



UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA.

La Universidad Católica del Ecuador.

ÁREA TÉCNICA.

TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

**Evaluación de productos de imágenes de satélite para el cálculo de la
evapotranspiración.**

TRABAJO DE TITULACIÓN.

AUTOR: Núñez Encalada, Deiber Alexey.

DIRECTOR: Oñate Valdivieso, Fernando Rodrigo, PhD.

LOJA-ECUADOR

2018



Esta versión digital, ha sido acreditada bajo la licencia Creative Commons 4.0, CC BY-NY-SA: Reconocimiento-No comercial-Compartir igual; la cual permite copiar, distribuir y comunicar públicamente la obra, mientras se reconozca la autoría original, no se utilice con fines comerciales y se permiten obras derivadas, siempre que mantenga la misma licencia al ser divulgada. <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>

2018

APROBACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

PhD.

Rodrigo Fernando Oñate Valdivieso.

DOCENTE DE LA TITULACIÓN.

De mi consideración.

El presente trabajo de titulación: **Evaluación de productos de imágenes de satélite para el cálculo de la evapotranspiración**. Realizado por **Deiber Alexey Núñez Encalada**, ha sido orientado y revisado durante su ejecución, por cuanto se aprueba la presentación del mismo.

Loja, septiembre del 2018.

(f).....

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

“Yo *Núñez Encalada Deiber Alexey* declaro ser autor del presente trabajo de titulación: *Evaluación de productos de imágenes de satélite para el cálculo de la evapotranspiración*, de la Titulación *Ingeniería Civil*, siendo *Fernando Rodrigo Oñate Valdivieso* director del presente trabajo, y eximo expresamente a la Universidad Técnica Particular de Loja y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales. Además certifico que las ideas y resultados vertidos en el presente trabajo de investigativo, son de mi exclusiva responsabilidad.

Adicionalmente declaro conocer y aceptar la disposición del Art. 88 del Estatuto Orgánico de la Universidad Técnica Particular de Loja que en su parte pertinente textualmente dice: “Forman parte del patrimonio de la Universidad la propiedad intelectual de las investigaciones, trabajos científicos o técnicos y tesis de grado o trabajos de titulación que se realicen con el apoyo financiero, académico o institucional (operativo) de la Universidad.

f).....

Autor: Deiber Alexey Núñez Encalada.

Cédula: 1950009090.

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a mi familia, a mis padres: Lucía Encalada y Leandro Núñez, a mis hermanos: Emanuel, Marjhuri, Silvana, Leandro y Brayan por su esfuerzo y apoyo incondicional y por ser motivación e inspiración para poder culminar esta meta.

Albert Einstein dijo que la fuerza motriz más poderosa es la voluntad, es por eso que, dedico este trabajo a todas esas grandes personas que se esfuerzan día a día por lograr sus objetivos, esas personas que a pesar de no contar con recurso suficientes tienen la voluntad y la osadía de ir por el camino tortuoso hacia sus metas.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios y a la vida por ponerme en este preciso instante al permitirme lograr una más de mis metas, por poder conocer a gente maravillosa y por la grandiosa familia que me han dado.

A mis padres Lucia y Leandro por su constante sacrificio y entrega a sus hijos, porque siempre me enseñaron con el ejemplo de buenos padres y personas y por su disponibilidad a ayudar ante cualquier adversidad.

A mis hermanos, con quienes he vivido grandes momentos, gracias por demostrar el cariño, la unión y el apoyo mutuo, por ser mis confidentes y por el apoyo moral y económico que siempre estuvo presente, los amo hermanos.

Al Dr. Fernando Oñate Valdivieso que con su conocimiento ha sabido orientarme a lo largo de este proyecto.

A los Ingenieros Víctor González y Franz Pucha por la guía e instrucción en cuanto a *software* SIG.

A mis compañeros de la Titulación de Ingeniería Civil por ser parte de esta aventura universitaria, en especial a grandes amigos: Stefanie, Daniela, Mishell, Edison y Luis, les agradezco por estar siempre presentes en cada desvelada, en momentos de tristeza y de júbilo, espero sigamos siendo un grupo unido.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

APROBACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN.....	ii
DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS.....	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	v
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	vi
ÍNDICE DE TABLAS.....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
RESUMEN.....	1
ABSTRACT	2
INTRODUCCIÓN.....	3
CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO.....	5
1.1. Antecedentes.....	6
1.2. Evapotranspiración.....	7
1.2.1. Evapotranspiración del cultivo de referencia <i>ET_o</i>	7
1.2.2. Método FAO Penman-Monteith.....	7
1.2.3. Factores de determinan la Evapotranspiración.....	7
1.2.3.1. Radiación Solar.....	7
1.2.3.1.1. Radiación neta (R _n).....	8
1.2.3.1.2. Albedo.....	8
1.2.3.1.3. Emisividad.....	8
1.2.3.2. Temperatura.....	8
1.2.3.3. Humedad relativa del aire.....	8
1.2.3.4. Velocidad de viento.....	9
1.3. Teledetección.....	9
1.3.1. Imágenes Satelitales.....	9
1.3.1.1. Resolución Espacial.....	9
1.3.1.2. Resolución Espectral.....	10
1.3.1.3. Resolución Radiométrica.....	10

1.3.1.4.	Resolución Temporal.....	11
1.3.2.	Tipos de Sensores.....	11
1.3.3.	Productos Satelitales.....	12
1.3.3.1.	Landsat 8.....	12
1.3.3.2.	Sentinel 3.....	13
1.3.3.3.	Aster.....	15
1.3.3.4.	Modis.....	15
1.3.4.	Pre-procesamiento de imágenes satelitales.....	18
1.3.4.1.	Corrección Geométrica.....	18
1.3.4.2.	Corrección Radiométrica.....	18
1.3.4.2.1.	Método de Chávez o DOS1.....	19
CAPÍTULO II: MATERIALES Y MÉTODOS		20
2.1.	Zona de estudio.....	21
2.2.	Metodología general.....	22
2.3.	Estimación de la evapotranspiración a partir de datos meteorológicos.....	22
2.3.1.	Pendiente de la curva de presión de vapor.....	23
2.3.2.	Constante psicrométrica.....	23
2.3.3.	Déficit de la presión de vapor.....	24
2.3.4.	Radiación neta sobre la superficie del cultivo.....	24
2.3.5.	Flujo del calor del suelo.....	25
2.4.	Obtención y Procesamiento de datos satelitales.....	25
2.4.1.	Datos LANDSAT 8 y ASTER.....	26
2.4.1.1.	Corrección Geométrica.....	26
2.4.1.2.	Corrección Radiométrica y Atmosférica.....	26
2.4.2.	Datos SENTINEL 3.....	26
2.4.3.	Datos MODIS.....	27
2.5.	Estimación de la evapotranspiración a partir de imágenes satelitales.....	27
2.5.1.	Índice de vegetación de diferencias Normalizadas NDVI.....	27
2.5.2.	Albedo y Emisividad de superficie.....	28

2.5.3.	Temperatura Superficial de terreno T_s	29
2.5.4.	Temperatura del aire T_a	30
2.5.5.	Radiación neta diaria.	30
2.5.6.	Flujo de calor de suelo.....	32
2.6.	Criterio de calificación y validación de resultados.	32
CAPÍTULO III: RESULTADOS Y DISCUSIÓN.		33
3.1.	Obtención de Imágenes Satelitales.	34
3.2.	Evapotranspiración con datos meteorológicos.....	34
3.3.	Evapotranspiración con datos satelitales.	35
3.3.1.	Mapas de Temperatura Superficial del Terreno.	35
3.3.2.	Mapas de Temperatura del aire.	37
3.3.3.	Mapas de Radiación neta diaria.....	38
3.3.4.	Mapas de Evapotranspiración del cultivo de referencia.	39
3.4.	Validación de resultados.....	41
CONCLUSIONES.		43
RECOMENDACIONES.		45
BIBLIOGRAFÍA.....		46
ANEXOS.....		50
Anexo 1: Ecuaciones para el cálculo de Temperatura del aire.		51
Anexo 2: Mapas de Evapotranspiración del cultivo de referencia ET_o		52
Anexo 3: Tablas de Evapotranspiración del cultivo de referencia ET_o		56

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Comparación entre resoluciones de los diferentes sensores.....	12
Tabla 2: Características de las imágenes LANDSAT 8.	13
Tabla 3: Características de las imágenes SENTINEL 3, Instrumento SLSTR.	14
Tabla 4: Características de las imágenes SENTINEL 3, Instrumento OLCI	14
Tabla 5: Características de las imágenes ASTER.....	15
Tabla 6: Características del sensor MODIS	16
Tabla 7: Descripción de los productos disponibles de MODIS	17
Tabla 8: Estaciones meteorológicas de la UTPL.....	22
Tabla 9: Infrarrojo cercano y Rojo Visible.....	28
Tabla 10: Fechas de disponibilidad de Imágenes Satelitales.	34
Tabla 11: Cálculos de evapotranspiración ETo para la estación de Jipiro.....	35
Tabla 12: Datos de ETo con datos meteorológicos y Datos satelitales LANDSAT 8.	41
Tabla 13: Ecuaciones para el cálculo de Ta.....	51
Tabla 14: Datos de ETo con datos meteorológicos y Datos satelitales LANDSAT 8.	56
Tabla 15: Datos de ETo con datos meteorológicos y Datos satelitales ASTER.....	56
Tabla 16: Datos de ETo con datos meteorológicos y Datos satelitales SENTINEL 3.	57
Tabla 17: Datos de ETo con datos meteorológicos y Datos satelitales MODIS.....	58

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Efecto de la velocidad del viento sobre le ET.....	9
Figura 2: Resolución Espacial, comparación del tamaño del pixel de una imagen.....	10
Figura 3: Numero y longitud de las bandas para Aster y Landsat.	10
Figura 4: Representación de la resolución radiométrica. Cada pixel asume un valor específico dependiendo de su resolución radiométrica.	11
Figura 5: Esquema de: a) Sensor pasivo. b) Sensor Activo.	12
Figura 6: Proceso de corrección Radiométrica y Geométrica.....	18
Figura 7: Delimitación de la zona de estudio.....	21
Figura 8: diagrama de flujo de la metodología general.....	22
Figura 9: Representación de la invariancia del coeficiente Cd	32
Figura 10: Mapas de Ts (°C), para los diferentes productos satelitales.....	36
Figura 11: Mapas de Ta (°C), para los diferentes productos satelitales.	37
Figura 12: Comparación de los métodos (Sobrino et al., 2007) y (Carmona, 2014).	38
Figura 13: Mapas de Rn <i>MJm2día</i> diaria para los diferentes productos satelitales.	39
Figura 14: Mapas de ETo (mm/día) para los diferentes productos satelitales.	40
Figura 15: Coeficiente de determinación para los diferentes productos satelitales.....	42
Figura 16: Mapas de ETo (mm/día) de LANDSAT 8.	52
Figura 17: Mapas de ETo (mm/día) de SENTINEL 3.	53
Figura 18: Mapas de ETo (mm/día) de ASTER.....	54
Figura 19: Mapas de ETo (mm/día) para MODIS.....	55

RESUMEN

El objetivo de esta investigación fue identificar el mejor producto de imágenes satelitales de libre acceso, con el cual se pueda extrapolar datos meteorológicos disponibles para determinar la tasa de evapotranspiración de referencia (ET_o) de manera regional.

Para la estimación de la ET_o por Teledetección, se analizaron 15 imágenes de la ciudad de Loja. Se tomó en cuenta cuatro productos satelitales: LANDSAT 8, ASTER, SENTINEL 3 y MODIS. Las imágenes se obtuvieron gratuitamente de los servidores web de la NASA, USGS y EUMESAT. Los mapas de ET_o se calcularon con la fórmula de Penman-Monteith, utilizando mapas generados netamente por percepción remota y mapas generados por interpolación con datos meteorológicos.

