tabla 2.11, se ha elaborado propuesta de la cédula de cultivos, presentada en la tabla 3.23.

Tabla 3.23. Cédula de cultivos propuesta para calcular la evapotranspiración real

Cultivos	%	Áreas (ha)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Total
Papa	34.483	300	0.32							0.27	0.72	0.95	0.97	0.80	
Maíz Choclo	17.241	150	0.80	0.32							0.27	0.72	0.95	0.97	
Quinoa	10.345	90	0.54	0.74	0.84	0.42							0.11	0.33	
Trigo	10.345	90	0.54	0.74	0.84	0.42							0.11	0.33	
Cebada	10.345	90	0.54	0.74	0.84	0.42							0.11	0.33	
Rye grass inglés	17.241	150	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	
Total:	100	870													
Área cultivada por mes (ha)			870.00	570.00	420.00	420.00	150.00	150.00	150.00	450.00	600.00	600.00	870.00	870.00	
Coefficiente Ponderado de Kc			0.59	0.70	0.90	0.63	1.00	1.00	1.00	0.51	0.68	0.91	0.70	0.72	
ET_o (mm/mes)			111.80	105.56	109.81	104.61	98.39	89.60	97.38	108.00	115.63	125.39	122.73	114.24	1303.15
ET_c (mm/mes)			65.77	73.67	98.52	65.60	98.39	89.60	97.38	55.44	78.34	113.48	86.50	82.02	1004.71

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 3.23, se presentan los cálculos necesarios para obtener la evapotranspiración real de la cédula de cultivos propuesta. Los coeficientes de Kc para los cultivos están a lo largo de su período vegetativo mensual. Para el rye grass inglés se consideró el Kc igual a 1.00, esto debido a que este tipo de pasto pertenece a la familia del cultivo de referencia tomado por la FAO, el cual toma de manera genérica una superficie extensa de pasto verde de altura uniforme, creciendo activamente y bien regada, lo cual es un caso similar al rye grass inglés, quien también presenta estas condiciones. Para tener bien claro, el Kc es un coeficiente de corrección de crecimiento de cultivo, el cual, corrige la evapotranspiración potencial que se calcula para un cultivo a cobertura total; por lo tanto, el pasto ya no tendría que corregirse, puesto que, presenta una cobertura total.

Las evapotranspiraciones potenciales mensuales fueron extraídas de los mapas temáticos calibrados, promedio mensual y multianual, tal como se muestra en la figura 3.28, los cuales coinciden con los resultados de la tabla 3.17.

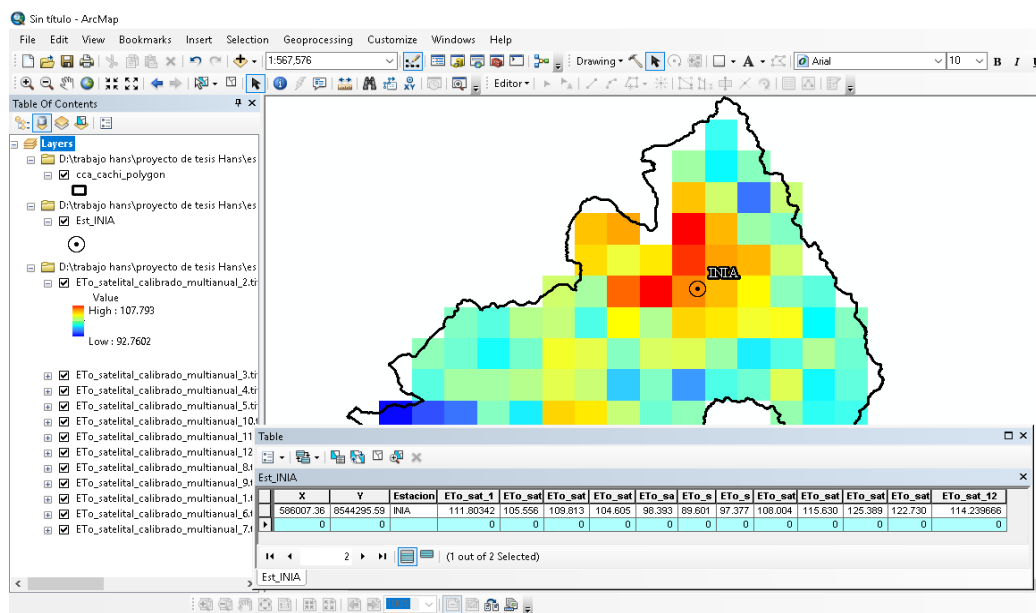


Figura 3.28. Extracción de valores del mapa temático de evapotranspiración potencial

Fuente: Elaboración propia

Los valores de Kc ponderado de la tabla 3.23 serán aplicados a los mapas temáticos de la figura 3.28 (los cuales son valores de evapotranspiración potencial calibrados), para luego obtener la evapotranspiración real de la cédula de cultivos propuestos (Figura 3.29).

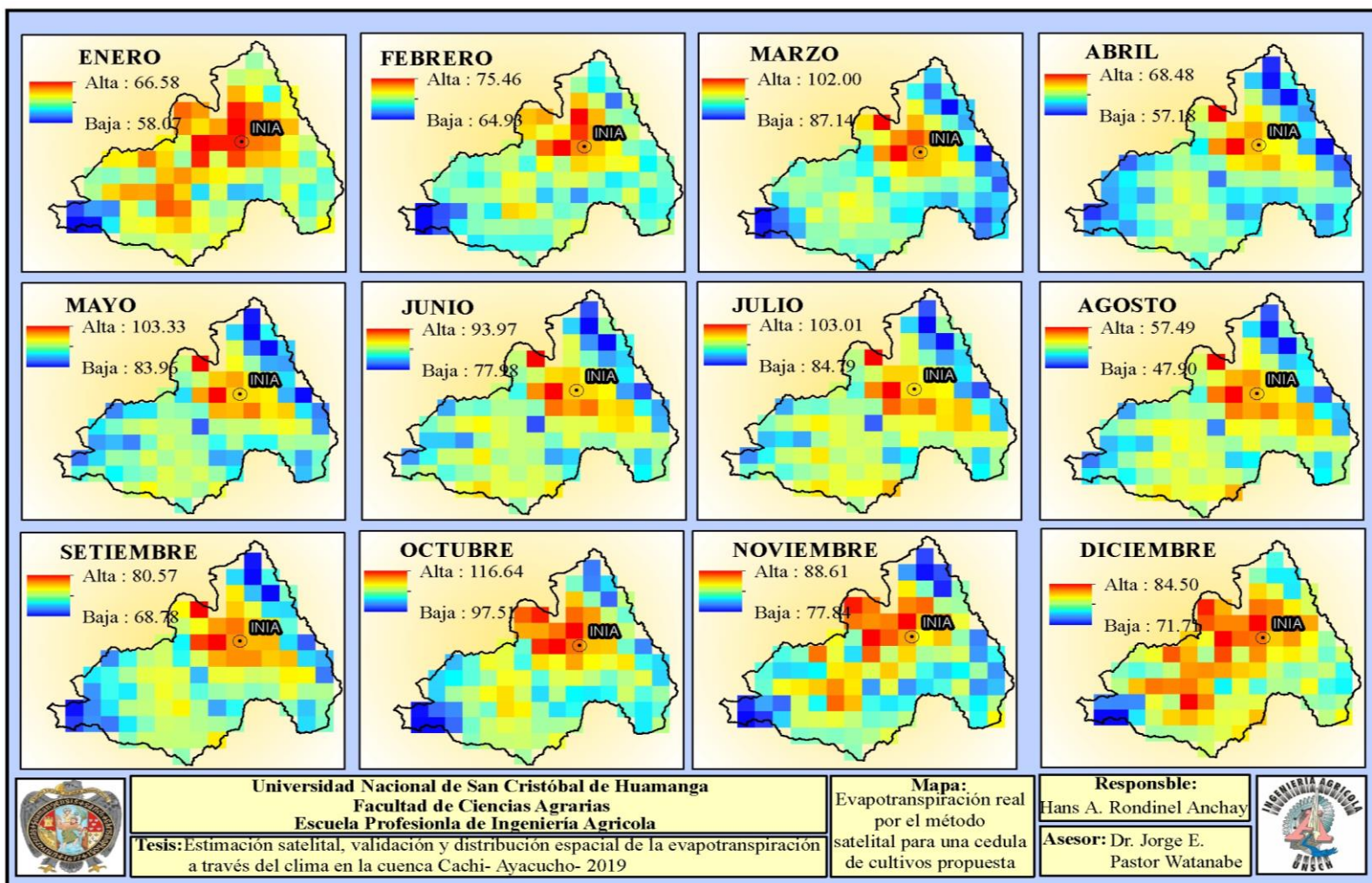


Figura 3.29. Mapas temáticos de la evapotranspiración real por el método satelital para la propuesta de cédula de cultivos

Fuente: Elaboración propia

En la figura 3.29, en la parte superior izquierda de cada mapa se presenta los rangos de acuerdo a los valores de la evapotranspiración real, donde rojo representa áreas de mayor valor, mientras que las de color azul representan menor valor. Dentro de estos dos límites se ha clasificado más colores de acuerdo al valor de la evapotranspiración real correspondiente. De este conjunto de mapas, se puede extraer valores de la evapotranspiración real para cualquier punto perteneciente a la cuenca Cachi.

3.3.6. Balance hídrico

Con lo mencionado en el subcapítulo 1.2.11 del presente trabajo, se obtuvo el mapa del balance hídrico para la evapotranspiración de referencia y real (ET_o y ET_r) para la cuenca Cachi que se aprecia en las figuras 3.30 y 3.31.

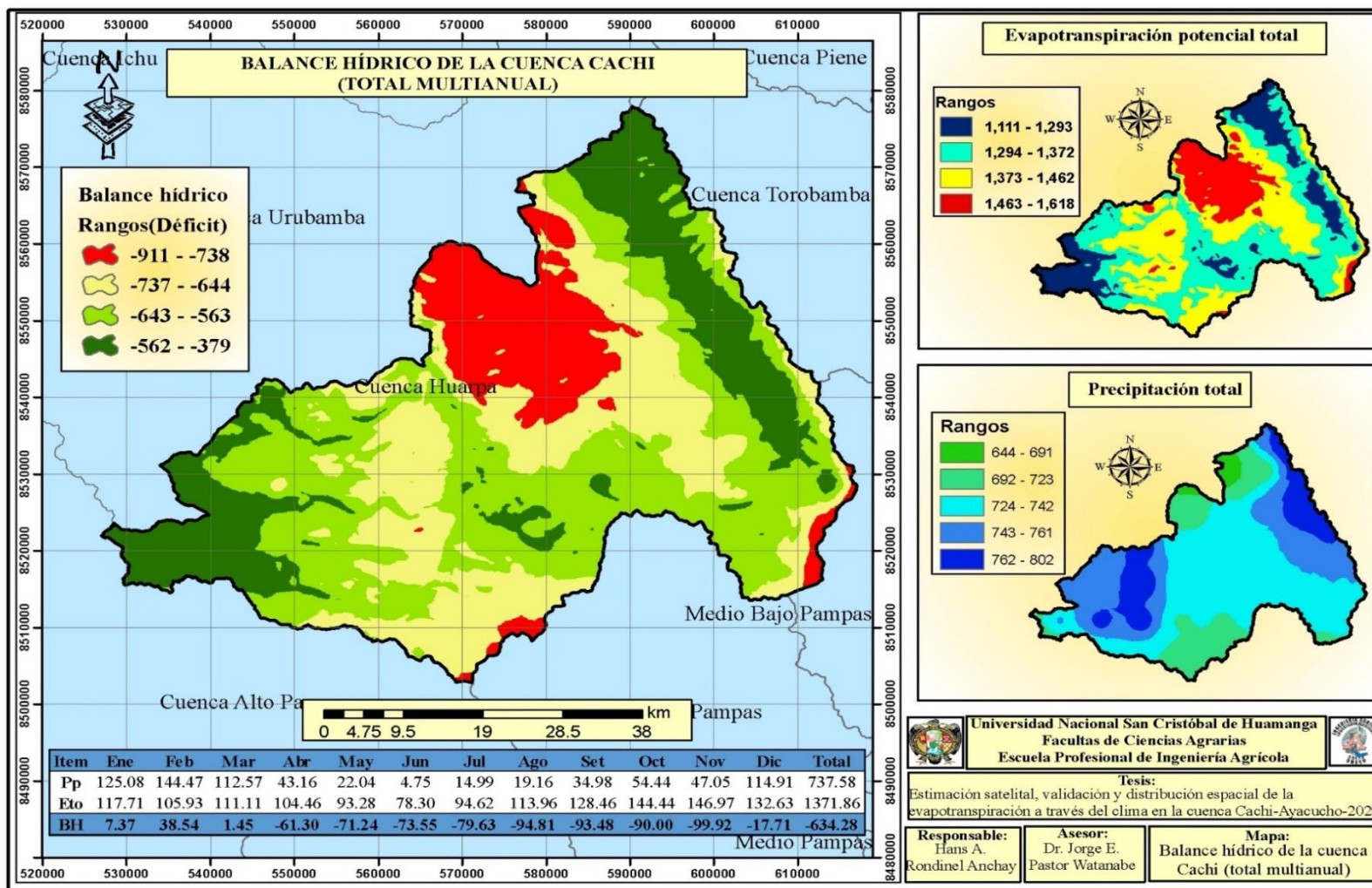


Figura 3.30. Mapa temático del balance hídrico con datos satelitales

Fuente: Elaboración propia

En la figura 3.30, se aprecia que en la cuenca Cachi hay déficit, puesto que, la precipitación es menor que la evapotranspiración de referencia ($P_p \leq E_{To}$), clasificando el mapa en cuatro colores. El rojo representa lugares de mayor déficit (-911 a -738 mm), seguido del amarillo, el verde claro, y con menor déficit el verde oscuro (-562 a -379 mm). Para un mejor análisis se construyó la tabla 3.24.