Para determinar el mejor producto de imágenes satelitales se tomaron en cuenta dos criterios: La precisión, determinada por el coeficiente de determinación (R^2), y la disponibilidad de datos, determinada por la resolución espacial. Se concluyó que el producto satelital idóneo para el cálculo de la ET_o es SENTINEL 3, esto debido a que este producto dispone de imágenes diarias y el coeficiente ($R^2 = 0.894$) es considerado bueno para calcular regionalmente la ET_o.

PALABRAS CLAVES: Evapotranspiración, Teledetección, Mejor producto satelital, Penman-Monteith, LANDSAT 8, SENTINEL 3, ASTER, MODIS.

ABSTRACT

The objective of this research was to identify the best product of free access satellite images, with which it is possible to extrapolate available meteorological data to determine the reference evapotranspiration rate (ET_o) in a regional manner.

For the estimation of the ET_o by Remote Sensing, 15 images of the city of Loja were analyzed. Four satellite products were taken into account: LANDSAT 8, ASTER, SENTINEL 3 and MODIS. The images were obtained free of charge from the web servers of NASA, USGS and EUMESAT. The ET_o maps were calculated with the Penman-Monteith formula, using maps generated only by remote perception and maps generated by interpolation with meteorological data.

To determine the best satellite image product, two criteria were taken into account: Precision, determined by the coefficient of determination (R^2), and the availability of data, determined by spatial resolution. It was concluded that the satellite product suitable for the calculation of the ET_o is SENTINEL 3, because this product has daily images and the coefficient ($R^2 = 0.894$) is considered good to calculate ET_o regionally.

KEY WORDS: Evapotranspiration, Remote sensing, Best satellite product, Penman-Monteith, LANDSAT 8, SENTINEL 3, ASTER, MODIS.

INTRODUCCIÓN

La presente investigación tiene como objetivo principal identificar entre varios productos de imágenes satelitales de libre acceso, el mejor para el cálculo de la tasa evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o). Así pues los objetivos específicos son: Calcular la ET_o usando datos meteorológicos de las estaciones disponibles en la UTPL; Calcular la ET_o usando imágenes satelitales utilizando cuatro productos de imágenes satelitales; Correlacionar el valor de ET_o calculados con datos meteorológicos y su valor correspondiente a los datos satelitales, además, comparar la aplicabilidad de cada producto según la disponibilidad de datos, para así determinar el mejor producto.

El uso de imágenes satelitales en la estimación de la ET_o permite conocer su comportamiento espacial y temporal a nivel diario, mensual y anual. Dicha información permite tomar decisiones para mejorar la planeación y el manejo de los recursos hídricos. (Salinas, Magdaleno, Chávez, & Ramirez., 2014). La ET está involucrada en problemas de suministro de agua tanto superficial como subterránea, proyectos para riego, electricidad, control de inundaciones, etc. (Jensen & Allen, 2016).

Para el cálculo de la evapotranspiración se requiere información meteorológica de temperatura, velocidad del viento, radiación solar y humedad relativa. (Bejar., 2004). Lamentablemente en nuestro país y en muchas partes del mundo estos valores no se miden continuamente, además, no se dispone de estaciones meteorológicas para poder cubrir todo el territorio nacional. Las fórmulas que relacionan ET_o y datos climatológicos, se utilizan para transponer los datos de ET_o observados, de un área a otras, donde pocos o ningún dato está disponibles. (Jensen & Allen, 2016).

Se calculó la ET_o con el método de Penman-Monteith, por lo que fue necesario recopilar datos meteorológicos diarios para el año 2017 (temperatura media, radiación solar, humedad relativa, velocidad de viento, etc.) en la zona de estudio, dichos datos fueron proporcionados por la red de estaciones meteorológicas de la UTPL.

Para la estimación de la ET_o por teledetección, se utilizaron 15 imágenes de cuatro productos satelitales: LANDSAT 8, ASTER, SENTINEL 3 y MODIS, descargadas de los servidores web de acceso libre: NASA, USGS y EUMESAT. Las operaciones de pre-procesamiento de las imágenes se realizaron con el Software QGIS 2.18.15, mientras que, los cálculos de evapotranspiración se realizaron en el software ArcGis 10.5. Los mapas de ET_o se calcularon con la fórmula de Penman-Monteith, utilizando mapas generados netamente por percepción remota y mapas generados por interpolación con datos puntuales de las estaciones meteorológicas.

Para cotejar los datos obtenidos con los productos satelitales y los datos meteorológicos, se identificó en los mapas generados el valor de ETo en el pixel correspondiente a la ubicación de cada una de las estaciones y se relacionó con la ETo calculada con los datos meteorológicos, para así, obtener el coeficiente de determinación, este coeficiente nos revela que producto satelital tiene mejor relación con los datos reales de ETo calculados en las estaciones meteorológicas.

Esta investigación se limita ante la disponibilidad de imágenes satelitales, en el caso del producto ASTER, solo se contó con dos imágenes para el año 2017, esto debido a la baja resolución temporal y al porcentaje de nubosidad en las imágenes. Al contar con pocas imágenes el valor de la correlación puede ser desleal, en comparación con los datos de MODIS, que se contó con 6 imágenes para el periodo en estudio.

Este proyecto se ha dividido en cuatro capítulos, los cuales son:

Capítulo I: Se encuentran las bases teóricas sobre las cuales se basa esta investigación, definiciones de evapotranspiración, método de Penman-Monteith y sus variables, teledetección, etc.

Capítulo II: En este capítulo se describe la zona de estudio, los materiales y la metodología utilizada.

Capítulo III: Incluye los resultados de la investigación y discusión de los mismos.

Capítulo IV: Contiene las conclusiones que derivan de los resultados, así como la opinión final sobre cuál es el mejor producto de imágenes satelitales y las recomendaciones para futuras líneas de investigación.

CAPÍTULO I:
MARCO TEÓRICO.

1.1. Antecedentes.

Investigaciones de Sánchez & Chuvieco, (2000) y Sánchez & Carvacho, (2006) concluyeron que las imágenes NOAA-AVHRR son útiles para determinar la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o) a escala regional, luego de haber generado mapas de ET_o planteando como modelo, ecuaciones obtenidas de regresión múltiple entre valores de ET_o estimados con datos meteorológicos usando el método de Penman-Monteith y variables obtenidas de datos satelitales (NDVI, Emisividad, Temperatura). Obtuvieron coeficientes de determinación dependiendo de la época del año y de la ubicación de la estación, los valores de R^2 variaron de 0.77 hasta 0.94.

En una investigación realizada por: Carrasco, Ortega, Morales, Lagos, & Bennewitz, (2013) compararon la evapotranspiración real (ET_a) de un viñedo regado por goteo, medida por un sistema de flujos turbulentos instalado en una parcela experimental con la ET_a calculada usando imágenes satelitales Landsat 5 TM, 7 (+ETM) y datos meteorológicos, a través del modelo residual del balance de energía METRIC (Mapping Evapotranspirations and High Resolutions using Internalized Calibration). Los resultados fueron satisfactorios, obteniendo un coeficiente de determinación (R^2) de 0.90.

Murillas & Londoño, (2014) calcularon mapas de evapotranspiración basándose en el algoritmo SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm For Land), valiéndose para los cálculos de tres imágenes de la estación LANDSAT 8 adquiridas de los sensores OLI y TIR. Los resultados fueron muy aceptables obteniendo un coeficiente de determinación (R^2) de 0.938 al ser validados con datos de estaciones meteorológicas donde se calculó la ET con el método de Penman-Monteith. El mismo año, Gordillo, Flores, Tijerina, & Arteaga, (2014) calcularon ET con el modelo METRIC usando imágenes satelitales Landsat 5 TM, obteniendo un coeficiente de determinación de 0.850.

En la investigación llevada a cabo por Marini, Santamaría, Oricchio, Di Bella, & Basualdo, (2017) elaboraron un modelo para el cálculo de la evapotranspiración real y potencial (ETR y ETP) en base a un análisis de regresión múltiple, entre dichos parámetros estimados en siete estaciones meteorológicas y dos variables (Ts y NDVI) derivadas de imágenes satelitales MODIS. Para el caso de la ETR se ajustó un modelo de regresión múltiple lineal, obteniendo un coeficiente de determinación de 0.6959, en cambio para la ETP obtuvieron un coeficiente de determinación de 0.8409 ajustándolo a un modelo de regresión ajustado no lineal.

1.2. Evapotranspiración.

La evapotranspiración (ET) es la suma de las pérdidas de agua causadas por evaporación de una superficie como tierra y agua, y la transpiración de las plantas (Bejar, 2004). En un terreno con cultivos la evaporación y la transpiración ocurren paralelamente y no hay manera sencilla de distinguir entre estos dos procesos (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2006)

La evaporación es el proceso físico por el cual el agua pasa de un estado líquido al estado gaseoso o vapor de agua. La transpiración es el proceso físico por el que el agua dentro de las células de la plantas se evapora y de transfiere como vapor de agua al aire a través de los estomas.(Jensen, Burmann, & Allen, 2016).

Los factores que dominan la evaporación también dominan la evapotranspiración, los cuales son: el suministro de energía y el transporte del vapor, el suministro de humedad a la superficie de evaporación (Allen et al., 2006). A medida que el suelo se seca, la tasa de evapotranspiración cae por debajo del nivel que generalmente mantiene un suelo bien humedecido.(Chow, 1994).

1.2.1. Evapotranspiración del cultivo de referencia ET_o .

La evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o) es un parámetro que expresa el poder evaporante de la atmosfera. Se toma para la superficie de referencia un cultivo hipotético de pasto con características específicas y sin restricciones de agua. Según Allen et al., (2006) los únicos factores que afectan a la ET_o son los parámetros climáticos, por lo tanto ET_o es también un parámetro climático.

1.2.2. Método FAO Penman-Monteith.

La ecuación de Penman-Monteith permite calcular la evapotranspiración de referencia, ET_o en función de datos meteorológicos, como: temperatura del aire, radiación solar, tensión de vapor de agua y velocidad de viento.(Guevara D., 2006)

Según Allen et al., (2006) el método FAO Penman-Monteith es el más recomendable como método estándar para la definición y cálculo de la ET_o , conclusión a la que llegaron después de una consulta de expertos realizada en 1990.

1.2.3. Factores que determinan la Evapotranspiración.

1.2.3.1. Radiación Solar.

La radiación solar es el principal factor que controla la ET y ET_o . La radiación solar es la fuente de energía más importante del planeta y puede evaporar grandes cantidades de agua. La cantidad de radiación efectiva que puede llegar a una superficie depende de la época del año y de la posición o latitud (Allen et al., 2006; Jensen et al., 2016).

1.2.3.1.1. Radiación neta (R_n).

La radiación neta (R_n) es la cuantía neta de intercambio de energía en una superficie de tierra o agua, considerando el flujo entrante y saliente de la radiación de onda corta y onda larga. La R_n es la principal fuente de energía causante de ET y ET_o (Jensen et al., 2016). Según Allen et al., (2006) la R_n es positiva durante el día y negativa por la noche, por lo tanto el valor promedio diario de R_n es positivo, salvo algunos casos extremos que se dan en latitudes altas.

1.2.3.1.2. Albedo.

Se conoce como albedo (α) la porción de radiación solar que es reflejada por una superficie y varía de acuerdo al tipo de superficie (color, humedad, contenido de materia orgánica y rugosidad de la superficie) y el ángulo de incidencia de la radiación, consecuencia de la posición del sol (Allen et al., 2006; Carmona, 2014).

1.2.3.1.3. Emisividad.

Se conoce como emisividad de una superficie a la relación entre la energía emitida por la superficie a una determinada temperatura y la energía a la de un cuerpo negro a la misma temperatura (Veguillas, 2016). Jiménez Muñoz & Carlos, (2005) definen a la emisividad como la capacidad de una superficie para convertir la energía calorífica en energía radiante fuera de la misma, y esta depende del contenido de humedad, la rugosidad y la composición de una superficie.

1.2.3.2. Temperatura.

La temperatura del aire (T_a) se eleva por la radiación absorbida por la atmosfera y el calor emitido por una superficie. La temperatura afecta la tasa de ET o ET_o , pero tiene un impacto menor sobre esta que la radiación solar (Allen et al., 2006). Según Jensen et al., (2016) la temperatura diaria promedio de las hojas de las plantas, superficies de suelos y cuerpos de agua poco profundas son similares a la temperatura del aire a dos metros de altura, por lo tanto la presión del vapor del agua en una superficie está relacionada exponencialmente con la temperatura media del aire.