Tabla 3.24. Parámetros para el balance hídrico (E_{To})

Parámetro	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Total
Precipitación (mm)	125.08	144.47	112.57	43.16	22.04	4.75	14.99	19.16	34.98	54.44	47.05	114.91	737.58
Temperatura media (C°)	8.58	8.52	8.47	10.92	11.42	11.73	12.21	13.83	14.62	15.05	16.09	12.55	12.00
Radiación solar (cal/cm ² /día)	622.08	561.26	589.83	507.21	445.20	369.73	439.53	502.15	552.34	613.10	604.27	609.09	534.65
Evapotranspiración potencial (mm)	117.71	105.93	111.11	104.46	93.28	78.30	94.62	113.96	128.46	144.44	146.97	132.63	1371.86
Balance hídrico	7.37	38.54	1.45	-61.30	-71.24	-73.55	-79.63	-94.81	-93.48	-90.00	-99.92	-17.71	-634.28

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 3.24, se aprecia el balance hídrico de la cuenca Cachi a nivel mensual y a nivel anual (total). De enero a marzo se presenta exceso de precipitación, mientras que de abril a noviembre hay déficit. En diciembre también se aprecia déficit a bajo nivel (-17.71 mm). Mientras que a nivel total se aprecia déficit con valor de -634.28 mm/año, promedio mensual, para el 2013 al 2017.

De la tabla 3.24, también se aprecia que para toda la cuenca Cachi se tiene una precipitación anual - total de 737.58 mm/año, evapotranspiración potencial de 1371.86 mm/año, temperatura media - promedio multianual (en toda la cuenca) de 12 °C y radiación solar 534.65 cal/cm²/día.

Con la tabla 3.23 (cédula de cultivo propuesta para la cuenca) se ha elaborado un mapa temático del balance hídrico de la precipitación con respecto a la evapotranspiración real para la cédula propuesta y que se aprecia en la figura 3.31.

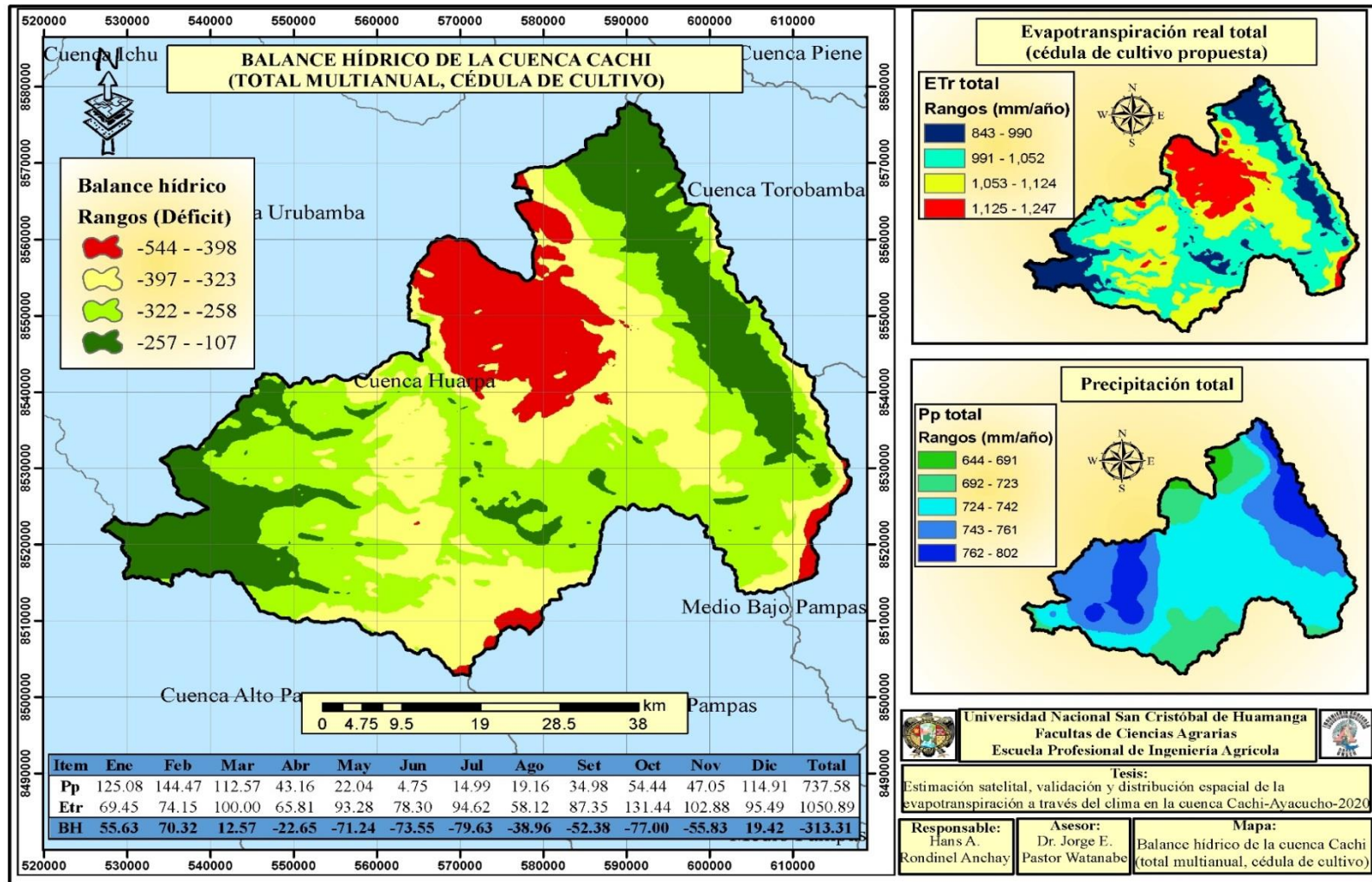


Figura 3.31. Mapa temático del balance hídrico con datos satelitales para la cédula de cultivos

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 3.31, se aprecia que para la cédula de cultivos propuesta (Tabla 3.23) en la cuenca Cachi hay déficit, puesto que, la precipitación es menor que la evapotranspiración real ($P_p \leq E_{Tr}$), clasificando el mapa en cuatro colores: el rojo representa lugares de mayor déficit (-544 a -398 mm), seguido del amarillo, el verde claro, y con menor déficit el verde oscuro (-257 a -107 mm). Para un mejor análisis se construyó la tabla 3.25.

Tabla 3.25. Parámetros para el balance hídrico (ETr)

Parámetro	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Total
Precipitación (mm)	125.08	144.47	112.57	43.16	22.04	4.75	14.99	19.16	34.98	54.44	47.05	114.91	737.58
Temperatura media (C°)	8.58	8.52	8.47	10.92	11.42	11.73	12.21	13.83	14.62	15.05	16.09	12.55	12.00
Radiación solar (cal/cm ² /día)	622.08	561.26	589.83	507.21	445.20	369.73	439.53	502.15	552.34	613.10	604.27	609.09	534.65
Evapotranspiración real (mm)	69.45	74.15	100.00	65.81	93.28	78.30	94.62	58.12	87.35	131.44	102.88	95.49	1050.89
Balance hídrico	55.63	70.32	12.57	-22.65	-71.24	-73.55	-79.63	-38.96	-52.38	-77.00	-55.83	19.42	-313.31

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 3.25, se aprecia el balance hídrico de la cuenca Cachi a nivel mensual y a nivel anual (total), para la cédula de cultivos propuesto en la tabla 3.23. De diciembre a marzo se presenta exceso de precipitación, mientras que de abril a noviembre hay déficit. Así mismo, a nivel total se aprecia un déficit con valor de -313.31 mm/año promedio mensual, para el 2013 al 2017.

De la tabla 3.25 también se aprecia que para toda la cuenca Cachi se tiene una precipitación anual total de 737.58 mm/año y evapotranspiración real de 1050.89 mm/año y temperatura media, promedio multianual (en toda la cuenca) de 12 °C, y radiación solar 534.65 cal/cm²/día.

CONCLUSIONES

1. Se determinó la evapotranspiración potencial con el método satelital a través de la ecuación de Hargreaves en base a datos registrados de radiación solar, resultando 1320.53 mm/año para la estación del INIA y con su distribución espacial a lo largo de la cuenca Cachi para los años 2013 al 2017 en promedio.
2. Se determinó la evapotranspiración potencial mediante los métodos indirectos seleccionados, resultando: tanque evaporímetro Clase A = 1227.11 mm/año, FAO Penman Monteith = 1344.72 mm/año, Hargreaves en base a datos registrados de radiación solar = 1361.03 mm/año y Hargreaves en base a la temperatura = 1278.61 mm/año, a partir de datos meteorológicos de la estación del INIA, para los años 2013 al 2017 en promedio.
3. Se han ajustado y validado los resultados obtenidos por el método satelital frente a los demás métodos, resultando valores insuficientes frente al tanque evaporímetro Clase A: Número de Nash - Sutcliffe (NSE = -2.483), Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE = 0.452 mm/día), Error Porcentual Absoluto Medio (MAPE = 12.685 %), Índice de concordancia (d= 0.342), Coeficiente de correlación (r = 0.047) e Índice de confianza (c= 0.016). Y frente a los métodos FAO Penman Monteith, Hargreaves en base a datos de radiación solar y Hargreaves en base a la temperatura se obtuvo valores promedios muy buenos: Número de Nash - Sutcliffe (NSE = 0.671), Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE = 0.268 mm/día), Error Porcentual Absoluto Medio (MAPE = 6.482 %), Índice de concordancia (d = 0.89), Coeficiente de correlación (r = 0.921) e Índice de confianza (c = 0.82).