1.2.3.3. Humedad relativa del aire.

Allen et al., (2006) definen a la humedad relativa (HR) como la relación entre la cantidad real de agua en el aire a una determinada temperatura y la cantidad que podría tener si estuviera saturado a las misma temperatura. La HR es adimensional y se expresa en porcentaje y puede ser medido con una estación meteorológica.

1.2.3.4. Velocidad de viento.

El viento y la turbulencia del aire son responsables de en gran parte de la remoción de vapor de una superficie. La ET aumenta cuando la velocidad aumenta en un clima caliente y seco, en el caso de un clima tibio y húmedo la variación de ET no es grande (Allen et al., 2006).

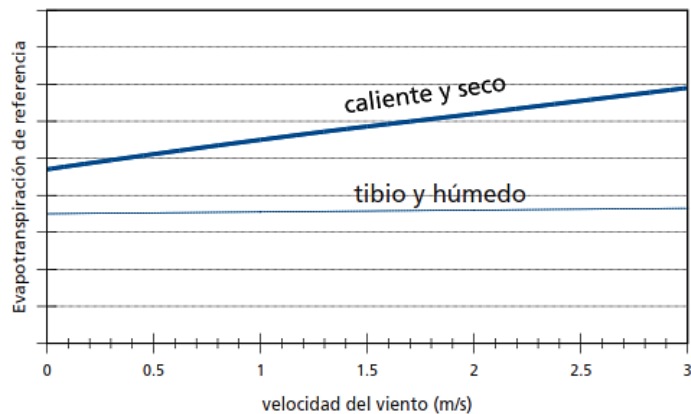


Figura 1: Efecto de la velocidad del viento sobre la ET.

Fuente: Modificado de: (Allen et al., 2006).

Elaboración: (Allen et al., 2006).

1.3. Teledetección.

Chuvieco, (1995) y Labrador, Évora, & Arbelo, (2012) definen a la teledetección o percepción remota como una técnica o ciencia que permite obtener información de la superficie terrestre de manera remota desde sensores instalados en plataformas espaciales. El procesamiento y análisis de la información también se incluye dentro del concepto de teledetección.

1.3.1. Imágenes Satelitales.

Según Martínez & Díaz, (2005) las imágenes satelitales son una matriz digital de puntos capturada por un sensor a bordo de un satélite. Las imágenes se encuentran en formato raster, el cual consiste en una matriz de miles de píxeles, los cuales tienen un valor digital o de reflectancia. Cada píxel o celda posee un atributo numérico, el cual indica el nivel de gris de esa celda. Los niveles de grises se conocen como DN o Número Digital y representan la intensidad de energía electromagnética reflejada por una superficie y medida por un sensor. (Pérez, 2007).

1.3.1.1. Resolución Espacial.

También conocida como resolución geométrica, esta se refiere a la unidad de información incluida en cada píxel de una imagen. (Frank & Tingo, 2017). Se mide en unidades de longitud y conoce también como la medida del objeto más pequeño que se puede distinguir sobre una imagen. (Chuvieco, 1995). Cuando más pequeño es el objeto que se puede distinguir, mayor es la resolución espacial.

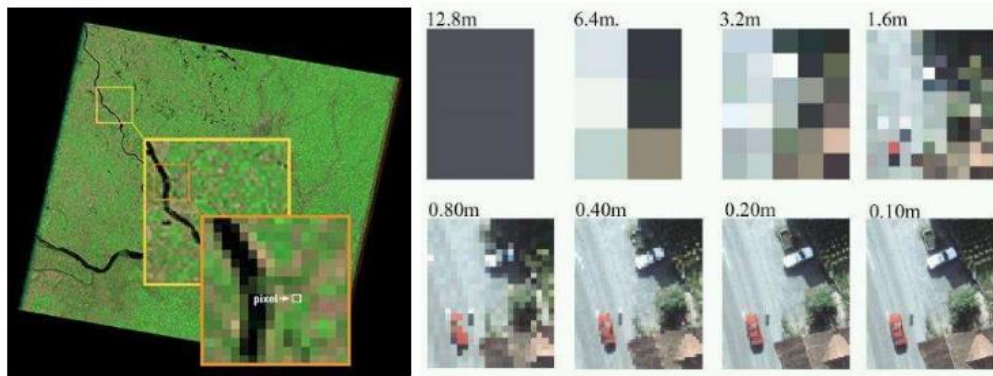


Figura 2: Resolución Espacial, comparación del tamaño del pixel de una imagen.
Fuente: Tomado de: (Frank & Tingo, 2017)
Elaboración: (Frank & Tingo, 2017).

1.3.1.2. Resolución Espectral.

La resolución espectral indica el número de bandas y la anchura de las mismas que puede discriminar un sensor. Un sensor es más conveniente cuando más número de bandas proporciones, esto debido a que tendrá mayor información de una superficie en diferentes bandas espectrales (Frank & Tingo, 2017). Es conveniente que las bandas sean estrechas, para así poder recoger la señal sobre regiones convenientes del espectro, cuando las bandas son amplias se registra un valor promedio para encubrir la diferencia espectral entre las superficies de interés (Chuvieco, 1995).

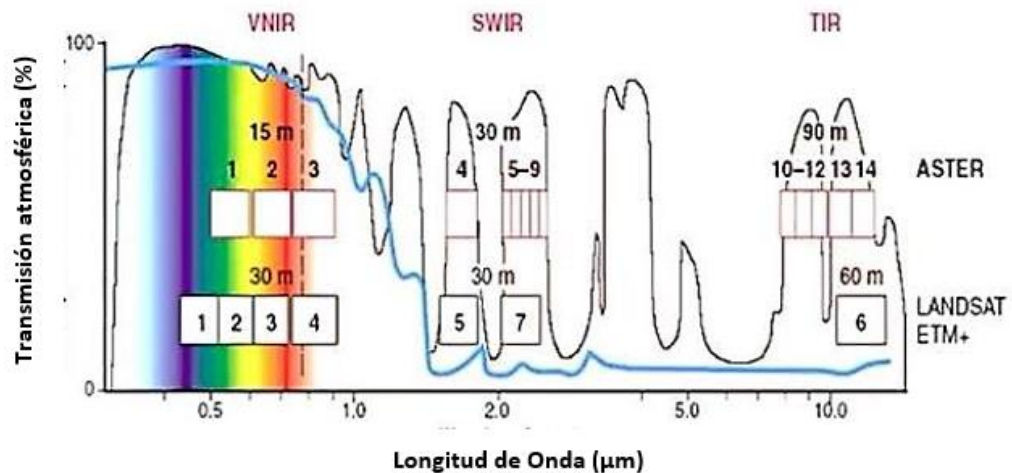


Figura 3: Numero y longitud de las bandas para Aster y Landsat.
Fuente: Modificado de: (Frank & Tingo, 2017)
Elaboración: (Frank & Tingo, 2017).

1.3.1.3. Resolución Radiométrica.

Es una medida en bits (dígitos binarios) que representa los niveles de grises captados por el sensor, así poniendo en evidencia la capacidad del sensor para discriminar albedos con diferencias de radiación reflejada o emitida (Perez, 2007). Cuanto más sean los niveles de

grises, la interpretación de la imagen será mejor. Según Beaven (como se citó en Chuvieco, 1995), el ojo humano solo es capaz de distinguir 64 niveles de gris, además, es suficiente con 16 niveles para asegurar un análisis visual apropiado.

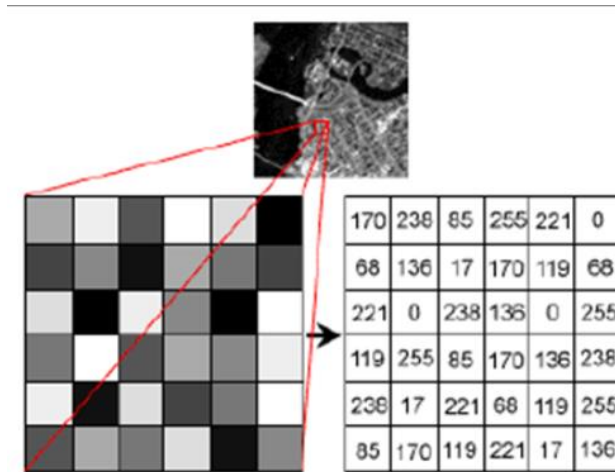


Figura 4: Representación de la resolución radiométrica.

Fuente: Recuperado de: <https://slideplayer.es/slide/10192066/>

Elaboración: <https://slideplayer.es/slide/10192066/>

1.3.1.4. Resolución Temporal.

Se refiere a la reincidencia con la que un sensor adquiere una imagen de la misma superficie. La resolución temporal está en función de las características orbitales del satélite como: altura, velocidad e inclinación. Se considera resolución temporal alta cuando es de 1 a 4 días, cuando supera los 16 días se considera resolución baja (Chuvieco, 1995; Frank & Tingo, 2017).

1.3.2. Tipos de Sensores.

Hay dos tipos de sensores, los sensores pasivos miden la radiación electromagnética emitida o reflejada por una superficie terrestre, este tipo de sensores son de gran utilidad en percepción remota para la evaluación de recursos naturales. Por otro lado los sensores activos tienen su propia fuente de radiación de energía, la cual dirigen hacia la superficie en estudio y verifican con el sensor la radiación reflejada (Frank & Tingo, 2017; Perez, 2007).

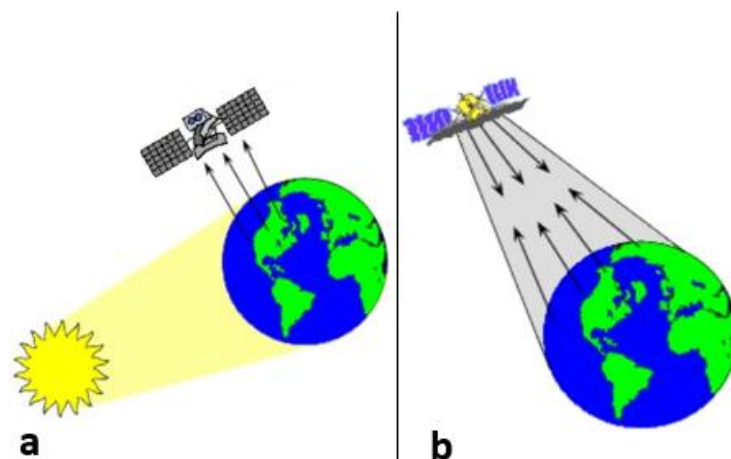


Figura 5: Esquema de: a) Sensor pasivo. b) Sensor Activo.

Fuente: Modificado de: <https://es.slideshare.net/rodbece/modulo1-b-imagenessatelitales>

Elaboración: El Autor.

1.3.3. Productos Satelitales.

Se detalla a continuación los sensores de los diferentes productos satelitales que se usaron para la presente investigación.

Tabla 1: Comparación entre resoluciones de los diferentes sensores.

RESOLUCIÓN	PRODUCTOS DE DATOS SATELITALES.			
	LANSAT 8	SENTINEL 3	ASTER	MODIS.
Resolución Radiométrica.	16 bits	-	8-16 bits	12 bits
Resolución Espacial (m)	30	500 (S1-S60) 1000 (S7-S9)	15 (VNIR) 30(SWIR) 90 (TIR)	250 (B1-2) 500(B3-7) 1000 (B8-36)
Resolución Espectral.	11 bandas	11 b (SLSTR) 21 b (OLCI)	14 bandas	36 bandas
Resolución Temporal.	16 días	2 días (SLSTR) 1 día (OLCI)	16 días	1 día

Fuente: Modificado de: (EUMESAT, s/f; Frank & Tingo, 2017).

Elaboración: El Autor.

1.3.3.1. Landsat 8.

El programa Landsat es un conjunto de misiones de observación de la Tierra por satélite. La NASA (National Aeronautics Space Administration) y el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS por sus siglas en inglés: U.S. Geological Survey) son quienes administran este programa.(Frank & Tingo, 2017).

Landsat 8 es una plataforma que se lanzó en febrero del 2013, a bordo lleva los sensores OLI (Operational Land Imager) y TIRS (Thermal Infrared Sensor), los cuales ofrecen imágenes de 170 Km de norte a sur y de 183 Km de este a oeste, con resolución temporal de 16 días (U.S. Geological Survey, s/f).

Tabla 2: Características de las imágenes LANDSAT 8.

Número de Banda	Nombre de la banda	Longitud de Onda (μm)	Resolución Espacial (m)
1	Ultra azul (Aerosol/costero)	0.433-0.453	30
2	Azul	0.450-0.515	30
3	Verde	0.525-0.600	30
4	Rojo	0.630-0.680	30
5	Infrarrojo Cercano (NIR)	0.845-0.885	30
6	Onda Corta Infrarroja (SWIR 1)	1.560-1.660	30
7	Onda Corta Infrarroja (SWIR 2)	2.100-2.300	30
8	Pancromática	0.500-0.680	15
9	Cirrus	1.360-1.390	30
10	Infrarrojo Térmico SITR 1	10.600-11.190	30
11	Infrarrojo Térmico SITR 2	11.500-12.510	30

Fuente: Modificado de: (Barsi, Lee, Kvaran, Markham, & Pedelty, 2014).
Elaboración: El Autor.

1.3.3.2. Sentinel 3.

Sentinel 3 es una misión satelital de observación de la tierra diseñada por la Agencia Espacial Europea (ESA por sus siglas en inglés: European Space Agency) para el programa de Vigilancia Mundial del Medio Ambiente y la Seguridad (GMES Global Monitoring for the Environment and Security). (Donlon et al., 2012)

La misión consta de dos satélites idénticos que orbitan en constelación para obtener un cobertura global, con lo que pueden medir: temperatura superficial del suelo y el océano, índices de estado de la vegetación, espesor de las capas de hielo y algunas otras variables que sirven para muchas aplicaciones, entre ellas el cálculo de la evapotranspiración. (Agencia Espacial Europea, 2018; EUMESAT, s/f)

Para la captura de las imágenes SENTINEL 3 consta de tres instrumentos: OLCI, SLSTR y SRAL. El Instrumento de Color de Océano y Tierra (OLCI) ofrece una cobertura global con una resolución temporal de 2 días, cubriendo 21 bandas espectrales (0.55 a 1.20 μm), en cambio el Radiómetro de Temperatura de la Superficie del Mar y del Suelo SLSTR ofrece imágenes con resolución temporal de 1 día, por último el Altímetro Radar de Apertura Sintética ofrece imágenes cada 27 días. Estos datos se basan en la constelación de dos satélites en la misma órbita. (Agencia Espacial Europea, 2018)

Tabla 3: Características de las imágenes SENTINEL 3, Instrumento SLSTR.

Número de Banda	Nombre de la banda	Longitud de Onda (μm)	Resolución Espacial (m)
S1	Visible cercano IR	0.555	500
S2		0.659	
S3		0.865	
S4	Onda Corta IR	1.375	500
S5		1.610	
S6		2.250	
S7	Infrarrojo Térmico, bandas ambientales	3.740	1000
S8		10.850	
S9		12.000	
F1	Infrarrojo térmico, Bandas de emisión de fuego	3.740	1000
F2		10.850	

Fuente: Modificado de (EUMESAT, s/f)

Elaboración: El Autor.

Tabla 4: Características de las imágenes SENTINEL 3, Instrumento OLCI

Número de Banda	Longitud de Onda (μm)	Resolución Espacial (m)
Oa1	0.400	300
Oa2	0.413	
Oa3	0.443	
Oa4	0.490	
Oa5	0.510	
Oa6	0.560	
Oa7	0.620	
Oa8	0.665	
Oa9	0.674	
Oa10	0.681	
Oa11	0.709	
Oa12	0.754	
Oa13	0.761	
Oa14	0.764	
Oa15	0.767	
Oa16	0.778	
Oa17	0.865	
Oa18	0.885	
Oa19	0.900	
Oa20	0.940	
Oa21	1.020	

Fuente: Modificado de (EUMESAT, s/f)

Elaboración: El Autor.

1.3.3.3. Aster.

El Radiómetro Avanzado de Emisión y Reflexión Térmica (ASTER por sus siglas en inglés: Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) es uno de los cinco sistemas de sensores a bordo del satélite TERRA, este es un satélite multinacional de la NASA, se lanzó en diciembre de 1999 por los gobiernos de Estados Unidos y Japón, este satélite está dedicado a la investigación científica por satélite (Frank & Tingo, 2017).

ASTER está compuesto por tres subsistemas: VNIR que cubre frecuencias de infrarrojo visible y cercano, SWIR cubre frecuencias de onda corta infrarroja y TIR el cual cubre la longitud de onda del infrarrojo térmico. ASTER ofrece imágenes con resolución temporal de 16 días y un barrido o ancho de las imágenes de 60 Km (Frank & Tingo, 2017; NASA LP DAAC, 2015).

Tabla 5: Características de las imágenes ASTER.

Número de Banda	Nombre de la banda	Longitud de Onda (μm)	Resolución Espacial (m)
1	Verde	0.520-0.600	15
2	Rojo	0.630-0.690	
3N	Infrarrojo Cercano	0.780-0.860	
3B	Infrarrojo Cercano	0.780-0.860	
4	SWIR	1.600-1.700	30
5		2.2145-2.185	
6		2.185-2.225	
7		2.235-2.285	
8		2.295-2.365	
9		2.360-2.430	
10	TIR	8.125-8.475	90
11		8.475-8.825	
12		8.925-9.275	
13		10.250-10.950	
14		10.950-11.650	

Fuente: Modificado de: (Frank & Tingo, 2017)

Elaboración: El Autor.

1.3.3.4. Modis.

MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) es un sensor que viaja a bordo de los satélites TERRA y AQUA. MODIS transmite datos en 36 bandas con una resolución temporal de uno a dos días con un barrido de 2330 Km de ancho.

Tabla 6: Características del sensor MODIS

Número de Banda	Longitud de Onda (μm)	Resolución Espacial (m)	Uso Primario.
1	0.620-0.670	250	Límites de tierra, nubes y aerosoles.
2	0.841-0.876		
3	0.459-0.479	500	Propiedades de la tierra, nubes y aerosoles.
4	0.545-0.565		
5	1.230-1.250		
6	1.628-1.652		
7	2.105-2.155		
8	0.405-0.420	1000	Biogeoquímica, color del océano y fitoplacton.
9	0.438-0.448		
10	0.483-0.493		
11	0.526-0.536		
12	0.546-0.556		
13	0.662-0.672		
14	0.673-0.683		
15	0.743-0.753		
16	0.862-0.877		
17	0.890-0.920		Vapor de agua atmosférico
18	0.931-0.941		
19	0.915-0.965		Temperatura de la superficie y nubes
20	3.660-3.840		
21	3.929-3.989		Temperatura atmosférica
22	3.929-3.989		
23	4.020-4.080		Vapor de agua en nubes
24	4.433-4.498		
25	4.482-4.549		Temperatura de la superficie.
26	1.360-1.390		
27	6.535-6.895		Ozono
28	7.175-7.475		
29	8.400-8.700		Temperatura de la superficie y nubes
30	9.580-9.880		
31	10.78-11.28		Altitud máxima de las nubes
32	11.77-12.27		
33	13.18-13.48		
34	13.48-13.78		
35	13.78-14.09		
36	14.09-14.39		

Fuente: Modificado de: (NASA LP DAAC, 2014)

Elaboración: El Autor.

Tabla 7: Descripción de los productos disponibles de MODIS

Producto	Descripción del producto
MOD01	Level 1A: Contiene datos crudos de las 36 bandas.
MOD02	Level 1B: Incluyendo la calibración de radiancia y geo referencia para las 36 bandas.
MOD03	Conjunto de datos geo referidos
MOD04	Productos de aerosoles.
MOD05	Total de agua precipitada (método del infrarrojo cercano)
MOD06	Productos de las nubes (fase y propiedades de la parte superior de las nubes).
MOD07	Perfiles atmosféricos
MOD08	Productos atmosféricos Nivel 3
MOD09	Reflectancia superficial, corregida atmosféricamente.
MOD10	Cobertura de nieve
MOD11	Temperatura superficial y emisión de calor
MOD12	Cobertura terrestre/Cambios de cobertura terrestre
MOD13	Índices de vegetación.
MOD14	Anomalías termales, incendios, biomasa
MOD15	Indicies de hojas y FPAR
MOD16	Resistencia superficial y evapotranspiración.
MOD17	Productos de vegetación y productividad primaria neta.
MOD18	Índice normalizado de radiancia del agua.
MOD19	Concentración de pigmentos.
MOD20	
MOD21	Concentración de clorofila.
MOD22	Radiación activa fotosintética PAR
MOD23	Concentración de sólidos suspendidos en el gua oceánica.
MOD24	Concentración de materia orgánica.
MOD25	Coccolith concentración.
MOD26	Coeficiente de atenuación del agua oceánica.
MOD27	Productividad primaria del océano.
MOD28	Temperatura superficial del mar.
MOD29	Cobertura de hielo en el océano.
MOD30	Perfiles de humedad y temperatura.
MOD31	Concentración de Phycocrythrin.
MOD32	Matchup DB y estructura de los procesos oceánicos.
MOD33	Coordenadas de la cobertura de nieve.
MOD34	Malla de índices de vegetación.
MOD35	Masas de nubes.
MOD36	Coeficiente total de absorción.
MOD37	Propiedades océano aerosol.
MOD39	Valor de épsilon en el agua.
MOD43	Albedo 16 días, Nivel 3
MOD44	Campos continuos y conservación de la cobertura vegetal.

Fuente: Modificado de:(Frank & Tingo, 2017)
Elaboración: EL autor.

Los datos captados por el sensor MODIS son procesados para ofrecer 44 productos (Tabla 7: Descripción de los productos disponibles de MODIS) estos productos llevan la denominación MOD y ofrecen distintos datos de acuerdo al estudio que se realice.

1.3.4. Pre-procesamiento de imágenes satelitales.

Las imágenes adquiridas por un sensor pueden presentar alteraciones geométricas y radiométricas ocasionadas por diversos factores, como: distorsiones provocadas por la rotación de la tierra, oscilación del sensor, por el relieve del terreno, por el efecto de la atmosfera sobre la radiación, etc. Las anomalías en las imágenes deben ser corregidas antes de realizar cualquier análisis con las imágenes (Chuvieco, 1995; Olaya, 2016).

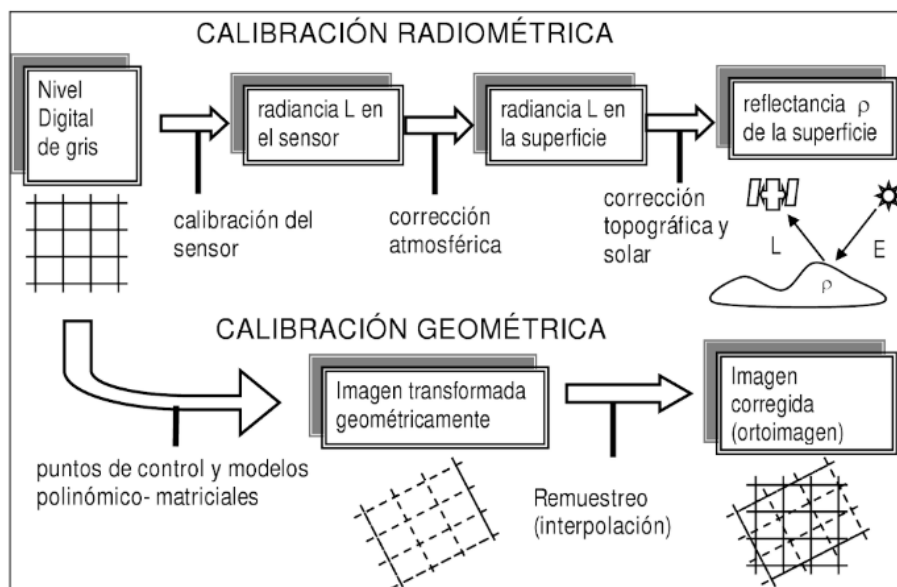


Figura 6: Proceso de corrección Radiométrica y Geométrica.