RECOMENDACIONES

1. Los resultados de la evapotranspiración potencial se pueden aplicar a cualquier cédula de cultivo dentro del ámbito de la cuenca Cachi en el departamento de Ayacucho. Se debe utilizar el mismo procedimiento para cualquier región o área de interés, pues están respaldados por el presente trabajo de investigación. La estimación satelital de la evapotranspiración se puede usar para determinar las disponibilidades y pérdidas de agua en los requerimientos hídricos en los diferentes proyectos actuales.
2. Ampliar y continuar esta investigación proyectándose a obtener un aplicativo para computadora o Smartphone, tal como lo hace Maldonado et al. (2019), en su artículo científico; en la que plantea se debe utilizar los datos del geoservidor Nasa Giovanni y USGS Earth Explorer, por el rango de serie histórica y el tamaño de pixel que nos permite descargar.
3. En futuras investigaciones, incluir más estaciones meteorológicas, siempre que cuenten con los datos meteorológicos requeridos para estimar la evapotranspiración potencial mediante los métodos empíricos recomendables.
4. Esperar futuras actualizaciones del geoservidor Nasa Giovanni, en la cual mejoren la resolución del tamaño de pixel menor a $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ ($5.57 \times 5.57 \text{ km}^2$), pues si se cuenta con datos de radiación solar a $0.008^\circ \times 0.008^\circ$ ($90 \times 90 \text{ m}^2$) obtenidos y procesados del USGS Earth Explorer y ArcGIS, respectivamente.
5. Los datos satelitales descargados de los geoservidores: Nasa Giovanni y USGS Earth Explorer son confiables para estimar la evapotranspiración, además, permiten descargar a una resolución de pixel apropiada de 0.05° (5.57 km) y 0.0008° (90 m), respectivamente, con una serie de tiempo seleccionada mensualmente y a una distribución espacial requerida (permitiendo descargar a nivel mundial).
6. Los softwares ArcGIS 10.3. y PETP V.2.0.0. son de gran utilidad, pues sus aplicaciones y eficiencias nos han permitido obtener la evapotranspiración de manera práctica.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilera, R. B. (2018). *Calibración de la ecuación de Hargreaves para el cálculo de la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o) en el Oasis Norte de Mendoza, Argentina*. (Tesis de pregrado). Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires - Argentina, 103 pp.
- Alejo, G. (2015). *Sistematización de la información climática obtenida de WorldClim a través de sistemas de información geográfica (SIG) en el municipio de Patacamaya*. (Tesis de pregrado). Universidad Mayor de San Andrés, La Paz - Bolivia, 68 pp.
- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (2006). *Estudio FAO - Riego y drenaje 56. Evapotranspiración de cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Roma - Italia: Publicación N° 56 FAO, 322 pp.
- Amador, J., López, L., López, P., Caldera, A., Estela, J., & Cerda, V. (1999). Determinación simultánea de seis hidrocarburos policíclicos aromáticos en medio micelar por regresión de mínimos cuadrados parciales (PLS - 1) utilizando espectros de fluorescencia de ángulo variable lineal. *Sociedad Chilena de Química*, 44(3), 299 - 313 pp.
- Ariza, F. J., Pinilla, C., & Tovar, J. (1999). GEOTIFF: Una posibilidad de estandarización en el intercambio de información raster en teledetección. *TELEDETECCIÓN. Avances y Aplicaciones*. Albaceta - España: VIII Congreso Nacional de Teledetección, 379 - 382 pp.
- Cáceres, C. S. (2016). *Diseño de un sistema de abastecimiento de materiales para organismos dependientes de la corporación administrativa del poder judicial de la jurisdicción de Concepción*. (Tesis de pregrado). Universidad Católica de la Santísima Concepción, La Concepción - Chile, 60 pp.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. (2000). *Hidrología aplicada*. Santa Fe - Colombia: Nomos S. A., 299 pp.
- Chuvieco, E. (1990). *Fundamentos de teledetección espacial*. Madrid - España: RIALP, S.A., 449 pp.
- Coello, J., & Maspoch, S. (2007). Regresión lineal por mínimos cuadrados. Calibración univariable. Temas avanzados de quimiometría. *Universitat de les Illes Balears*, 187 - 232 pp.

- Conde, L. E. (2018). *Estimación de precipitación por imagen satelital en la provincia de Huamanga, 2014 - 2016*. (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, Ayacucho - Perú, 154 pp.
- Correa, C. E. (2015). *Evaluación de la evapotranspiración del cultivo de banano (*Musa sp*) utilizando la ecuación de la FAO Penman - Monteith*. (Tesis de pregrado). Universidad de Guayaquil, Guayaquil - Ecuador, 52 pp.
- De la Torre, A., Sevilla, J., Leandro, V., & Pitágoras, J. (2009). *Evaluación de los recursos hídricos en la cuenca del río Llave*. Puno - Perú: Ministerio de Agricultura - Autoridad Nacional del Agua, 282 pp.
- Del Carmen, R. (2001). *Modelación de la evapotranspiración con métodos de balance de agua*. (Tesis de maestría). Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe - Argentina, 259 pp.
- Esmeral, R. Y. (2011). *Análisis de la evapotranspiración real en el cultivo de rosa*. (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá - Colombia, 94 pp.
- Fernández, G., & Milla, D. (2018). Validez de los datos de precipitación media mensual (1970 - 2000) generados por el modelo WorldClim V2.0 para Venezuela. *Terra Nueva Etapa*, 34(56), 22 pp.
- Gibbons, J. H. (1984). *Remote Sensing and the private Sector: Issues for Discussion. A Technical Memorandum*. Washington: Office of Technology Assessment, 144 pp.
- Gilvonio, A., & Zeisser, M. (2015). *Gestión del agua y del ambiente en la microcuenca del río Cachi*. Perú: Biblioteca Nacional del Perú, 64 pp.
- Guevara, E. (2015). *Métodos para el análisis de variables hidrológicas y ambientales*. Lima - Perú: Autoridad Nacional del Agua, 422 pp.
- Gutiérrez, C. (2016). PETP. (version 2.0.0) [Software].
- Gutiérrez, C. V. (2018). *Manual del usuario PETP 2.0 evapotranspiración potencial*. Cartago - Costa Rica: Centro de Desarrollo de Material Bibliográfico (CDBM), 268 pp.
- Henríquez, C., Navarro, C., Otárola, A., & Barra, B. (2012). Tamaño de muestra para correlación. *X Congreso Latinoamericano de Sociidades de Estadística Córdoba, Argentina*. Córdoba - Argentina, 11 pp.
- Henriquéz, L., & Miner, A. (2015). Revisión y validación de la evapotranspiración potencial (ETP) media anual y media mensual en Honduras obtenida por

- métodos ambientales de percepción remota. *Revista Ciencia y Tecnología*, (14), 77 - 98 pp.
- Hijmans, R. J., Cameron, S. E., Parra, J. L., Jones, P. G., & Jarvis, A. (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 25(15), 1965 - 1978 pp.
- Irmak, S., & Haman, D. (2003). *Evapotranspiration potencial of reference*. Florida - EE. UU.: Series of the Agricultural and Biological Engineering Department, Institute of Food and Agricultural Sciences(IFAS).
- Kashani, M., & Dinpashoh, Y. (2011). Evaluation of efficiency of different estimation methods for missing climatological data. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, (26), 59 - 71pp.
- Lavao, S. (2016). *Medición y modelamiento de la evapotranspiración real del cultivo de clavel en invernadero de la sabana de Bogotá, usando lisímetros electrónicos de pesada*. (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá - Colombia, 194 pp.
- León, Y. (2002). *Introducción a las imágenes satelitales. Proyecto: Programa de Modernización de la Jurisdicción de Tierras Santo Domingo, Republica Dominicana*. Santo Domingo - Republica Dominicana: Centro de Investigaciones Geoespaciales (CIG), 23 pp.
- Lujano, A., Quispe, J. P., & Lujano, E. (2019). Métodos alternativos de estimación de evapotranspiración de referencia en la estación de Yauri – Cusco, Perú. *Revista de Investigación Altoandina*, 21(3), 215 - 224 pp.
- Lujano, E., Lujano, A., Pitágoras, J., & Lujano, R. (2014). Pronóstico de caudales medios mensuales del río Llave usando modelos de redes neuronales artificiales. *Revista de Investigación Altoandina*, 16(1), 89 - 100 pp.
- Maldonado, W., Borges, T., & De Souza, G. (2019). EVAPO: A smartphone application to estimate potencial evapotranspiration using cloud gridded meteorological data from NASA - POWER system. *ScienceDirect. Computers and electronics in Agriculture*, (156), 187 - 192 pp.
- Marín, V. (2010). *Evaluación entre la evapotranspiración potencial teórica y la evaporación registrada en los departamentos de Cundinamarca y Valle del Cauca*. Bogotá - Colombia: Pontificia Universidad Javeriana, 174 pp.

- Marini, F., Santamaría, M., Oricchio, P., Di Bella, C., & Basualdo, A. (2017). Estimación de evapotranspiración real (ETR) y de evapotranspiración potencial (ETP). *Revista de Teledetección Crossref*, (48), 29 - 41 pp.
- Martelo, M. T. (1995). *El balance hídrico. Cursillo regional de trabajos prácticos sobre técnicas agrometeorológicas en la agricultura operativa de América Latina*. Paipa - Colombia : Organización Meteorológica Mundial.
- Martínez, J., & Díaz, A. (2005). *Percepción Remota,"Fundamentos de teledetección espacial"*. Ciudad de México - México: Comisión Nacional del Agua, 62 pp.
- Martínez, J., & Martín, P. (2010). *Guía didáctica de Teledetección y Medio Ambiente, red nacional de teledetección ambiental*. Madrid - España: Centro de Ciencias Humanas y Sociales(CSIC), 197 pp.
- Mejía, A. (2015). Hidrología aplicada. *Programa de Docencia Virtual en Recursos Hídricos*. Lima: UNALM. Obtenido de <http://prodovirh.lamolina.edu.pe/cursos>, 204 pp
- Miguel, E. (2018). *Teledetección: Plataformas y sensores*. Área de sistemas de teledetección, INTA, 26 pp.
- Navejas, J., Nieto, A., Fraga, H., Rueda, E., & Ávila, N. (2011). Comparación de métodos para estimar la evapotranspiración en una zona árida citrícola del noreste de México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, (13), 147 - 155 pp.
- Núñez, H. (2010). *Requerimiento hídrico y programación de riego para seis cultivos forrajeros. Canaán (2760 m.s.n.m.) - Ayacucho*. (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, Ayacucho- Perú, 135 pp.
- Olarte, W. (1987). *Manual de riego por gravedad*. Lima - Perú: Comisión de Coordinación de Tecnología Andina (CCTA), 148 pp.
- Olaya, V. (2014). *Sistema de información geográfica*. España. Obtenido de https://www.icog.es/TyT/files/Libro_SIG.pdf, 854 pp
- Padilla, J. G. (2016). *Coeficiente del cultivo para el césped americano (Stenotaphum secundatum) utilizando lisímetros de drenaje, durante la estación de otoño - UNALM*. (Tesis de pregrado). Universidad Nacional Agraria la Molina, Lima - Perú, 159 pp.
- Pérez, G. (2015). *Manual de hidrología aplicada*. Lima - Perú. Obtenido de <https://civilgeeks.com/2015/08/28/manual-de-hidrologia-aplicada-ing-giovene-perez-campomanes/>

- Pineda, J. E. (2012). *Uso de los sistemas de información geográfica en la ingeniería civil*. (Tesis de pregrado). Universidad Nacional Autónoma de México, México, 76 pp.
- Retamozo, W. J. (2015). *Estimación de evapotranspiración potencial a partir de imágenes satelitales Modis aplicadas a la zona agrícola de Cannán (2756 m.s.n.m.) - Ayacucho 2015*. (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, Ayacucho - Perú, 166 pp.
- Rodríguez, J., & Olivella, R. (2009). *Introducción a los sistemas de información geográfica. Conceptos y operaciones fundamentales*. Catalunya - España: Universitat Oberta de Catalunya. UOC, 82 pp.
- Sánchez, J. M., Valor, E., Castelles, V., Coll, C., Niclós, R., Galve, J. M., & Mira, M. (2004). Análisis de una metodología para la estimación de la evapotranspiración real diaria mediante teledetección a una escala regional. *Revista de la Asociación Española de Teledetección*, (27), 1233 - 1245 pp.
- Sánchez, M. (2002). Modelos y aproximaciones para la estimación de la evapotranspiración con información satelital. *Pontificia Universidad Católica de Chile. Revista de geografía Norte Grande*, 107 - 120 pp.
- Sánchez, M., & Chuvieco, E. (2000). Estimación de evapotranspiración de cultivo de referencia, ETo, a partir de imágenes NOAA - AVHRR. *Revista de la Asociación Española de Teledetección*, (14), 10 pp.
- Segura, H. M. (2014). *Estudio del ciclo Hidrológico de la cuenca Amazónica mediante el uso de sensoramiento remoto: análisis de evapotranspiración*. (Tesis de pregrado). Universidad Nacional Agraria la Molina, Lima - Perú, 124 pp.
- Segura, M., & Ortiz, C. (2017). Modelación de la evapotranspiración potencial mensual a partir de temperaturas. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 8(3), 93 - 110 pp.
- SENAMHI. (2011). *Mapa de clasificación climática del Perú*. Lima - Perú.
- Tello, V. F. (2016). *Comparación y evaluación de cinco metodologías para determinar la precipitación efectiva y evapotranspiración en Ayacucho*. (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, Ayacucho - Perú, 79pp.
- UNESCO. (2006). *Guía metodológica para la elaboración del mapa de zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas de América Latina y el Caribe*. Montevideo - Uruguay: CAZALAC. Documentos Técnicos del PHI - LAC, N°3.
- Vásquez, A., & Chang, L. (1992). *El riego. Principios básicos*. Lima - Perú, 170 pp.