Fuente: Tomado de: (Pérez & Muñoz, 2006)

Elaboración: (Pérez & Muñoz, 2006)

1.3.4.1. Corrección Geométrica.

Con la corrección geométrica se pretende cambiar o corregir la posición de los píxeles mediante georeferenciación, asignando así la ubicación en el espacio a cada píxel (Chuvieco, 1995). Según Pérez & Muñoz, (2006) también se incluye en el proceso de corrección geométrica a los cambios de escala, zoom, giros y desplazamientos de una imagen satelital.

1.3.4.2. Corrección Radiométrica.

Chuvieco, (1995) se refiere a la corrección radiométrica como aquellas técnicas que rectifican los ND proporcionados por el sensor, con el objetivo de lograr valores para una caso ideal de recepción sin distorsiones atmosféricas y sin problemas derivados del mal funcionamiento del sensor. Los métodos transforman los ND a valores de radiancia y reflectancia, así se puede

comparar los valores de reflectancia de los píxeles con los valores de reflectancia de los materiales de una superficie medidas en campo o en laboratorio (Perez, 2007).

1.3.4.2.1. Método de Chávez o DOS1.

Según Chávez (como se citó en Gilmore, Saleem, & Dewan, 2015) el método de Sustracción de Píxeles Oscuros (DOS1 por sus siglas en inglés: Dark Object Substraction) se basa en imágenes para cancelar el componente de turbidez causada por la dispersión aditiva de datos de teledetección, este método se considera de tipo absoluto. El método de Chavez, (1988) asume que si los valores bajos de reflectancia en una imagen, cualquier reflectancia aparente debe ser producto de la dispersión atmosférica y esta información se usa para calibrar el resto de la imagen.

El método DOS1 subsana las variaciones en la radiación solar acorde el momento del año y el ángulo de elevación del sol (Brizuela, Aguirre, & Velasco, 2007).

CAPÍTULO II:

MATERIALES Y MÉTODOS

2.2. Metodología general.

Se muestra un diagrama de flujo de la metodología general a seguir para determinar la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o) con los datos meteorológicos y los datos satelitales, para su posterior validación.

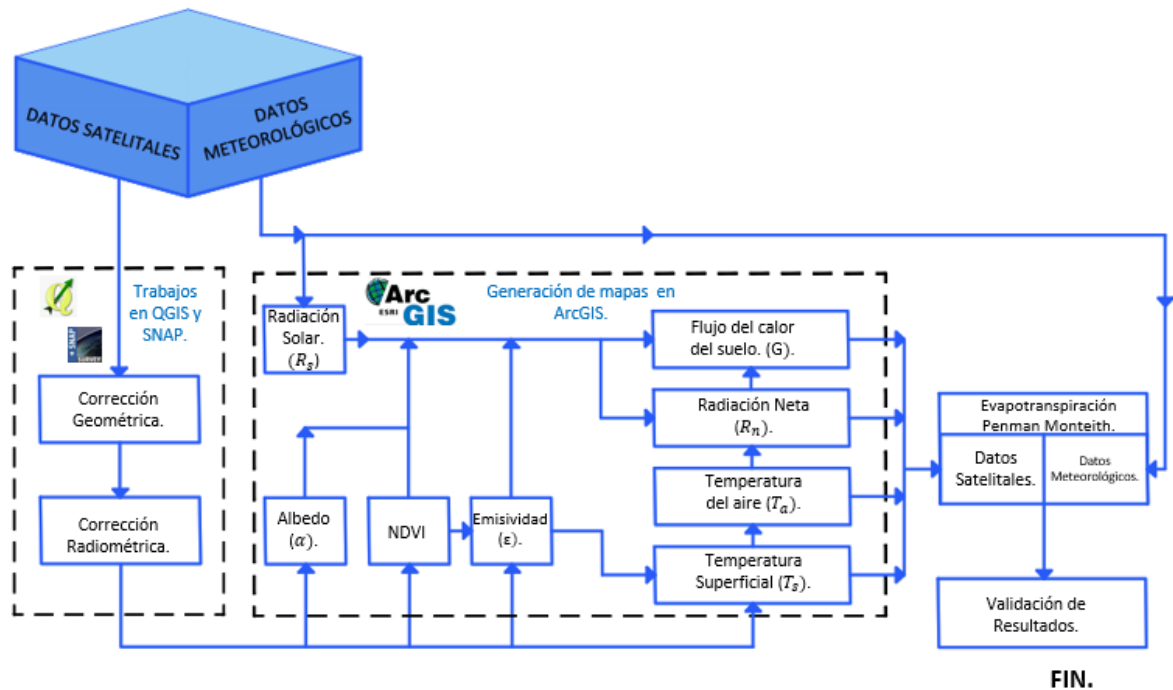


Figura 8: diagrama de flujo de la metodología general.

Fuente: El Autor.

Elaboración: El Autor.

2.3. Estimación de la evapotranspiración a partir de datos meteorológicos.

Los datos utilizados para el cálculo de la evapotranspiración de referencia son proporcionados por departamento de recursos hídricos de la Universidad Técnica Particular de Loja, esos datos corresponden a cinco estaciones distribuidas en la zona de estudio.

Tabla 8: Estaciones meteorológicas de la UTPL

Nro.	Referencia de Ubicación	Altura (msnm)	Coordenadas UTM WGS84 (m)	
			Este	Norte.
1	Colegio Militar	2033	697901	9563240
2	Finca Jipiro Alto	2218	700975	9560679
3	Finca Colegio Técnico	2377	694294	9558872
4	Cerro Ventanas	2816	694716	9555060
5	Cerro Villonaco.	2952	692138	9559012

Fuente: Universidad Técnica Particular de Loja.

Elaboración: El autor.

Las variables que se obtuvieron de las estaciones de la UTPL son: temperaturas máximas, mínimas y medias del aire (T), humedad relativa (HR), velocidad de viento (u) y radiación solar de onda corta (R_s), variables necesarias para calcular la evapotranspiración por el método de Penman-Monteith.

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

ET_0 : Evapotraspiración de referencia $\left(\frac{mm}{día}\right)$
 T : Temperatura del aire diaria en 2m de altura ($^{\circ}C$)
 Δ : Pendiente de la curva de presión de vapor $\left(\frac{KPa}{^{\circ}C}\right)$
 γ : Constante psicrométrica $\left(\frac{KPa}{^{\circ}C}\right)$
 $(e_s - e_a)$: Deficit de presión de vapor de saturación (KPa).
 R_n : Radiación neta sobre la superficie del cultivo $\left(\frac{MJ}{m^2 día}\right)$
 G : Flujo del calor del suelo $\left(\frac{MJ}{m^2 día}\right)$
 u_2 : Velocidad del viento a 2m de altura $\left(\frac{m}{s}\right)$.

2.3.1. Pendiente de la curva de presión de vapor.

Según (Allen et al., 2006) la pendiente de la relación entre la presión de saturación de vapor y la temperatura puede ser calculada con la expresión:

$$\Delta = \frac{4098 \left(0.6111 e^{\left(\frac{17.27T}{T+237.3} \right)} \right)}{(T + 237.3)^2} \quad (Ec. 2)$$

Δ : Pendiente de la curva de presión de vapor $\left(\frac{KPa}{^{\circ}C}\right)$
 T : Temperatura del aire diaria en 2m de altura ($^{\circ}C$)

2.3.2. Constante psicrométrica.

La constante psicrométrica se calcula con la siguiente ecuación:

$$\gamma = 0.00163 \frac{P}{\lambda} \quad (Ec. 3)$$

$$\lambda = 2.501 - (2.361 \times 10^{-3})T \quad (Ec. 4)$$

$$P = 101.3 \left(\frac{293 - 0.0065z}{293} \right)^{5.26} \quad (Ec. 5)$$

γ : Constante psicrométrica $\left(\frac{KPa}{^{\circ}C}\right)$
 P : Presión atmosférica (kPa).
 λ : Calor latente de vaporización $\left(\frac{MJ}{kg}\right)$
 T : Temperatura del aire diaria en 2m de altura ($^{\circ}C$)
 Z : Altura sobre el nivel del mar.

2.3.3. Déficit de la presión de vapor.

Se conoce como déficit de la presión de vapor a la diferencia entre presión de saturación de vapor (e_s) y la presión real de vapor (e_a). (Allen et al., 2006; Jensen et al., 2016).

$$e_s = 0.611e^{\left(\frac{17.27T}{T+237.3}\right)} \quad (Ec. 6)$$

$$e_a = \frac{(e_{sTmax} 0.01HR_{min}) + (e_{sTmin} 0.01HR_{max})}{2} \quad (Ec. 7)$$

e_s : Presión de saturación de vapor (KPa)
 e_a : Presión real de vapor (KPa).
 T : Temperatura del aire diaria en 2m de altura ($^{\circ}C$)
 HR : Humedad relativa.

2.3.4. Radiación neta sobre la superficie del cultivo.

La radiación neta es la diferencia entre la radiación neta de onda corta (R_{ns}) y la radiación neta de onda larga (R_{nl}). (Allen et al., 2006).

$$R_n = \underbrace{R_s(1 - \alpha)}_{R_{ns}} - \underbrace{\sigma \frac{T_{maxK}^4 + T_{minK}^4}{2} (0.34 - 0.14\sqrt{e_a}) \left(1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35\right)}_{R_{nl}} \quad (Ec. 8)$$

R_n : Radiación neta sobre la superficie del cultivo $\left(\frac{MJ}{m^2 día}\right)$
 R_s : Radiación global solar horizontal. $\left(\frac{MJ}{m^2 día}\right)$.
 α : Albedo de la grama, 0.23.
 e_a : Tensión de vapor actual (KPa).
 R_{so} : Radiación solar en al superficie. $\left(\frac{MJ}{m^2 día}\right)$.
 R_a : Radiación extraterrestre sobre superficie horizontal.
 σ : Constante de Stefan-Boltzman $(5.67 \times 10^{-08} \frac{W}{m^2 K^4})$

La radiación solar de onda corta ha sido medida en cada estación con la ayuda de un piranómetro Vantage Pro 2 de la marca Davis Instruments, pero, si no se cuenta con esta estimación también se puede calcular por formulas descritas en (Allen et al., 2006). Además para el cálculo de Rn_s y Rn_l es necesario determinar las variables:

$$R_{so} = e^{-0.0021 \frac{P}{K_t} \sin \theta} \cdot R_a \quad (Ec. 9)$$

$$R_a = \frac{1440}{\pi} C_s d_r (\omega_s \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \sin \omega) \quad (Ec. 10)$$

$$d_r = 1 + 0.033 \cos \left(\frac{2\pi J}{365} \right) \quad (Ec. 11)$$

$$\omega_s = \text{Arcos}(-\tan \varphi \cdot \tan \delta) \quad (Ec. 12)$$

$$\delta = 0.409 \sin \left(\frac{2\pi J}{365} - 1.39 \right) \quad (Ec. 13)$$

$$J = \text{Mes} \frac{275}{9} + \text{día del mes} - k \quad (Ec. 14)$$

C_s : Constante solar 0,082 MJ/m²min = 1,96 cal/ cm² min. (Sí R_a en W/m =1367, pero la ecuación sin 1440 en lapso diario y con C_s y 12 en lapso horario).

d_r : Distancia relativa tierra-sol.

θ : Angulo del sol. (rad)

ω_s : Ángulo horario a la hora de la puesta del sol.

δ : Declinación solar. (rad)

φ : Latitud (rad)

J : Día del año, Mes (275 /9)+ día del mes – k (k= 32 en M de 30 días y agosto; 33 en M de 31 días; 30 en Febrero y 31, en Enero.

K_t : Coeficiente de turbidez, 0.5 alta turbidez, 1 cielo limpio.