- Vásquez, N. (2015). Instalación del servicio de agua sistema de riego por asperción en el comité de usuarios de agua Ccaccañan del distrito de Tambillo, provincia de Huamanga, región Ayacucho. *Perfil técnico*. Gobierno Regional de Ayacucho, Ayacucho - Perú, 183 pp.
- Vega, E. C., & Jara, J. C. (2009). Estimación de la evapotranspiración de referencia para dos zonas (Costa y Región Andina) del Ecuador. *Engenharia Agrícola*, 29(3), 390 - 403 pp.
- Waters, R., Allen, R., Tasumi, M., Trezza, R., & Bastiaanssen, W. (2002). *SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land): Advanced training and users manual, version 1.0*. USA: Resources, The Idaho Department of Water.
- Willmott, C. J. (1982). Some comments on the evaluation of model performance. *Bullentin of the American Meteorological Society*, 1309 - 1313 pp.
- Yarad, J. T. (2018). *Estimación de la distribución espacial de evapotranspiración usando imágenes satelitales de temperatura del suelo. Validación en la cuenca alta del río Elqui*. (Tesis de pregrado). Universidad de Chile, Santiago de Chile - Chile, 97 pp.

CITAS ELECTRÓNICAS

1. Google (2001). Recuperado de <https://earth.google.com/web/>
2. Weissel, D. (2016). Ciclo Hídrico: La evapotranspiración. [Figura]. Recuperado de <http://airelibre.cl/que-es-evapotranspiracion-definicion-significado/>
3. Dessi, G. (2006). Representación esquemática de un lisímetro de balanza. [Figura]. Recuperado de <https://es.wikipedia.org/wiki/Lisimetro/>
4. USGS- NASA (2013). Recuperado de <https://landsat.usgs.gov/landsat-8/>
5. ESRI (s.f.). Recuperado de <http://resources.ArcGIS.com/es/help/getting-started/articles/026n00000014000000.htm>
6. ESRI (s.f.). Recuperado de <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/what-is-raster-data.htm>
7. NASA (s.f.). Recuperado de <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>
8. Towes, M. W. (2008). Recuperado de <https://earthexplorer.usgs.gov/>

ANEXOS

ANEXO A

TABLAS PARA EL CÁLCULO DE LA

EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL

Tabla A.1.

Valores del coeficiente del tanque evaporímetro Clase A para diversas localizaciones

Viento (km/día)	Radio de cultivo (m)	Caso A: tanque situado sobre pasto o cultivo			Radio de suelo desnudo (m)	Caso B: tanque situado sobre pasto o cultivo		
		Humedad relativa media (%)				Humedad relativa media (%)		
		Bajo <40	Medio 40-70	Alto >70		Bajo <40	Medio 40-70	Alto >70
Ligero < 175 km/d (< 2 m/s)	0	0.55	0.65	0.75	0	0.70	0.80	0.85
	10	0.65	0.75	0.85	10	0.60	0.70	0.80
	100	0.70	0.80	0.85	100	0.55	0.65	0.75
	1000	0.75	0.85	0.85	1000	0.50	0.60	0.70
Moderado 175-425 km/d (2-5 m/s)	0	0.50	0.60	0.65	0	0.65	0.75	0.80
	10	0.60	0.70	0.75	10	0.55	0.65	0.70
	100	0.65	0.75	0.80	100	0.50	0.60	0.65
	1000	0.70	0.80	0.80	1000	0.45	0.55	0.60
Fuerte 425- 700 km/d (5-8 m/s)	0	0.45	0.50	0.60	0	0.60	0.65	0.70
	10	0.55	0.60	0.65	10	0.50	0.55	0.65
	100	0.60	0.65	0.70	100	0.45	0.50	0.60
	1000	0.65	0.70	0.75	1000	0.40	0.45	0.55
Muy fuerte >700 km/d (> 8m/s)	0	0.40	0.45	0.50	0	0.50	0.60	0.65
	10	0.45	0.55	0.60	10	0.45	0.50	0.55
	100	0.50	0.60	0.65	100	0.40	0.45	0.50
	1000	0.55	0.60	0.65	1000	0.35	0.40	0.45

Fuente: Allen et al. (2006)

Tabla A.2.

Radiación extraterrestre en equivalente de evaporación en mm/día

Hemisferio norte												Lat.	Hemisferio sur											
Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
10.2	11.9	13.9	15.4	16.4	16.6	16.5	15.8	14.5	12.6	10.7	9.7	24	17.5	15.5	12.3	12.3	10.2	9.1	9.5	11.2	13.4	15.6	17.1	17.7
10.7	12.3	14.2	15.5	16.3	16.4	16.4	15.8	14.6	13	11.1	10.2	22	17.4	16.5	12.6	12.6	10.6	9.6	10	11.6	13.7	15.7	17	17.5
11.2	12.7	14.4	15.6	16.3	16.4	16.3	15.9	14.8	13.3	11.6	10.7	20	17.3	16.5	13	13	11	10	10.4	12	13.9	15.8	17	17.4
11.6	13	14.6	15.6	16.1	16.1	16.1	15.8	14.9	13.6	12	11.1	18	17.1	16.5	13.2	13.2	11.4	10.4	10.8	12.3	14.1	15.8	16.3	17.1
12	13.3	14.7	15.6	16	15.9	15.9	15.7	15	13.9	12.4	11.6	16	16.9	16.4	13.5	13.5	11.7	1.08	11.2	12.6	14.3	15.8	16.7	16.8
12.4	13.6	14.9	15.7	15.8	15.7	15.7	15.7	15.1	14.1	12.8	12	14	16.7	16.4	13.7	13.7	12.1	11.2	11.6	12.9	14.5	15.8	16.5	16.6
12.8	13.9	15.1	15.7	15.7	15.5	15.5	15.6	15.2	14.4	13.3	12.5	12	16.6	16.3	14	14	12.5	11.6	12	13.2	14.7	15.8	16.4	16.5
13.2	14.2	15.3	15.7	15.5	15.3	15.3	15.5	15.3	14.7	13.6	12.9	10	16.4	16.3	14.2	14.2	12	12	12.4	13.5	14.8	15.9	16.2	16.2
13.6	14.5	15.3	15.6	15.3	15	15.1	15.4	15.3	14	13.9	13.3	8	16.1	16.1	14.4	14.4	12.4	12.4	12.7	13.7	14.9	15.8	16	16
13.9	14.8	15.4	15.4	15.4	14.7	14.9	15.2	15.3	15	14.2	13.2	6	15.8	16	14.7	14.7	12.8	12.8	13.1	14	15	15.7	15.8	15.7
14.3	15	15.5	15.5	14.3	14.4	14.6	15.1	15.3	15.1	14.5	14.2	4	15.5	15	14.9	14.9	13.2	13.2	13.4	14.3	15.1	15.6	15.5	15.4
14.7	15.3	15.6	15.3	14.6	14.2	14.3	14.9	15.3	15.3	14.8	14.4	2	15.3	15.7	15.1	15.1	13.5	13.5	13.7	14.5	15.2	15.5	15.3	15.1
15	15.5	15.7	15.3	14.4	13.9	14.1	14.8	15.3	15.4	15.1	14.8	0	15	15.5	15.3	15.3	13.9	13.9	14.1	14.8	15.3	15.4	15.1	14.3

Fuente: (Vásquez & Chang, 1992)

Tabla A.3.

Radiación extraterrestre en equivalente de evaporación en mm/día

Hemisferio norte												Lat.	Hemisferio sur											
Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
3.3	6.1	9.4	12.7	15.3	17.1	16.4	14.12	10.9	7.4	4.5	3.2	50	17.5	14.7	10.9	7	4.2	3.1	3.5	5.5	8.9	12.9	16.5	18.2
4.3	6.6	9.8	13	15.9	17.2	16.5	14.3	11.2	7.8	5.8	3.7	48	17.6	14.9	11.2	7.5	4.7	3.5	4	6	9.3	13.3	16.6	18.2
4.9	7.1	10.2	13.3	16	17.2	16.6	14.5	11.5	8.3	5.5	4.3	46	17.7	15.1	11.5	7.9	5.B	4	4.4	6.5	9.7	13.4	16.7	18.3
5.3	7.6	10.6	13.7	16.1	17.2	16.6	14.7	11.9	8.7	6	4.7	44	17.8	15.3	11.9	8.4	5.7	4.4	4.9	6.9	10.2	13.7	16.7	18.3
5.9	8.1	11	14	16.2	17.3	16.7	15	12.2	9.1	6.5	5.2	42	17.8	15.5	12.2	8.8	6.1	4.9	5.4	7.4	10.6	14	16.8	18.3
6.4	8.6	11.4	14.3	16.4	17.3	16.7	15.2	12.5	9.6	7	5.7	40	17.9	15.7	12.5	9.2	6.6	5.3	5.9	7.9	1	14.2	16.9	18.3
6.9	9	11.8	14.5	16.4	17.2	16.7	15.3	12.8	10	7.5	6.1	38	17.9	15.8	12.8	9.6	7.1	5.8	6.3	8.3	11.4	14.4	17	18.3
7.4	9.4	12.1	14.7	16.4	17.2	16.7	15.4	13.1	10.6	8	6.6	36	17.9	16	13.2	10.1	7.5	6.3	6.3	8.8	11.7	14.6	17	18.2
7.9	9.8	12.4	14.8	16.5	17.1	16.3	15.5	13.4	10.8	8.5	7.2	34	17.8	16.1	13.5	10.5	8	6.8	7.2	9.2	12	14.9	17.12	18.2
8.3	10.2	12.8	15	16.5	17	16.3	15.6	13.6	11.2	9	7.8	32	17.8	16.2	13.8	10.9	8.5	7.3	7.7	9.6	12.4	15.1	17.2	18.1
8.8	10.7	13.1	15.2	16.5	17	16.8	15.7	13.9	11.6	9.5	8.3	30	17.8	16.4	14	11.3	8.9	7.8	8.1	10.1	12.7	15.3	17.3	18.1
9.3	11.1	13.4	15.3	16.5	16.8	16.7	15.7	14.1	12	9.9	8.8	28	17.7	16.4	14.3	11.6	9.3	8.2	8.6	10.4	13	15.4	17.2	17.9
9.8	11.5	13.7	15.3	16.4	16.7	16.6	15.7	14.3	12.3	10.3	9.3	26	17.6	16.4	14.4	12	9.7	8.7	9.1	10.9	13.2	15.5	17.2	17.8

Fuente: (Vásquez & Chang, 1992)

Tabla A.4.

Duración máxima diaria media de las horas de fuerte insolación en diferentes meses y latitudes

Lat. norte	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
Lat. sur	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun
50	8.5	10.1	11.8	13.8	15.4	16.3	15.9	14.5	12.7	10.8	9.1	8.1
48	8.8	10.2	11.8	13.6	15.2	16	15.6	14.3	12.6	10.9	9.3	8.3
46	9.1	10.4	11.9	13.5	14.9	15.7	15.4	14.2	12.6	10.9	9.5	8.7
44	9.3	10.5	11.9	13.4	14.7	14	15.2	14	12.6	11	9.7	8.9
42	9.4	10.6	11.9	13.4	14.6	15.2	14.9	13.9	12.9	11.1	9.8	9.1
40	9.6	10.7	11.9	13.3	14.4	15	14.7	13.7	12.5	11.2	10	9.3
35	10.1	11	11.9	13.1	14	14.5	14.3	13.5	12.4	11.3	10.3	9.8
30	10.4	11.1	12	12.9	13.6	14	13.9	13.2	12.4	11.5	10.6	10.2
25	10.7	11.3	12	12.7	13.3	13.7	13.5	13	12.3	11.6	10.9	10.6
20	11	11.5	12	12.6	13.1	13.3	13.2	12.8	12.3	11.7	11.2	10.9
15	11.3	11.6	12	12.5	12.8	13	12.9	12.6	12.2	11.8	11.4	11.2
10	11.6	11.8	12	12.3	12.6	12.7	12.6	12.4	12.1	11.8	11.6	11.5
5	11.8	11.9	12	12.2	12.3	12.4	12.3	12.3	12.1	12	11.9	11.8
0	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1

Fuente: (Vásquez & Chang, 1992)

Tabla A.5.