2.3.5. Flujo del calor del suelo.

Según (Allen et al., 2006), para periodos diarios el flujo de calor bajo la superficie de referencia es relativamente pequeña, así que esta puede despreciarse $G=0$, sin embargo para periodos cortos de una hora o menos el valor de G debe considerarse:

$$\begin{aligned} G &= 0.1R_n \quad \text{Para periodos de luz} \\ G &= 0.5R_n \quad \text{Para periodos nocturnos.} \end{aligned} \quad (Ec. 15)$$

G : Flujo de calor del suelo.

R_n : Radiación neta.

2.4. Obtención y Procesamiento de datos satelitales.

En la presente investigación se han tomado en cuenta aquellos productos satelitales que son de acceso libre para el público, además aquellas que cumplan con los datos requeridos para

que sea posible el cálculo de la ETo. Los productos satelitales que cumplen estas condiciones son:

- LANDSAT 8
- SENTINEL 3
- ASTER
- MODIS.

El criterio de selección de las imágenes es que la presencia de nubes en la zona de estudio sea menor al 10% para así asegurar la calidad de los cálculos.

2.4.1. Datos LANDSAT 8 y ASTER.

Los datos de LANDSAT 8 se descargaron en el portal Web del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS por sus siglas en inglés: U.S. Geological Survey), este portal cuenta con registros de imágenes desde julio del 2013 para LANDSAT 8 y julio del 2000 para Áster, hasta la actualidad.(U.S. Geological Survey, s/f)

Las imágenes descargadas incluyen datos en niveles digitales ND de todas sus bandas tanto para LANDSAT 8 como para ASTER, a los cuales se les aplicó corrección geométrica, radiométrica y atmosférica.

2.4.1.1. Corrección Geométrica.

La corrección geométrica en las imágenes consiste en re proyectar el sistema de coordenadas que tienen por defecto cada imagen, así todas las imágenes estarán en un mismo espacio geográfico(Olaya, 2016; Rios, Laguado, Trujillo, & Sánchez, 2012), en esta investigación se usó el sistema de coordenadas Universal Transversal de Mercator (UTM) para la zona de estudio ubicada en WGS 1984 UTM Zona 17S. Los procesos de re proyección se realizaron con la herramienta "Project RASTER" en el software ArcGis 10.5.

2.4.1.2. Corrección Radiométrica y Atmosférica.

La corrección radiométrica y atmosférica se aplicó a cada una de las bandas usando el software QGIS 2.18.15 con la herramienta Semi Automatic Classifications Plugin, esta herramienta se basa en el método de Chávez o DOS1

2.4.2. Datos SENTINEL 3.

Los datos de SENTINEL 3 se descargaron de manera gratuita del portal Web de la Organización Europea de Satélites Meteorológicos EUMESAT. Se descargaron los datos de los instrumentos OLCI y SLSTR ya que las bandas de estos dos instrumentos contienen los datos necesarios para el cálculo de la ETo.

Las Imágenes descargadas no necesitan corrección radiométrica ni atmosférica, pero, se debe aplicar corrección geométrica, ésta se realizó con el software SNAP -este software es de código abierto y es desarrollado por la ESA- el cual permite realizar la proyección de las imágenes al sistema WGS 1984 UTM Zona 17S.

2.4.3. Datos MODIS.

Los datos MODIS usados en la presente investigación se obtuvieron del portal Web de la USGS. Se descargaron los productos MOD11 y MOD13, de los cuales se pueden obtener datos de temperatura e índices de vegetación.(Frank & Tingo, 2017).

Las Imágenes de MODIS al igual que las de Sentinel solo necesitan correcciones geométricas al tratarse de un producto ya procesado (U.S. Geological Survey, s/f). Las correcciones geométricas se realizaron en el software QGIS 2.18.15.

2.5. Estimación de la evapotranspiración a partir de imágenes satelitales.

Se generaron mapas ETo usando la ecuación (Ec. 1) de Penman-Monteith antes planteada, con la diferencia que las variables fueron capas raster introducidas en la herramienta RASTER Calculator del software ArcGIS 10.5.

Se utilizó los datos de las estaciones meteorológicas para generar mapas de radiación solar de onda corta, humedad relativa y velocidad del viento, utilizando el método de interpolación de la distancia inversa, con la herramienta IDW de ArcGIS 10.5.

Se determinaron además variables propias de los satélites como:

2.5.1. Índice de vegetación de diferencias Normalizadas NDVI.

El Índice de Diferencia de Vegetación Normalizado (NDVI, por sus siglas en inglés: *Normalized Difference Vegetation Index*), permite medir la diferencia normalizada entre las reflectancia del rojo y del infrarrojo cercano (Frank & Tingo, 2017; Rouse, Haas, Deering, Schell, & Harlan, 1974). Permitiendo así medir la vigorosidad de la vegetación. De manera general se puede estimar el NDVI con la expresión:

$$NDVI = \frac{\rho S_{NIR} - \rho S_{RED}}{\rho S_{NIR} + \rho S_{RED}} \quad (Ec. 16)$$

NDVI: Índice de diferencia de vegetación normalizada.

ρS_{NIR} : Reflectividad en el Infrarrojo cercano.

ρS_{RED} : Reflectividad en el Rojo visible.

En la siguiente tabla se identifica el infrarrojo cercano y el rojo visible para cada uno de los productos satelitales.

Tabla 9: Infrarrojo cercano y Rojo Visible.

Producto Satelital	Instrumento.	Infrarrojo cercano	Rojo Visible.
LANDSAT 8	OLI	Banda 5	Banda 4
SENTINEL 3	OLCI	Banda 17	Banda 8
ASTER	VNIR	Banda 3N	Banda 2
MODIS	-	Banda 2	Banda 1

Fuente: (EUMESAT, s/f; U.S. Geological Survey, s/f)

Elaboración: El autor.

Se generaron mapas de NDVI para los datos LANDSAT 8, SENTINEL 3 y ASTER usando la (Ec. 16) en el software ArcGis 10.5.

Para el producto satelital MODIS descargaron mapas de NDVI del portal Web de la USGS. Las imágenes descargadas provienen del producto MOD13A1, este subproducto ofrece datos de NDVI con resolución espacial de 500m y resolución temporal de 16 días (Didan, 2015). Se consideró que el intervalo de la resolución temporal de 16 días contenga la fecha de descarga seleccionada para MODIS. Se resampleó las imagen de 500m de ancho de pixel a 916m.

2.5.2. Albedo y Emisividad de superficie.

Se calculó el albedo de superficie con la ecuación propuesta por (Liang, 2000):

$$\alpha = 0.356\rho_{S_{B2}} + 0.130\rho_{S_{B4}} + 0.373\rho_{S_{B5}} + 0.085\rho_{S_{B6}} + 0.072\rho_{S_{B7}} - 0.0018. \quad (Ec. 17)$$

α : Albedo de la superficie.

$\rho_{S_{B2}}$: Reflectividad de la banda 2 (Azul)

$\rho_{S_{B4}}$: Reflectividad de la banda 4 (Rojo)

$\rho_{S_{B5}}$: Reflectividad de la banda 5 (Infrarrojo Cercano NIR)

$\rho_{S_{B6}}$: Reflectividad de la banda 6 (Onda corta Infrarroja SWIR1)

$\rho_{S_{B7}}$: Reflectividad de la banda 7 (Onda corta Infrarroja SWIR2)

Se generó un mapa de albedo usando la ecuación (Ec. 17), este mapa se hizo con los datos de LANDSAT 8, en el software ArcGis. La imagen usada para calcular el albedo corresponde al día 20 de septiembre del 2017, se escogió esta fecha debido a que la escena presentaba 0% de nubosidad en la zona de estudio. El mapa de albedo de LANDSAT 8 se resampleó para poder ser usado por los otros productos satelitales, se pudo hacer esto debido a que las imágenes de LANDSAT 8, SENTINEL 3 y ASTER son capturadas entre las 15h00 y 16h00. El ángulo de incidencia de la radiación en estos tres no varía significativamente.

En el caso de MODIS las imágenes se capturan entre las 09h00 y 10h00, se buscó la manera de descargar mapas de albedo del subproducto MCD 43A1 disponible en el portal de la USGS,

pero para las fechas en análisis no existen datos en la zona de estudio, por este motivo, se resampearon también para MODIS los mapas de albedo de LANDSAT 8.

Los mapas de emisividad se generaron usando la ecuación de (Valor & Caselles, 1996), además se usó la ecuación de (Carlson & Ripley, 1997) para el cálculo de la proporción de la vegetación (PV).

$$\varepsilon = \varepsilon_V PV + \varepsilon_{SU}(1 - PV). \quad (Ec. 18)$$

$$PV = \left(\frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right)^2 \quad (Ec. 19)$$

ε : Emisividad de superficie.

ε_V : Emisividad de la vegetación. 0.985

ε_{SU} : Emisividad del suelo. 0.960

PV: Proporción de la vegetación.

$NDVI_{max-min}$: Índice de vegetación de diferencias normalizadas máximas y mínimas.

2.5.3. Temperatura Superficial de terreno T_s .

Se generó mapas de temperatura de brillo para los datos LANDSAT 8 y ASTER, usando el complemento Semi Automatic Classifications Plugin del software QGIS, seguidamente se calculó mapas de temperatura superficial en el software ArcGis, usando la ecuación propuesta por (Artis & Carnahan, 1982)

$$T_s = \frac{Tb}{1 + \left(\frac{\lambda * Tb}{\rho} \right) * Ln(\varepsilon)} \quad (Ec. 20)$$

$$\rho = \frac{h * c}{\sigma} * 10^6 \quad (Ec. 21)$$

T_s : Temperatura superficial. (K)

Tb : Temperatura de brillo (K).

λ : Longitud de onda efectiva de la banda térmica. (μm)

ε : Emisividad.

h : Contante de Planck. 6.626×10^{-34} Js

c : Velocidad de la luz 2.998×10^8 m/s

σ : Constante de Stefan Boltzman 1.38×10^{-23} J/K

Los mapas de temperatura de SENTINEL 3 se descargaron del portal web de la EUMESAT, estos mapas están disponibles en grados Kelvin, los mismos son proporcionados por el instrumento SLSTR, se tomó para los cálculos la temperatura de la banda 9.

En el caso de MODIS, los mapas de temperatura obtuvieron del subproducto MOD11 A1, estos datos se descargaron del portal Web de la USGS.

2.5.4. Temperatura del aire T_a .

Basándose en los buenos resultados obtenidos por Ninyerola, Pons, & Roure, (2000) se calcularon los mapas de temperatura del aire (T_a) generando ecuaciones obtenidas mediante regresión múltiple para cada imagen satelital, , tomando como variables independientes T_s y la altura al nivel del mar (z) y T_a como variable dependiente. Los valores de T_s se obtuvieron de los mapas satelitales y las alturas se adquirieron a partir de un Modelo de Elevación Digital (DEM) obtenido de ASTER GDEM, por otro lado, los valores de T_a se tomaron de las estaciones meteorológicas.

2.5.5. Radiación neta diaria.

Al combinar datos de satélites y datos meteorológicos se puede estimar la radiación neta R_n (Carmona, 2014). Sin embargo estos mapas corresponden al instante en el que se hace la captura de la imagen R_{ni} . Se generaron mapas de radiación neta instantánea con la ecuación de (Bastiaanssen, 1995).

$$R_{ni} = (R_{s\downarrow}(1 - \alpha) + \varepsilon R_{l\downarrow} - \varepsilon \sigma T_s^4) \quad (Ec. 22)$$

R_{ni} : Radiación neta instantánea en la superficie. $\left(\frac{W}{m^2}\right)$

$R_{s\downarrow}$: Radiación solar entrante de onda corta $\left(\frac{W}{m^2}\right)$

α : Albedo.

ε : Emisividad.