Factor de evapotranspiración potencial

Lat. sur	Meses											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
1	2.788	2.117	2.354	2.197	2.137	1.99	2.091	2.216	2.256	2.256	2.234	2.265
2	2.371	2.136	2.357	2.182	2.106	1.956	2.05	2.194	2.251	2.251	2.263	2.031
3	2.353	2.154	2.36	2.167	2.079	1.922	2.026	2.172	2.246	2.246	2.29	2.337
4	2.385	2.172	2.362	2.151	2.05	1.888	1.995	2.15	2.24	2.24	2.319	2.372
5	2.416	2.189	2.363	2.134	2.02	1.854	1.96	2.126	2.234	2.234	2.3.45	2.407
6	2.447	2.05	2.363	2.117	1.98	1.82	1.976	2.103	2.226	2.226	2.371	2.442
7	2.478	2.221	2.363	2.099	1.959	1.785	1.893	2.078	2.218	2.218	2.397	2.476
8	2.508	2.237	2.362	2.081	1.927	1.75	1.858	2.054	2.21	2.21	2.423	2.51
9	2.538	2.251	2.36	2.062	1.896	1.715	1.824	2.028	2.201	2.201	2.448	
10	2.567	2.266	2.357	2.043	1.864	1.679	1.789	2.003	2.191	2.191	2.473	2.61
11	2.596	2.279	2.354	2.023	1.832	1.644	1.754	1.976	2.18	2.18	2.497	2.643
12	2.625	2.292	2.35	2.002	1.799	1.608	1.719	1.95	2.169	2.169	2.52	2.675
13	2.652	2.305	2.345	1.981	1.767	1.572	1.684	1.922	2.157	2.157	2.543	2.706
14	2.68	2.317	2.34	1.959	1.733	1.536	1.648	1.895	2.144	2.144	2.566	
15	2.707	2.326	2.334	2.937	1.7	1.5	1.612	1.867	2.131	2.131	2.588	2.738
16	2.734	2.339	2.317	1.314	1.666	1.464	1.576	1.838	2.117	2.117	2.61	2.769
17	2.76	2.349	2.319	1.891	1.632	1.427	1.54	1.809	2.103	2.103	2.631	2.799
18	2.785	2.359	2.311	1.867	2.598	1.391	1.504	1.78	2.068	2.068	2.651	2.83
19	2.811	2.36	2.302	1.843	1.564	1.354	1.467	1.75	2.072	2.072	2.671	2.859

Fuente: (Vásquez & Chang, 1992)

Tabla A.6.

Constante psicrométrica para diferentes altitudes

z (m)	γ kPa°C	z (m)	γ kPa°C	z (m)	γ kPa°C	z (m)	γ kPa°C
0	0.067	1000	0.06	2000	0.053	3000	0.047
100	0.067	1100	0.059	2100	0.052	3100	0.046
200	0.066	1200	0.058	2200	0.052	3200	0.046
300	0.065	1300	0.058	2300	0.051	3300	0.045
400	0.064	1400	0.057	2400	0.051	3400	0.045
500	0.064	1500	0.056	2500	0.05	3500	0.044
600	0.063	1600	0.056	2600	0.049	3600	0.043
700	0.062	1700	0.055	2700	0.049	3700	0.043
800	0.061	1800	0.054	2800	0.048	3800	0.042
900	0.061	1900	0.054	2900	0.047	3900	0.042
1000	0.06	2000	0.053	3000	0.047	4000	0.041

Fuente: Allen et al. (2006)

Tabla A.7.

Pendiente de la curva de presión de vapor para diferentes temperaturas

T °C	Δ kPa/°C	T °C	Δ kPa/°C	T °C	Δ kPa/°C	T °C	Δ kPa/°C
1.0	0.047	13.0	0.098	25.0	0.189	37.0	0.342
1.5	0.049	13.5	0.101	25.5	0.194	37.5	0.350
2.0	0.050	14.0	0.104	26.0	0.199	38.0	0.358
2.5	0.052	14.5	0.107	26.5	0.204	38.5	0.367
3.0	0.054	15.0	0.110	27.0	0.209	39.0	0.375
3.5	0.055	15.5	0.113	27.5	0.215	39.5	0.384
4.0	0.057	16.0	0.116	28.0	0.220	40.0	0.393
4.5	0.059	16.5	0.119	28.5	0.226	40.5	0.402
5.0	0.061	17.0	0.123	29.0	0.231	41.0	0.412
5.5	0.063	17.5	0.126	29.5	0.237	41.5	0.421
6.0	0.065	18.0	0.130	30.0	0.243	42.0	0.431
6.5	0.067	18.5	0.133	30.5	0.249	42.5	0.441
7.0	0.069	19.0	0.137	31.0	0.256	43.0	0.451
7.5	0.071	19.5	0.141	31.5	0.262	43.5	0.461
8.0	0.073	20.0	0.145	32.0	0.269	44.0	0.471
8.5	0.075	20.5	0.149	32.5	0.275	44.5	0.482
9.0	0.078	21.0	0.153	33.0	0.282	45.0	0.493
9.5	0.080	21.5	0.157	33.5	0.289	45.5	0.504
10.0	0.082	22.0	0.161	34.0	0.296	46.0	0.515
10.5	0.085	22.5	0.165	34.5	0.303	46.5	0.526
11.0	0.087	23.0	0.170	35.0	0.311	47.0	0.538
11.5	0.090	23.5	0.174	35.5	0.318	47.5	0.550
12.0	0.092	24.0	0.179	36.0	0.326	48.0	0.562
12.5	0.095	24.5	0.184	36.5	0.334	48.5	0.574

Fuente: Allen et al. (2006)

Tabla A.8.

Coefficiente de cultivo Kc para diferentes especies y de acuerdo a los porcentajes de crecimiento

% de crecimiento	Grupo A	Grupo B	Grupo C	Grupo D	Grupo E	Grupo F	Grupo G	Grupo H
0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0.20	0.15	0.12	0.08	1.00	0.60	0.55	0.90
10	0.36	0.27	0.22	0.15	1.00	0.60	0.60	0.92
15	0.50	0.38	0.30	0.19	1.00	0.60	0.65	0.95
20	0.64	0.48	0.38	0.27	1.00	0.60	0.70	0.98
25	0.75	0.56	0.45	0.33	1.00	0.60	0.75	1.00
30	0.84	0.63	0.50	0.40	1.00	0.60	0.80	1.03
35	0.92	0.69	0.55	0.46	1.00	0.60	0.85	1.06
40	0.97	0.73	0.58	0.52	1.00	0.60	0.90	1.08
45	0.99	0.74	0.60	0.58	1.00	0.60	0.95	1.10
50	1.00	0.75	0.60	0.65	1.00	0.60	1.00	1.10
55	1.00	0.75	0.60	0.71	1.00	0.60	1.00	1.10
60	0.99	0.74	0.60	0.77	1.00	0.60	1.00	1.10
65	0.96	0.72	0.58	0.82	1.00	0.60	0.95	1.10
70	0.91	0.68	0.55	0.88	1.00	0.60	0.90	1.05
75	0.85	0.64	0.51	0.90	1.00	0.60	0.85	1.00
80	0.75	0.56	0.45	0.90	1.00	0.60	0.80	0.95
85	0.60	0.45	0.36	0.80	1.00	0.60	0.75	0.90
90	0.46	0.35	0.28	0.70	1.00	0.60	0.70	0.85
95	0.28	0.21	0.17	0.60	1.00	0.60	0.55	0.80
100	0	0	0	0	0	0	0	0

Grupo A: Frijol, maíz, papas, remolacha, tomate. **Grupo B:** olivo, durazno, cirolero, nogal, frutales caducos. **Grupo C:** Hortalizas, vid, almendros. **Grupo D:** Espárragos, cereales. **Grupo E:** Pastos, trébol, cultivos de cobertura, plátano. **Grupo F:** Naranja, limón, toronja y otros cítricos. **Grupo G:** Caña de azúcar, alfalfa. **Grupo H:** Arroz.


Fuente: Olarte (1987) cita a Luque (1981)

ANEXO B

DATOS METEOROLÓGICOS REQUERIDOS PARA LA

EVAPOTRANSPIRACIÓN

Tabla B.1. Registro de velocidad de viento mensual

 <p style="text-align: center;">GOBIERNO REGIONAL DE AYACUCHO GERENCIA REGIONAL DE INFRAESTRUCTURA RED HIDROMETEOROLÓGICA REGISTRO DE VELOCIDAD DE VIENTO MENSUAL (m/s)</p>												
Estación	: INIA		Latitud	: 13° 10' 00.06" S		Dpto.	: Ayacucho					
Código	:005		Longitud	: 74° 12' 22.92" W		Prov.	: Huamanga					
			Altitud	:2756 m.s.n.m.		Dist.	: Huamanga					
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
2013	1.94	1.86	2.02	1.91	1.91	2.20	2.02	1.76	2.26	2.15	2.78	2.00
2014	1.89	1.52	1.00	1.47	1.70	1.58	1.57	1.78	2.13	2.28	2.42	2.15
2015	1.94	1.86	2.02	1.91	1.91	2.20	2.02	1.76	2.26	2.15	2.78	2.00
2016	2.11	1.81	1.83	1.76	1.53	1.62	1.44	1.61	1.51	1.83	2.31	2.15
2017	2.35	1.95	2.43	2.06	2.47	1.84	1.68	2.32	2.16	2.00	2.37	2.01
Media	2.35	2.05	1.87	2.31	1.70	1.73	1.41	1.93	2.37	2.55	2.22	2.19

Fuente: OPEMAN- Gobierno Regional de Ayacucho, 2019

Tabla B.2. Registro de humedad relativa mensual

 <p style="text-align: center;">GOBIERNO REGIONAL DE AYACUCHO GERENCIA REGIONAL DE INFRAESTRUCTURA RED HIDROMETEOROLÓGICA REGISTRO DE HUMEDAD RELATIVA MENSUAL (%)</p>												
Estación	: INIA		Latitud	: 13° 10' 00.06" S		Dpto.	: Ayacucho					
Código	:005		Longitud	: 74° 12' 22.92" W		Prov.	: Huamanga					
			Altitud	: 2756 m.s.n.m.		Dist.	: Huamanga					
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
2013	82.10	83.87	82.35	74.98	75.57	74.24	76.03	71.08	67.81	74.15	71.47	79.80
2014	81.67	82.32	84.37	78.00	75.16	72.46	73.63	70.48	79.26	72.37	69.93	81.65
2015	82.59	85.70	87.12	85.14	80.90	82.26	81.01	80.01	76.92	80.83	81.03	85.78
2016	81.50	89.72	88.49	85.15	80.58	84.10	82.55	81.65	78.03	79.65	77.05	81.81
2017	87.94	85.45	89.72	85.15	34.26	83.36	85.07	103.26	75.49	78.09	81.22	84.35
Media	83.16	85.41	86.41	81.69	69.30	79.28	79.66	81.29	75.50	77.02	76.14	82.68

Fuente: OPEMAN- Gobierno Regional de Ayacucho, 2019

Tabla B.1 Registro mensual de tanque de evaporación

 <p style="text-align: center;">GOBIERNO REGIONAL DE AYACUCHO GERENCIA REGIONAL DE INFRAESTRUCTURA RED HIDROMETEOROLÓGICA REGISTRO MENSUAL DE TANQUE DE EVAPORACIÓN (mm)</p>												
Estación	: INIA	Latitud	: 13° 10' 00.06" S	Dpto.	: Ayacucho							
Código	:005	Longitud	: 74° 12' 22.92" W	Prov.	: Huamanga							
		Altitud	: 2756 m.s.n.m.	Dist.	: Huamanga							
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
2013	137.88	113.42	118.02	125.56	124.62	106.60	135.36	138.94	151.02	145.10	160.16	159.24
2014	125.22	110.07	111.18	112.69	124.36	118.97	124.20	134.92	120.90	128.64	117.60	120.66
2015	102.62	98.56	110.82	126.28	124.00	120.10	137.06	121.76	121.34	127.01	111.94	98.72
2016	134.10	94.10	109.34	120.10	136.28	124.86	135.96	129.12	127.12	121.80	143.16	121.84
2017	96.34	94.12	119.78	113.36	132.48	128.42	131.86	138.28	133.42	131.00	141.02	138.46
Media	119.23	102.05	113.83	119.60	128.35	119.79	108.89	132.60	130.76	130.71	134.78	127.78

Fuente: OPEMAN- Gobierno Regional de Ayacucho, 2019

Tabla B.4. Registro de temperaturas medias mensuales

 <p style="text-align: center;">GOBIERNO REGIONAL DE AYACUCHO GERENCIA REGIONAL DE INFRAESTRUCTURA RED HIDROMETEORO LÓGICA REGISTRO DE TEMPERATURAS MEDIAS MENSUALES °C</p>												
Estación	: INIA	Latitud	: 13° 10' 00.06" S	Dpto.	: Ayacucho							
Código	:005	Longitud	: 74° 12' 22.92" W	Prov.	: Huamanga							
		Altitud	: 2756 m.s.n.m.	Dist.	: Huamanga							
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
2013	17.27	17.41	17.55	17.35	16.50	15.86	14.76	15.90	17.38	17.77	18.35	16.96
2014	17.36	17.90	17.13	17.06	16.99	16.46	15.84	16.42	16.87	17.66	18.88	18.23
2015	16.96	17.63	17.61	17.35	17.60	15.93	15.40	16.71	18.09	18.19	18.89	17.80
2016	19.11	18.12	17.65	18.31	17.16	15.96	15.49	17.16	18.07	18.23	18.84	18.35
2017	17.20	16.97	17.15	17.10	16.68	16.36	15.21	17.09	17.97	18.20	18.59	18.09
Media	17.58	17.60	17.42	17.44	16.98	16.11	15.34	16.66	17.68	18.01	18.71	17.89

Fuente: OPEMAN- Gobierno Regional de Ayacucho, 2019

Tabla B.5. Registro de temperaturas mínimas mensuales

 GOBIERNO REGIONAL DE AYACUCHO GERENCIA REGIONAL DE INFRAESTRUCTURA RED HIDROMETEOROLÓGICA REGISTRO DE TEMPERATURAS MÍNIMAS MENSUALES (°C)												
Estación	: INIA	Latitud	: 13° 10' 00.06" S	Dpto.	: Ayacucho							
Código	:005	Longitud	: 74° 12' 22.92" W	Prov.	: Huamanga							
		Altitud	: 2756 m.s.n.m.	Dist.	: Huamanga							
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
2013	10.32	11.82	11.24	9.19	8.89	8.43	6.98	7.52	9.13	10.75	10.57	10.39
2014	10.74	11.14	10.57	9.73	8.80	7.43	7.77	8.29	9.66	10.35	10.60	11.37
2015	10.30	10.16	10.90	9.73	9.33	6.75	5.66	7.82	10.01	10.32	11.08	11.03
2016	11.46	12.01	11.28	10.70	8.60	7.22	6.51	8.83	9.70	10.16	9.66	10.71
2017	11.14	10.48	11.53	10.11	9.47	8.23	6.52	8.34	10.79	9.98	11.01	10.63
Media	10.79	11.12	11.10	9.89	9.02	7.61	6.69	8.16	9.86	10.31	10.58	10.82


Fuente: OPEMAN- Gobierno Regional de Ayacucho, 2019

Tabla B.6. Registro de temperaturas máximas mensuales

 GOBIERNO REGIONAL DE AYACUCHO GERENCIA REGIONAL DE INFRAESTRUCTURA RED HIDROMETEOROLÓGICA REGISTRO DE TEMPERATURAS MÁXIMAS MENSUALES (°C)												
Estación	: INIA	Latitud	: 13° 10' 00.06" S	Dpto.	: Ayacucho							
Código	:005	Longitud	: 74° 12' 22.92" W	Prov.	: Huamanga							
		Altitud	: 2756 m.s.n.m.	Dist.	: Huamanga							
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
2013	24.21	22.99	23.86	25.51	24.11	23.29	22.54	24.28	25.64	24.79	26.13	23.54
2014	23.98	24.66	23.68	24.39	25.17	25.48	23.90	24.54	24.08	24.97	27.15	25.10
2015	23.63	25.09	24.33	24.97	25.86	25.11	25.13	25.61	26.17	26.06	26.71	24.57
2016	26.76	24.24	24.03	25.93	25.72	24.69	24.46	25.50	26.43	26.29	28.01	25.99
2017	23.26	23.46	22.76	24.09	23.88	24.49	23.90	25.85	25.16	26.42	26.33	25.54
Media	24.37	24.09	23.73	24.98	24.95	24.61	23.99	25.16	25.50	25.71	26.87	24.95

Fuente: OPEMAN- Gobierno Regional de Ayacucho, 2019

Tabla B.7. Registro de hora sol mensuales

 GOBIERNO REGIONAL DE AYACUCHO GERENCIA REGIONAL DE INFRAESTRUCTURA RED HIDROMETEOROLÓGICA REGISTRO DE HORA SOL MENSUALES												
Estación	: INIA		Latitud	: 13° 10' 00.06" S		Dpto.	: Ayacucho					
Código	:005		Longitud	: 74° 12' 22.92" W		Prov.	: Huamanga					
			Altitud	:2756 m.s.n.m.		Dist.	: Huamanga					
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
2013	8.35	4.67	5.93	6.53	8.28	8.55	9.26	8.61	7.95	7.60	8.39	4.57
2014	8.35	4.67	5.93	6.53	8.28	8.55	9.26	8.61	7.95	7.60	8.39	4.57
2015	6.20	4.94	5.94	7.94	7.37	7.78	7.63	7.97	8.03	6.07	6.80	3.12
2016	5.54	5.18	4.82	5.53	7.72	7.31	6.11	7.42	7.12	6.53	7.22	5.53
2017	5.78	6.21	6.26	6.69	6.49	7.64	7.95	6.87	6.63	7.01	6.19	4.99
Media	6.62	4.53	5.58	6.92	8.25	8.85	9.27	8.33	7.65	7.37	6.57	6.54

Fuente: OPEMAN- Gobierno Regional de Ayacucho, 2019

Tabla B.8. Registro de precipitaciones mensuales

 GOBIERNO REGIONAL DE AYACUCHO GERENCIA REGIONAL DE INFRAESTRUCTURA RED HIDROMETEOROLÓGICA REGISTRO DE PRECIPITACIONES MENSUALES (mm)												
Estación	: INIA		Latitud	: 13° 10' 00.06" S		Dpto.	: Ayacucho					
Código	:005		Longitud	: 74° 12' 22.92" W		Prov.	: Huamanga					
			Altitud	:2756 m.s.n.m.		Dist.	: Huamanga					
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
2013	99.40	108.80	70.60	13.90	19.30	2.80	8.40	34.50	14.90	51.70	60.10	127.70
2014	117.20	71.00	118.90	31.40	15.20	0.00	4.20	3.10	53.50	22.60	36.70	54.90
2015	178.20	116.60	62.80	11.70	5.60	0.00	6.60	18.60	8.60	32.60	31.80	105.40
2016	33.10	152.90	33.30	30.70	9.80	0.00	7.90	5.30	8.40	34.70	26.60	51.40
2017	109.40	125.50	103.70	44.20	15.80	0.00	11.80	9.80	12.60	34.30	19.80	77.40
Media	107.46	114.96	77.86	26.38	13.14	0.56	7.78	14.26	19.60	35.18	35.00	83.36

Fuente: OPEMAN- Gobierno Regional de Ayacucho, 2019

ANEXO C

HOJAS DE CÁLCULO PARA LOS ÍNDICES

ESTADÍSTICOS DE VALIDACIÓN

Tabla C.1. Hoja de cálculo para el Número de Nash Sutcliffe

X(Oi)	Y(Pi)	(x-y)²	(x-x_{prom})²	X(Oi)	Y(Pi)	(x-y)²	(x-x_{prom})²	X(Oi)	Y(Pi)	(x-y)²	(x-x_{prom})²	X(Oi)	Y(Pi)	(x-y)²	(x-x_{prom})²
Tanque evaporímetro o Clase A	Método satelital			FAO Penman-Monteith	Método satelital			Hargreaves en base a datos de radiación solar	Método satelital			Hargreaves en base a la temperatura	Método satelital		
mm/mes	mm/mes			mm/mes	mm/mes			mm/mes	mm/mes			mm/mes	mm/mes		
96.76	115.57	353.83	30.19	121.04	115.57	29.91	80.72	121.15	115.57	31.08	59.76	121.24	115.57	32.06	215.68
85.80	104.80	360.95	270.73	101.79	104.80	9.07	105.43	114.16	104.80	87.56	0.55	97.87	104.80	48.04	75.32
93.27	112.14	356.35	80.84	105.33	112.14	46.37	45.23	108.15	112.14	15.95	27.75	95.42	112.14	279.66	123.86
99.19	103.16	15.76	9.39	105.97	103.16	7.88	37.05	110.84	103.16	58.89	6.66	93.26	103.16	98.09	176.63
107.86	92.45	237.21	31.33	109.28	92.45	283.11	7.73	104.29	92.45	140.05	83.38	95.38	92.45	8.54	124.86
100.76	77.30	550.33	2.26	93.29	77.30	255.66	352.47	98.14	77.30	434.65	233.32	75.65	77.30	2.72	955.09
111.60	90.70	436.77	87.28	96.01	90.70	28.19	257.55	99.61	90.70	79.42	190.60	78.60	90.70	146.46	781.24
111.50	109.02	6.11	85.32	109.62	109.02	0.36	5.94	109.56	109.02	0.29	14.90	101.71	109.02	53.51	23.44
105.64	122.17	273.32	11.44	120.86	122.17	1.72	77.49	123.60	122.17	2.05	103.73	118.83	122.17	11.18	150.78
105.85	139.00	1098.61	12.93	128.41	139.00	112.18	267.27	124.78	139.00	202.33	128.96	133.12	139.00	34.57	705.92
106.64	134.41	771.15	19.24	135.53	134.41	1.25	550.98	132.71	134.41	2.90	372.19	142.40	134.41	63.75	1285.07
102.23	119.78	307.94	0.00	117.57	119.78	4.86	30.37	114.03	119.78	32.95	0.38	125.14	119.78	28.75	345.44
Σ = 1227.11	1320.53	4768.33	640.95	1344.72	1320.53	780.56	1818.21	1361.03	1320.53	1088.12	1222.17	1278.61	1320.53	807.33	4963.33
\bar{x}=102.26	110.04			112.06	110.04			113.42	110.04			106.55	110.04		
NSE =	-6.440			NSE =	0.571			NSE =	0.110			NSE =	0.837		

Fuente: Elaboración propia

Tabla C.2. Hoja de cálculo para la Raíz del Error Cuadrático Medio

X(Oi)	Y(Pi)	(x-y) ²	X(Oi)	Y(Pi)	(x-y) ²	X(Oi)	Y(Pi)	(x-y) ²	X(Oi)	Y(Pi)	(x-y) ²
Tanque evaporímetro Clase A			FAO Penman-Monteith			Hargreaves en base a datos de radiación solar			Hargreaves en base a la temperatura		
Método satelital			Método satelital			Método satelital			Método satelital		
mm/mes	mm/mes		mm/mes	mm/mes		mm/mes	mm/mes		mm/mes	mm/mes	
3.12	3.73	0.37	3.90	3.73	0.03	3.91	3.73	0.03	3.91	3.73	0.03
3.06	3.74	0.46	3.64	3.74	0.01	4.08	3.74	0.11	3.50	3.74	0.06
3.01	3.62	0.37	3.40	3.62	0.05	3.49	3.62	0.02	3.08	3.62	0.29
3.31	3.44	0.02	3.53	3.44	0.01	3.69	3.44	0.07	3.11	3.44	0.11
3.48	2.98	0.25	3.53	2.98	0.29	3.36	2.98	0.15	3.08	2.98	0.01
3.36	2.58	0.61	3.11	2.58	0.28	3.27	2.58	0.48	2.52	2.58	0.00
3.60	2.93	0.45	3.10	2.93	0.03	3.21	2.93	0.08	2.54	2.93	0.15
3.60	3.52	0.01	3.54	3.52	0.00	3.53	3.52	0.00	3.28	3.52	0.06
3.52	4.07	0.30	4.03	4.07	0.00	4.12	4.07	0.00	3.96	4.07	0.01
3.41	4.48	1.14	4.14	4.48	0.12	4.03	4.48	0.21	4.29	4.48	0.04
3.55	4.48	0.86	4.52	4.48	0.00	4.42	4.48	0.00	4.75	4.48	0.07
3.30	3.86	0.32	3.79	3.86	0.01	3.68	3.86	0.03	4.04	3.86	0.03
Σ = 40.32	43.43	5.16	44.22	43.43	0.83	44.80	43.43	1.19	42.05	43.43	0.86
RMSE =	0.66		RMSE =	0.26		RMSE =	0.31		RMSE =	0.27	

Fuente: elaboración propia

Tabla C.3. Hoja de cálculo para el Error Porcentual Absoluto Medio

X(Oi)	Y(Pi)	$((X-Y)/N) \times 100$
Tanque evaporímetro Clase A	Método satelital	
mm/mes	mm/mes	
96.76	115.57	0.19
85.80	104.80	0.22
93.27	112.14	0.20
99.19	103.16	0.04
107.86	92.45	0.14
100.76	77.30	0.23
111.60	90.70	0.19
111.50	109.02	0.02
105.64	122.17	0.16
105.85	139.00	0.31
106.64	134.41	0.26
102.23	119.78	0.17
$\Sigma = 1227.11$	1320.53	2.14
MAPE =	17.87	

X(Oi)	Y(Pi)	$((X-Y)/N) \times 100$
FAO Penman-Monteith	Método satelital	
mm/mes	mm/mes	
121.04	115.57	0.05
101.79	104.80	0.03
105.33	112.14	0.06
105.97	103.16	0.03
109.28	92.45	0.15
93.29	77.30	0.17
96.01	90.70	0.06
109.62	109.02	0.01
120.86	122.17	0.01
128.41	139.00	0.08
135.53	134.41	0.01
117.57	119.78	0.02
1344.72	1320.53	0.67
MAPE =	5.60	