T_s : Temperatura superficial. (K)

σ : Constante de Stefan-Boltzman $(5.67 \times 10^{-08} \frac{W}{m^2 K^4})$

Para determinar los mapas de radiación neta diaria R_{nd} se usó la ecuación de (Sobrino, Gómez, Jiménez-Muñoz, & Oliso, 2007) donde se multiplica la radiación neta instantánea por un coeficiente C_d . La ecuación de sobrino considera el albedo y la emisividad propias de la superficie.

$$R_{nd} = C_d R_{ni}. \quad (Ec. 23)$$

$$C_d = \frac{(1 - \alpha)Rs_{\downarrow d} + \varepsilon(Rl_{\downarrow d} - \sigma T_{sd}^4)}{(1 - \alpha)Rs_{\downarrow i} + \varepsilon(Rl_{\downarrow i} - \sigma T_{si}^4)} \quad (Ec. 24)$$

$Rs_{\downarrow d}$: Radiación solar entrante diaria e instantánea de onda corta $\left(\frac{W}{m^2}\right)$

$Rl_{\downarrow}$: Radiación de onda larga descendente diaria e instantánea. $\left(\frac{W}{m^2}\right)$

Tsd : Temperatura superficial diaria e instantánea. (K)

Carmona, (2014) en su investigación se basó en la ecuación de (Sobrino et al., 2007), donde determinó que los valores de albedo y emisividad de una superficie de referencia con: $\alpha_{ref} = 0.17$ y $\varepsilon_{ref} = 0.97$, resultaron como la mejor combinación para determinar C_d independientemente de la ubicación geográfica y el instante de captura de las imágenes satelitales.

$$C_d = \frac{0.83Rs_{\downarrow d} + 0.97(Rl_{\downarrow d} - \sigma T_{sd}^4)}{0.83Rs_{\downarrow i} + 0.97(Rl_{\downarrow i} - \sigma T_{si}^4)} \quad (Ec. 25)$$

Se generó mapas de radiación solar $Rs_{\downarrow d}$ con los datos de las estaciones meteorológicas, con el método de interpolación de la distancia inversa, usando el software ArcGis.

Los mapas de radiación de onda larga descendente $Rl_{\downarrow d}$, se generaron usando la ecuación de (Brutsaert, 1975).

$$Rl_{\downarrow} = c_o \left(\frac{e_a}{T_s}\right)^m \sigma T_s^4 \quad (Ec. 26)$$

$$e_a = 6.108 e^{\left(17.27 \frac{(T_s - 273.15)}{(T_s - 35.85)}\right)} \left(\frac{HR}{100}\right) \quad (Ec. 27)$$

$Rl_{\downarrow}$: Radiación de onda larga descendente. $\left(\frac{W}{m^2}\right)$

c_o : 1.24

m : 1/7

σ : Constante de Stefan-Boltzman $(5.67 \times 10^{-08} \frac{W}{m^2 K^4})$

T_s : Temperatura superficial. (K)

e_a : Presión real de vapor (hPa).

El valor de C_d se considera invariante de la superficie y puede aplicarse el mismo valor a toda una región de estudio, en esta investigación se calculó el valor de C_d con la ecuación de (Sobrino et al., 2007) y la ecuación de (Carmona, 2014), para luego generar mapas de

radiación neta diaria (R_{nd}) y calcular el coeficiente de determinación R^2 relacionando los resultados calculados con datos meteorológicos y los resultados calculados mediante satélites, para así, determinar el mejor método.

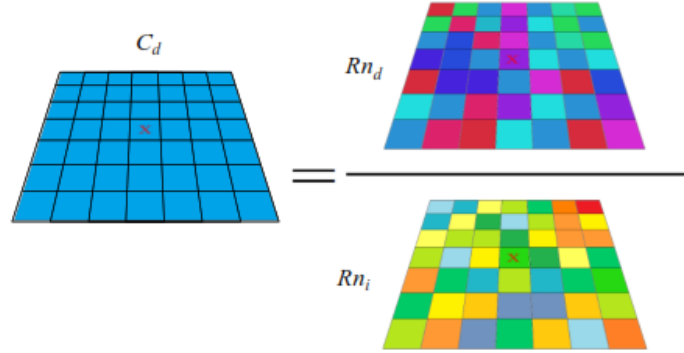


Figura 9: Representación de la invariancia del coeficiente C_d
Fuente: (Carmona, 2014)
Elaboración: (Carmona, 2014)

2.5.6. Flujo de calor de suelo.

Para determinar los mapas de Flujo de calor de suelo se usó la ecuación de (Bastiaanssen, 2000), esta ecuación se basa en la radiación neta diaria, temperatura superficial, albedo y el NDVI (Tasumi, Trezza, Allen, & Wright, 2008).

$$G = \left(\frac{(T_s - 273.15)}{\alpha} (0.0038\alpha + 0.0074\alpha^2)(1 - 0.98NDVI^4) \right) R_{nd} \quad (Ec. 28)$$

2.6. Criterio de calificación y validación de resultados.

Para calificar un producto satelital se tomará dos criterios relevantes: La disponibilidad de datos y la precisión de los cálculos.

La disponibilidad tiene que ver con la resolución temporal de cada sensor y la disposición de las imágenes en la zona de estudio.

Para la precisión de los cálculos se calificará con el coeficiente de determinación (R^2)

Como indica Gea & Batanero, (2014) el coeficiente de correlación o de determinación, mide la bondad del ajuste de dos variables (X,Y), además mide la variabilidad entre estas.

Los resultados se validaron mediante regresión lineal, obteniendo el coeficiente de determinación (R^2), comparando los datos de ET_o calculados usando datos de las estaciones meteorológicas (variable X) y los datos de ET_o calculados con datos satelitales (variable Y).

CAPÍTULO III:
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

3.1. Obtención de Imágenes Satelitales.

Tomando en cuenta el criterio de selección, las imágenes satelitales disponibles se descargaron para las siguientes fechas:

Tabla 10: Fechas de disponibilidad de Imágenes Satelitales.

Fechas	Producto Satelital.
07/01/2017	LANDSAT 8
17/01/2017	MODIS
13/02/2017	MODIS
29/03/2017	MODIS
07/05/2017	SENTINEL 3 y ASTER
24/06/2017	SENTINEL 3 y ASTER
14/07/2017	SENTINEL 3 y MODIS
14/08/2017	MODIS
19/08/2017	LANDSAT 8
19/09/2017	MODIS
20/09/2017	LANDSAT 8 y SENTINEL 3

Fuente: El Autor.

Elaboración: El Autor.

Las Imágenes LANDSAT 8 y ASTER tienen una resolución temporal de 16 días, por lo tanto, solo es posible descargar dos imágenes por mes y en algunos casos solo una, además, la presencia de nubes en la zona de estudio en la mayoría de las imágenes el año 2017 supera en 70% por lo que solo se ha podido obtener tres imágenes LANDSAT 8 y dos de ASTER.

El sensor MODIS promete imágenes diarias, sin embargo, al descargarlas del sitio Web estas contiene pixeles vacíos en grandes extensiones, por lo que disponibilidad de imágenes en la zona de estudio se limita a 5 o 10 imágenes aprovechables por mes.

En el caso de SENTINEL 3 las imágenes se encuentran disponibles con resolución temporal de 1 o 2 días y cada una de las imágenes se puede aprovechar para el análisis, ya que cada pixel en la zona de estudio contiene valores propios.

3.2. Evapotranspiración con datos meteorológicos.

Con datos meteorológicos y usando la ((Ec. 1)) de Penman-Monteith, se obtuvo el valor de la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o) para cada una de las estaciones, en las fechas establecidas en la Tabla 10

Tabla 11: Cálculos de evapotranspiración ETo para la estación de Jipiro.

Fecha	Radiación solar de onda corta. Rs (MJ/m2día)	Radiación neta en la superficie. Rn (MJ/m2día.)	Flujo de calor del suelo G(MJ/m2día)	Evapotranspiración de referencia ETo(mm/día)
07/01/2017	12.209	9.865	0.987	2.615
17/01/2017	24.362	17.607	1.761	4.322
13/02/2017	24.523	17.790	1.779	4.267
29/03/2017	20.638	15.312	1.531	3.753
07/05/2017	17.067	12.543	1.254	3.156
24/06/2017	18.853	13.057	1.306	3.853
14/07/2017	19.782	13.556	1.356	3.834
14/08/2017	21.078	14.835	1.484	4.234
18/08/2017	12.163	9.598	0.960	2.516
19/08/2017	19.833	14.354	1.435	3.644
19/09/2017	20.444	14.789	1.479	4.636
20/09/2017	24.688	17.301	1.730	5.229

Fuente: El Autor.

Elaboración: El Autor.

Los valores de albedo y emisividad para el cálculo de ETo con el método el Penman-Monteith se pueden obtener a partir de tablas propuestas por el método, pero, al tratarse de varias estaciones con diferentes superficies, estos valores se extrajeron de la imagen correspondiente al día 20 de septiembre del 2017.

3.3. Evapotranspiración con datos satelitales.

3.3.1. Mapas de Temperatura Superficial del Terreno.

La metodología propuesta nos permitió generar mapas de Ts para LANSAT 8 y ASTER. Se utilizó el software QGIS para determinar la temperatura de brillo aparente y luego usando las ecuaciones: (Ec. 20) y (Ec. 21) de Artis & Carnahan, (1982) para determinar Ts.

La temperatura superficial SENTINEL 3 y MODIS se obtuvieron directamente de la Web EUMESAT y USGS, respectivamente.

Los datos satelitales MODIS tiene resolución temporal de 1 día, sin embargo en la zona de estudio muchas de las imágenes tenían pixeles vacíos o nulos. En el caso de los productos SENTINEL 3 se encuentra disponible las imágenes cada 2 días, pero la resolución espacial del sensor SLSTR es de 1154m, esto difiere de su resolución teórica de 1000m.

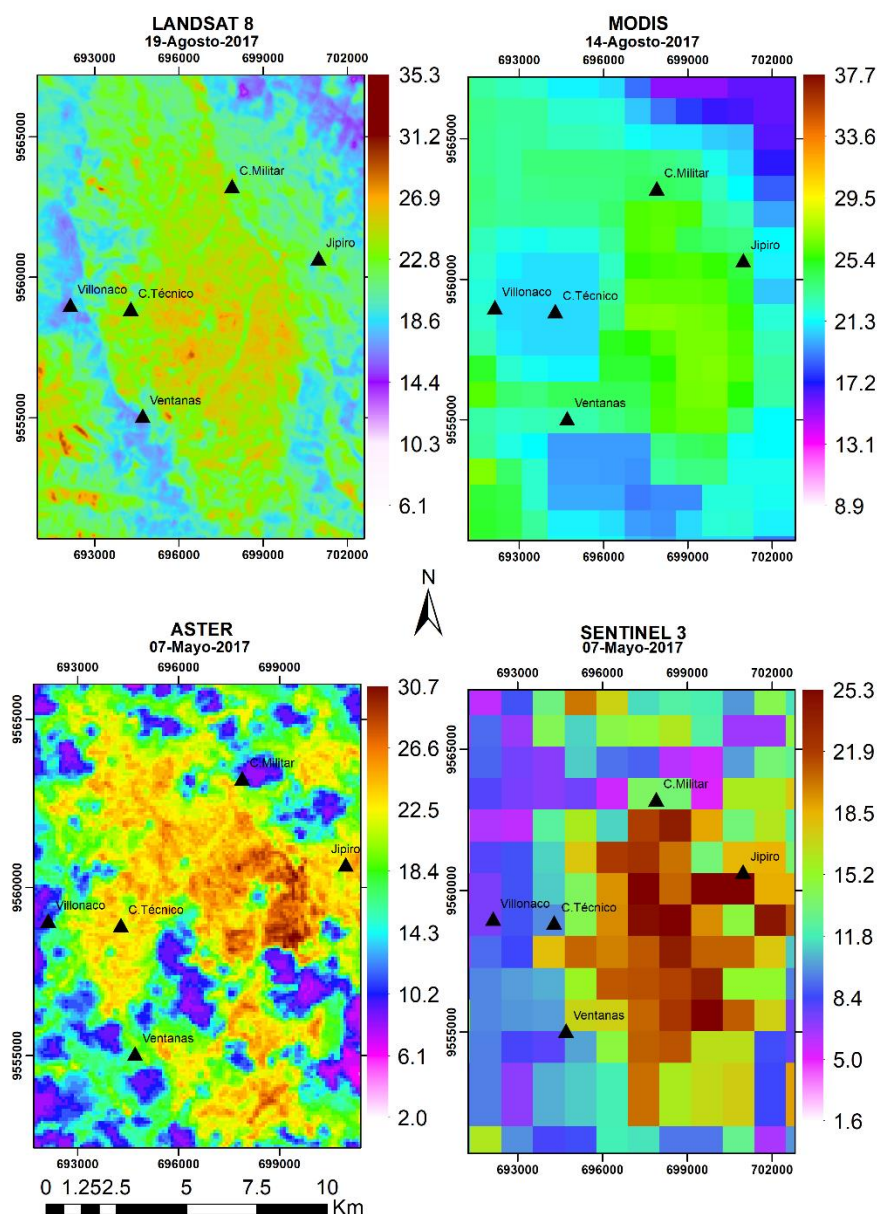


Figura 10: Mapas de Ts (°C), para los diferentes productos satelitales.
Fuente: El Autor.
Elaboración: El Autor.