X(Oi)	Y(Pi)	$((X-Y)/N) \times 100$
Hargreaves en base a datos de radiación solar	Método satelital	
mm/mes	mm/mes	
121.15	115.57	0.05
114.16	104.80	0.08
108.15	112.14	0.04
110.84	103.16	0.07
104.29	92.45	0.11
98.14	77.30	0.21
99.61	90.70	0.09
109.56	109.02	0.00
123.60	122.17	0.01
124.78	139.00	0.11
132.71	134.41	0.01
114.03	119.78	0.05
1361.03	1320.53	0.84
MAPE =	7.03	

X(Oi)	Y(Pi)	$((X-Y)/N) \times 100$
Hargreaves en base a la temperatura	Método satelital	
mm/mes	mm/mes	
121.24	115.57	0.05
97.87	104.80	0.07
95.42	112.14	0.18
93.26	103.16	0.11
95.38	92.45	0.03
75.65	77.30	0.02
78.60	90.70	0.15
101.71	109.02	0.07
118.83	122.17	0.03
133.12	139.00	0.04
142.40	134.41	0.06
125.14	119.78	0.04
1278.61	1320.53	0.85
MAPE =	7.07	

Fuente: elaboración propia

Tabla C.4. Hoja de cálculo para el Índice de concordancia

X(Oi)	Y(Pi)	(X-Y) ²	(Pi-Oi + Oi-Oi) ²	X(Oi)	Y(Pi)	(X-Y) ²	(Pi-Oi + Oi-Oi) ²	X(Oi)	Y(Pi)	(X-Y) ²	(Pi-Oi + Oi-Oi) ²	X(Oi)	Y(Pi)	(X-Y) ²	(Pi-Oi + Oi-Oi) ²
Tanque evaporímetro Clase A	Método satelital			FAO Penman-Monteith	Método satelital			Hargreaves en base a datos de radiación solar	Método satelital			Hargreaves en base a la temperatura	Método satelital		
mm/mes	mm/mes			mm/mes	mm/mes			mm/mes	mm/mes			mm/mes	mm/mes		
96.76	115.57	353.83	353.83	121.04	115.57	29.91	156.23	121.15	115.57	31.08	97.73	121.24	115.57	32.06	562.17
85.80	104.80	360.95	360.95	101.79	104.80	9.07	307.10	114.16	104.80	87.56	87.56	97.87	104.80	48.04	108.70
93.27	112.14	356.35	356.35	105.33	112.14	46.37	46.37	108.15	112.14	15.95	42.81	95.42	112.14	279.66	279.66
99.19	103.16	15.76	15.76	105.97	103.16	7.88	224.47	110.84	103.16	58.89	164.74	93.26	103.16	98.09	278.09
107.86	92.45	237.21	237.21	109.28	92.45	283.11	501.12	104.29	92.45	140.05	905.80	95.38	92.45	8.54	638.62
100.76	77.30	550.33	700.45	93.29	77.30	255.66	2866.28	98.14	77.30	434.65	2641.76	75.65	77.30	2.72	3619.10
111.60	90.70	436.77	436.77	96.01	90.70	28.19	1399.21	99.61	90.70	79.42	1333.93	78.60	90.70	146.46	1918.37
111.50	109.02	6.11	256.07	109.62	109.02	0.36	29.94	109.56	109.02	0.29	68.15	101.71	109.02	53.51	53.51
105.64	122.17	273.32	542.73	120.86	122.17	1.72	357.82	123.60	122.17	2.05	358.67	118.83	122.17	11.18	778.52
105.85	139.00	1098.61	1627.02	128.41	139.00	112.18	1873.86	124.78	139.00	202.33	1364.28	133.12	139.00	34.57	3483.14
106.64	134.41	771.15	1335.27	135.53	134.41	1.25	2100.14	132.71	134.41	2.90	1623.04	142.40	134.41	63.75	4059.16
102.23	119.78	307.94	307.94	117.57	119.78	4.86	174.94	114.03	119.78	32.95	48.59	125.14	119.78	28.75	1011.90
Σ = 1227.11	1320.53	4768.33	6530.34	1344.72	1320.53	780.56	10037.50	1361.03	1320.53	1088.12	8737.08	1278.61	1320.53	807.33	16790.94
Media=102.26	110.04			112.06	110.04			113.42	110.04			106.55	110.04		
d =	0.27			d =	0.92			d =	0.88			d =	0.95		

Fuente: elaboración propia

Tabla C.5. Hoja de cálculo para el Coeficiente de correlación, Coeficiente de determinación e Índice de confianza

X(Oi)	Y(Pi)	(Oi-O) ²	(Pi-P) ²	(Oi-O)(Pi-P)	X(Oi)	Y(Pi)	(Oi-O) ²	(Pi-P) ²	(Oi-O)(Pi-P)	X(Oi)	Y(Pi)	(Oi-O) ²	(Pi-P) ²	(Oi-O)(Pi-P)	X(Oi)	Y(Pi)	(Oi-O) ²	(Pi-P) ²	(Oi-O)(Pi-P)
Tanque evaporimetro Clase A	Método satelital				FAO Penman-Monteith	Método satelital				Hargreaves en base a datos de radiación solar	Método satelital				Hargreaves en base a la temperatura	Método satelital			
mm/mes	mm/mes				mm/mes	mm/mes				mm/mes	mm/mes				mm/mes	mm/mes			
96.76	115.57	30.19	30.59	-30.39	121.04	115.57	80.72	30.59	49.69	121.15	115.57	59.76	30.59	42.76	121.24	115.57	215.68	30.59	81.23
85.80	104.80	270.73	27.46	86.23	101.79	104.80	105.43	27.46	53.81	114.16	104.80	0.55	27.46	-3.89	97.87	104.80	75.32	27.46	45.48
93.27	112.14	80.84	4.41	-18.89	105.33	112.14	45.23	4.41	-14.13	108.15	112.14	27.75	4.41	-11.07	95.42	112.14	123.86	4.41	-23.38
99.19	103.16	9.39	47.32	21.08	105.97	103.16	37.05	47.32	41.87	110.84	103.16	6.66	47.32	17.75	93.26	103.16	176.63	47.32	91.42
107.86	92.45	31.33	309.40	-98.45	109.28	92.45	7.73	309.40	48.90	104.29	92.45	83.38	309.40	160.62	95.38	92.45	124.86	309.40	196.55
100.76	77.30	2.26	1072.41	49.23	93.29	77.30	352.47	1072.41	614.81	98.14	77.30	233.32	1072.41	500.22	75.65	77.30	955.09	1072.41	1012.05
111.60	90.70	87.28	374.10	-180.70	96.01	90.70	257.55	374.10	310.40	99.61	90.70	190.60	374.10	267.03	78.60	90.70	781.24	374.10	540.61
111.50	109.02	85.32	1.04	-9.42	109.62	109.02	5.94	1.04	2.48	109.56	109.02	14.90	1.04	3.94	101.71	109.02	23.44	1.04	4.94
105.64	122.17	11.44	147.12	41.02	120.86	122.17	77.49	147.12	106.77	123.60	122.17	103.73	147.12	123.54	118.83	122.17	150.78	147.12	148.94
105.85	139.00	12.93	838.44	104.11	128.41	139.00	267.27	838.44	473.38	124.78	139.00	128.96	838.44	328.82	133.12	139.00	705.92	838.44	769.33
106.64	134.41	19.24	593.92	106.89	135.53	134.41	550.98	593.92	572.04	132.71	134.41	372.19	593.92	470.16	142.40	134.41	1285.07	593.92	873.63
102.23	119.78	0.00	94.70	-0.31	117.57	119.78	30.37	94.70	53.63	114.03	119.78	0.38	94.70	5.99	125.14	119.78	345.44	94.70	180.87
Σ = 1227.11	1320.53	640.95	3540.91	70.41	1344.72	1320.53	1818.21	3540.91	2313.66	1361.03	1320.53	1222.17	3540.91	1905.85	1278.61	1320.53	4963.33	3540.91	3921.67
Media=102.26	110.04				112.06	110.04				113.42	110.04				106.55	110.04			
r =	0.05				r =	0.91				r =	0.92				r =	0.94			
R² =	0.00				R² =	0.83				R² =	0.84				R² =	0.88			
C =	0.01				C =	0.84				C =	0.80				C =	0.89			

Fuente: elaboración propia

ANEXO D

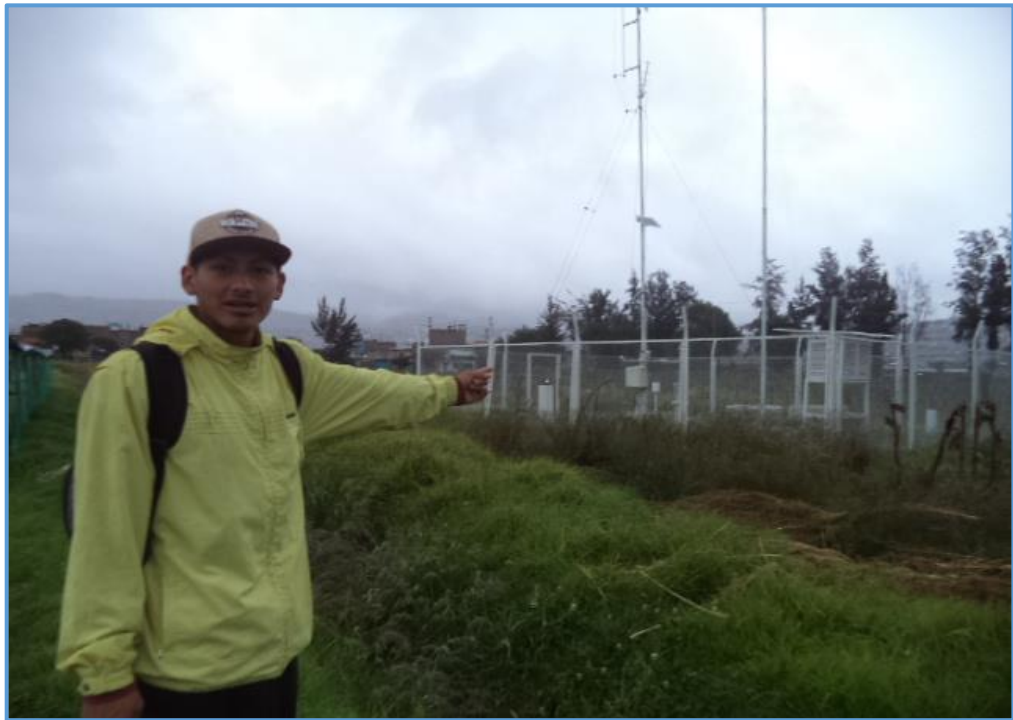
MATRIZ DE CONSISTENCIA

Tabla D.1. Matriz de consistencia

“Estimación satelital, validación y distribución espacial de la evapotranspiración a través del clima en la Cuenca Cachi - Ayacucho - 2020”					
PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES E INDICADORES		METODOLOGÍAS
P. GENERAL	O. GENERAL	H. GENERAL	INDEPENDIENTES		
1. ¿Es un problema la falta de estimación de la evapotranspiración satelital y la elección de un método indirecto con su respectivo ajuste y validación en el ámbito de la cuenca Cachi?	1. Estimar la evapotranspiración satelital y su distribución espacial y la identificación y selección del método indirecto y el ajuste y validación correspondiente en la cuenca Cachi.	1. Los métodos satelitales son una alternativa de solución a la escasez de datos meteorológicos que están directamente y significativamente relacionados para la estimación de la evapotranspiración en la cuenca Cachi.	Variable -Clima. Subvariables -Temperatura. -Radiación solar. -Humedad relativa. -Velocidad del viento.	Indicador -Clima. Indicador (°C) (w/m) (%) (m/s)	1.Tipo de investigación: - Aplicada 2.Nivel de investigación: - Descriptiva - correlacional 3.Enfoque de investigación: - Cuantitativo.
P. ESPECÍFICOS	O. ESPECÍFICOS	H. ESPECÍFICOS	DEPENDIENTE		
1. ¿En la cuenca Cachi actualmente no se tiene una ecuación empírica adecuada para la estimación satelital y la distribución espacial de la evapotranspiración a través de mapas temáticos?	1. Evaluar las ecuaciones empíricas y elegir una de ellas para la estimación satelital y distribución espacial de la evapotranspiración a través de mapas temáticos.	1. Existe una relación significativa entre las ecuaciones empíricas con la estimación satelital y distribución espacial de la evapotranspiración.	Evapotranspiración	mm/mes	Se debe evaluar una ecuación empírica y obtener datos satelitales para luego estimar la evapotranspiración con su distribución espacial mediante el software ArcGIS.
2. ¿En la cuenca Cachi no se ha realizado un estudio de la identificación de los mejores métodos indirectos para estimar la evapotranspiración?	2. Identificar y seleccionar los métodos indirectos para estimar la evapotranspiración en la cuenca Cachi.	2. Los métodos indirectos pueden ser evaluados para identificar y seleccionar los que se adecuan más a la zona de estudio.	Evapotranspiración	mm/mes	Se debe identificar y seleccionar los métodos indirectos para estimar la evapotranspiración mediante el software PETP en la cuenca Cachi.
3. ¿Es necesario que en la investigación se garanticen los resultados obtenidos de evapotranspiración de las estimaciones satelitales con el ajuste y validación del modelo?	3. Ajustar y validar los resultados obtenidos mediante los índices estadísticos.	3. Mediante el ajuste y la validación se obtiene resultados más confiables.	Validación	Índices	Mediante los índices estadísticos se debe ajustar y validar los resultados obtenidos.

ANEXO E

PANEL FOTOGRÁFICO



Fotografía 1. Vista panorámica de la estación meteorológica del INIA

Fuente: elaboración propia



Fotografía 2. Cartel de bienvenida a la estación meteorológica del INIA

Fuente: elaboración propia



Fotografía 3. Termómetro y psicrómetro de la estación meteorológica del INIA

Fuente: elaboración propia



Fotografía 4. Tanque evaporímetro Clase A de la estación meteorológica del INIA

Fuente: elaboración propia



Fotografía 5. Tanque evaporímetro Clase A automático de la estación meteorológica del INIA

Fuente: elaboración propia



Fotografía 6. Heliógrafo de la estación meteorológica del INIA

Fuente: elaboración propia



Fotografía 7. Bandas para el heliógrafo de la estación meteorológica del INIA

Fuente: elaboración propia



Fotografía 8. Pluviógrafo de la estación meteorológica del INIA

Fuente: elaboración propia



Fotografía 9. Vista panorámica de la distancia a barlovento en una superficie verde de poca altura de la estación meteorológica del INIA
Fuente: elaboración propia



Fotografía 10. Medición de la distancia a barlovento en una superficie verde de poca altura de la estación meteorológica del INIA
Fuente: elaboración propia



Fotografía 11. Placa del Gobierno Regional de Ayacucho en la estación meteorológica del INIA

Fuente: elaboración propia

ANEXO F

TRÁMITES DOCUMENTARIOS



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTOBAL DE HUAMANGA
 FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
 ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA AGRÍCOLA



"AÑO DE LUCHA CONTRA LA CORRUPCIÓN E IMPUNIDAD"

Ayacucho, 29 de enero de 2019

OFICIO N° 045-2018-UNSCH-FCA/EFPIA.

Señor:

Director de la Oficina de Operaciones y Mantenimiento (OPEMAN) del Sistema Hidráulico Cachi

Ciudad

Asunto: Solicito datos informativos

De mi especial consideración:

Tengo el agrado de dirigirme a Ud., para saludarlo a nombre de la Escuela Profesional de Ingeniería Agrícola de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, así mismo para solicitarle tenga bien facilitar los datos meteorológicos históricos mensuales de las estaciones pertenecientes a la Cuenca Cachi de precipitación, temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, radiación solar, evaporación del tanque evaporímetro, y demás datos existentes esta información se requiere con el objetivo de realizar el proyecto de Tesis denominado "Estimación satelital, validación de la evapotranspiración a través del clima en la cuenca Cachi - Huamanga - Ayacucho - 2020", planteado por et alumno Hans Alexis RONDINEL ANCHAY.

Por lo que solicito le brinde las facilidades que el caso requiera para el cumplimiento de sus objetivos.

Sin otro particular, seguro de contar con su aceptación, me suscribo de usted.

Atentamente,



[Firma manuscrita]
Dr. JORGE E. PALTOR VATANABE
 DIRECTOR



c.c.
 Archivo

cel: 990500316

RONDINEL ANCHAY, Hans Alexis

SOLICITO: Datos meteorológicos históricos mensuales de las estaciones pertenecientes a la cuenca Cachi de manera digital y autorización para visitar dichas estaciones.

ING. WILHELM G. ORÉ CHIPANA
GERENTE REGIONAL DE INFRAESTRUCTURA
S.G.

Yo, Hans A. RONDINEL ANCHAY, identificado con DNI N° 74042418, domiciliado en el Jr. José Santos Chocano N° 809 del Distrito Jesús de Nazareno, Teléfono N° 990500316, estudiante de la Escuela Profesional de Ingeniería Agrícola de la facultad de Ciencias Agrarias, de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga; ante usted con el debido respeto me presento y expongo:

Que teniendo la necesidad de realizar mi Tesis para completar mi formación académica y contribuir con el desarrollo de la ciudad, para lo cual requiero de manera digital los datos meteorológicos históricos mensuales de las estaciones pertenecientes a la cuenca Cachi y una breve visita a dichas estaciones, tenga en consideración el oficio N° 045-2018UNSCH-FCA/EFPIA presentado anteriormente y que se adjunta.

Por lo expuesto:

Ruego a Usted, Señor Gerente, tenga a bien acceder a mi solicitud por ser de justicia.

Ayacucho, 24 de julio de 2019.



ORÉMAN

Hans A. RONDINEL ANCHAY
DNI: 74042418

Adjunto:

Resolución Decanal del proyecto de Tesis
Fotocopia de DNI
Oficio N° 045-2018-UNSCH-FCA/EFPIA



AÑO DE LA LUCHA CONTRA LA CORRUPCIÓN Y LA IMPUNIDAD"

**CONSTANCIA DE ENTREGA DE LOS REGISTROS DE DATOS
METEOROLÓGICOS DE ESTACIÓN TAMBILLO, INIA CANAN**

Mediante la presente, declaro haber recibido a entera satisfacción los siguientes datos de los registros de datos meteorológicos de las estaciones Tambillo Y Canaán de los años de 2013 2018:

Firmo la presente en señal de conformidad de recepción.

Ayacucho 20 de agosto del 2019

.....
HANS A. RONDINEL ANCHAY

DNI: 74042418



SOLICITO: Datos meteorológicos históricos mensuales de las estaciones pertenecientes a la cuenca Cachi de manera digital y automatización para visitar dichas estaciones.

ING. WILHELM G. ORÉ CHIPANA
GERENTE REGIONAL DE INFRAESTRUCTURA
S.G.

Yo, Hans A. RONDINEL ANCHAY, identificado con DNI NO 74042418, domiciliado en el Jr. José Santos Chocano N° S09 del Distrito Jesús de Nazareno. Teléfono N° 990500316, estudiante de la Escuela Profesional de Ingeniería Agrícola de la facultad de Ciencias Agrarias, de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga; ante usted con el debido respeto me presento y expongo:

Que teniendo la necesidad de realizar mi Tesis para completar mi formación académica y contribuir con el desarrollo de la ciudad, para lo cual requiero de manera digital los datos meteorológicos históricos mensuales de las estaciones pertenecientes a la cuenca Cachi y una breve visita a dichas estaciones, tenga en consideración el oficio N° 045-2018-IJNSCJ 1-FCA/EFPIA presentado anteriormente y que se adjunta.

Por lo expuesto:

Ruego a Usted, Señor Gerente, tenga bien acceder a mi solicitud por ser de justicia.

Ayacucho, 20 de enero de 2020

Hans A. RONDINEL ANCHAY
DNI: 74042418

Adjunto:

Resolución decanal del proyecto de Tesis

Fotocopia de DNI

Oficio N° 045-2018-UNSCJ-FCA/EFPIA

Estimación satelital, validación y distribución espacial de la evapotranspiración a través del clima en la cuenca Cachi - Ayacucho - 2020

por Hans Alexis Rondinel Anchay

Fecha de entrega: 19-dic-2024 12:21p.m. (UTC-0500)

Identificador de la entrega: 2533996666

Nombre del archivo: TESIS_HANS_ALEXIS Rondinel Anchay_turniting.pdf (11.07M)

Total de palabras: 52385

Total de caracteres: 255567

INFORME DE ORIGINALIDAD

28%

INDICE DE SIMILITUD

29%

FUENTES DE INTERNET

9%

PUBLICACIONES

9%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	repositorio.unsch.edu.pe Fuente de Internet	7%
2	www.scribd.com Fuente de Internet	2%
3	repositorio.unap.edu.pe Fuente de Internet	2%
4	repositorio.umsa.bo Fuente de Internet	1%
5	Submitted to Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga Trabajo del estudiante	1%
6	repositorio.lamolina.edu.pe Fuente de Internet	1%
7	hdl.handle.net Fuente de Internet	1%
8	bdigital.unal.edu.co Fuente de Internet	1%
9	qdoc.tips Fuente de Internet	

		1 %
10	idoc.pub Fuente de Internet	1 %
11	repositorio.unal.edu.co Fuente de Internet	1 %
12	docplayer.es Fuente de Internet	1 %
13	www.scielo.org.pe Fuente de Internet	1 %
14	library.wmo.int Fuente de Internet	1 %
15	nanopdf.com Fuente de Internet	1 %
16	bibliotecavirtual.unl.edu.ar:8443 Fuente de Internet	1 %
17	fdocuments.es Fuente de Internet	<1 %
18	vsip.info Fuente de Internet	<1 %
19	Lenín Henríquez Dole, Anahí J Miner Vega. "Revisión y validación de la evapotranspiración potencial (ETP) media anual y media mensual en Honduras obtenida	<1 %

por métodos ambientales de percepción remota", Revista Ciencia y Tecnología, 2015

Publicación

20 oldri.ues.edu.sv <1 %
Fuente de Internet

21 repositorio.ana.gob.pe <1 %
Fuente de Internet

22 repositoriotec.tec.ac.cr <1 %
Fuente de Internet

23 saber.ucv.ve <1 %
Fuente de Internet

24 repository.udistrital.edu.co <1 %
Fuente de Internet

25 dspace.esPOCH.edu.ec <1 %
Fuente de Internet

26 Emil C. Vega, Jorge C. Jara. "Estimación de la evapotranspiración de referencia para dos zonas (Costa Y Región Andina) del Ecuador", *Engenharia Agrícola*, 2009
Publicación

27 Submitted to Universitat Politècnica de València <1 %
Trabajo del estudiante

28 Submitted to Universidad Andina del Cusco <1 %
Trabajo del estudiante

29	repositorio.uchile.cl Fuente de Internet	<1 %
30	ria.utn.edu.ar Fuente de Internet	<1 %
31	www.cazalac.org Fuente de Internet	<1 %
32	biblioteca.usac.edu.gt Fuente de Internet	<1 %
33	colposdigital.colpos.mx:8080 Fuente de Internet	<1 %
34	repositorio.uap.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
35	www.researchgate.net Fuente de Internet	<1 %
36	repositorio.uss.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
37	up-rid.up.ac.pa Fuente de Internet	<1 %
38	pt.scribd.com Fuente de Internet	<1 %
39	sedici.unlp.edu.ar Fuente de Internet	<1 %
40	www.conferencias.unc.edu.ar Fuente de Internet	<1 %

41	es.slideshare.net Fuente de Internet	<1 %
42	1library.co Fuente de Internet	<1 %
43	repositorio.upn.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
44	dspace.ucuenca.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
45	www.mappinginteractivo.com Fuente de Internet	<1 %
46	Submitted to BENEMERITA UNIVERSIDAD AUTONOMA DE PUEBLA BIBLIOTECA Trabajo del estudiante	<1 %
47	Submitted to Universidad Nacional Agraria La Molina Trabajo del estudiante	<1 %
48	www.worldclim.org Fuente de Internet	<1 %
49	CABREL POZO CARLOS ANTONIO. "informe de Gestión Ambiental del Proyecto Instalación del Sistema de Riego Presurizado Vizcachayocc-IGA0014668", R.D.G. N° 439- 2015-MINAGRI-DVDIAR-DGAAA, 2021 Publicación	<1 %

50 Submitted to Universidad Andina Nestor
Caceres Velasquez <1 %
Trabajo del estudiante

51 bibliotecadigital.univalle.edu.co <1 %
Fuente de Internet

52 repositorio.utn.edu.ec <1 %
Fuente de Internet

53 GRUPO G Y A SOLUCIONES <1 %
GEOAMBIENTALES SOCIEDAD ANONIMA
CERRADA - GRUPO G Y A SAC. "EIA-D del
Proyecto Construcción de Sistema de
Irrigación Chota-IGA0016359", R.D.G. N° 010-
13-AG-DVM-DGAAA, 2022
Publicación

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias < 40 words

Excluir bibliografía

Activo