En la Figura 10 se compara los cuatro productos satelitales con mapas de Ts, tomando en cuenta la misma fecha o una fecha cercana, aquí se puede apreciar que la temperatura entre LANDSAT 8 y MODIS es similar, también se nota la diferencia de resolución espacial, obviamente LANDSAT 8 al tener mayor resolución obtiene datos más precisos de Ts. La misma conclusión se puede asumir para la comparación entre ASTER y SENTINEL 3.

La temperatura del aire máxima medida por las estaciones meteorológicas es de 28°C, la Ts de los mapas generados supera los 29°C en ciertos pixeles, por esto, es necesario aplicar el método propuesto para determinar mapas de Ta realísticos.

3.3.2. Mapas de Temperatura del aire.

Siguiendo la metodología propuesta se obtuvieron las ecuaciones para determinar los mapas de Ta en función de la Ts y la altura sobre el nivel del mar (z), las ecuaciones para cada imagen se encuentran en el Anexo 1.

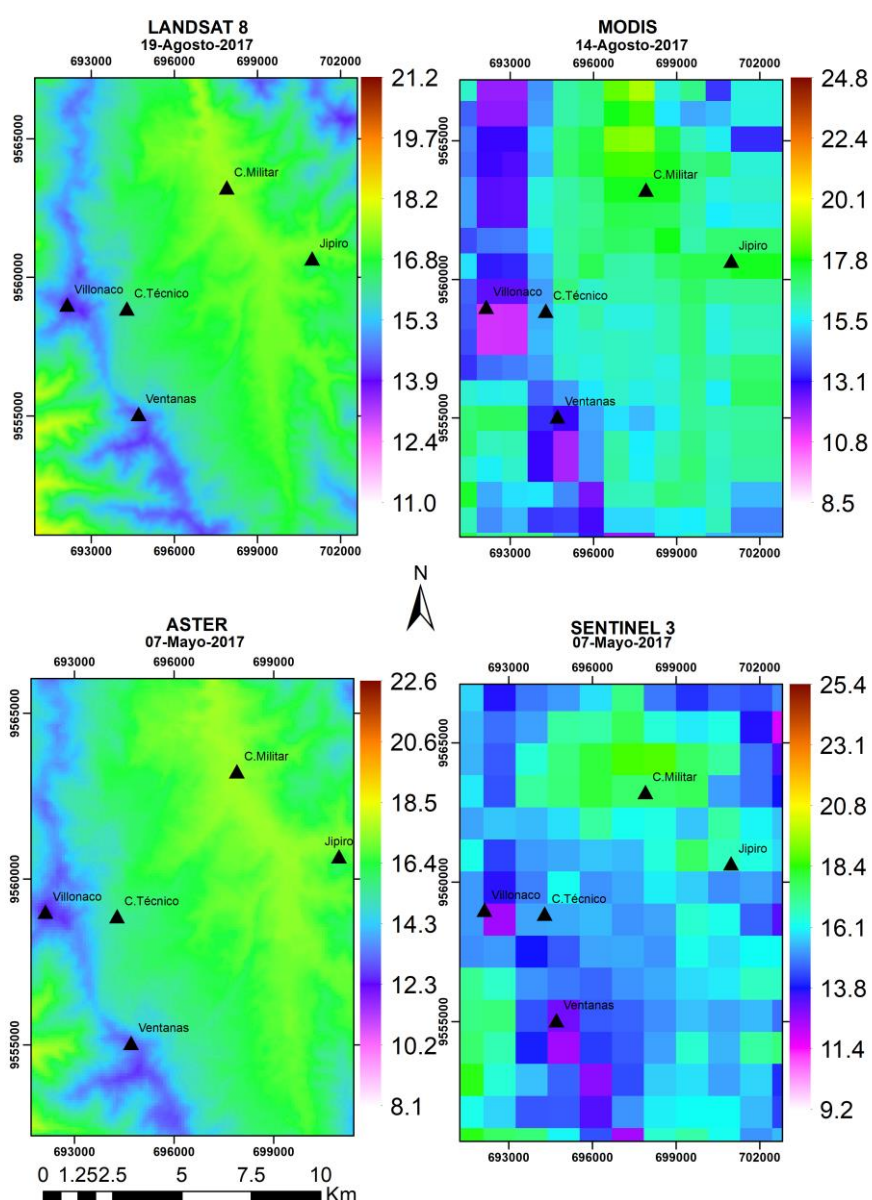


Figura 11: Mapas de Ta (°C), para los diferentes productos satelitales.
Fuente: El Autor.
Elaboración: El Autor.

En la Figura 11 se puede evidenciar que el comportamiento de la temperatura del aire mejora al usar la metodología propuesta, al correlacionar la T_a estimada y la medida en campo se obtiene un coeficiente de determinación ($R^2 = 0.962$). Se puede apreciar que estas se asemejan a las medidas en las estaciones meteorológicas y no sobrepasan los 19 °C. Las temperaturas bajas se presentan en las zonas altas de los cerros Ventanas y Villonaco, mientras que las más altas se encuentran en el centro de la hoya hidrográfica o partes bajas de la zona de estudio.

3.3.3. Mapas de Radiación neta diaria.

Se generó mapas de R_{nd} usando las ecuaciones (Ec. 22) y (Ec. 23). Para el cálculo de C_d se usaron por separado la ecuación (Ec. 24) de Sobrino et al., (2007) y la (Ec. 25) de Carmona, (2014) para así comparar el mejor método.

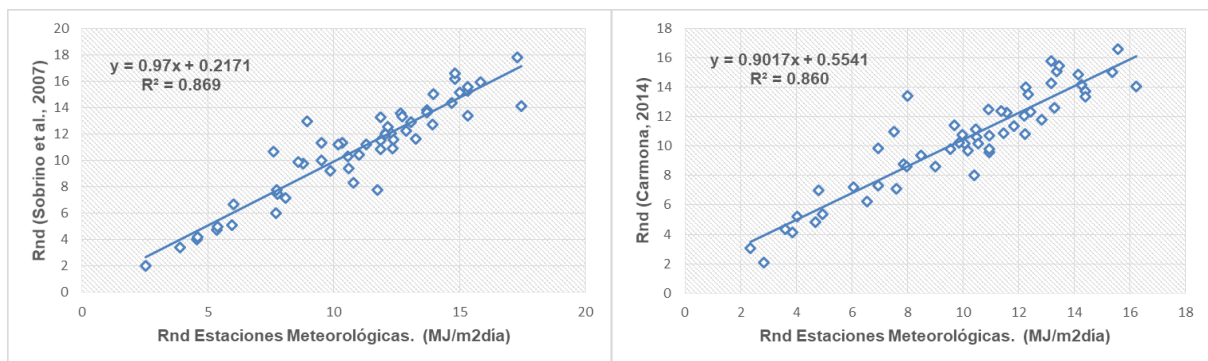


Figura 12: Comparación de los métodos (Sobrino et al., 2007) y (Carmona, 2014).

Fuente: El Autor.

Elaboración: El Autor.

Para obtener el coeficiente de determinación se relacionaron los datos calculados con las estaciones meteorológicas y los datos de los mapas generados por cada uno de los métodos. Para los el cálculo de la R_{nd} con datos meteorológicos se usó la (Ec. 22) y (Ec. 26)

El coeficiente de determinación ($R^2 = 0.867$) del método de Sobrino et al., (2007) es mejor que el de Carmona, (2014) ($R^2 = 0.860$), esto se debe a que el método Sobrino toma los valores de albedo y emisividad propios del terreno, por otro lado, el método de Carmona toma valores específicos de α y ϵ de una superficie de referencia. Aunque la diferencia no es significativa. Para esta investigación se usó el método de Sobrino et al., (2007) para generar los mapas de R_{nd} definitivos.

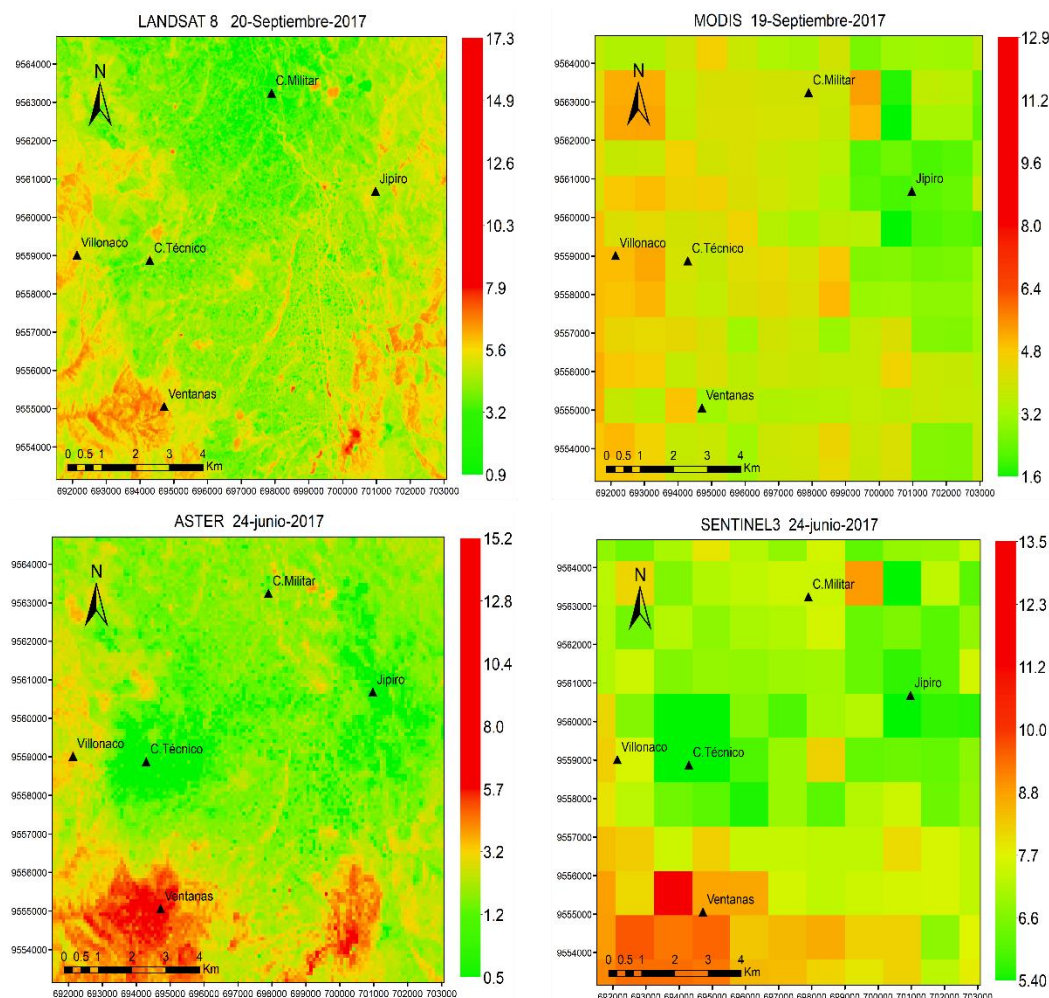


Figura 13: Mapas de $R_n \left(\frac{MJ}{m^2 \text{ día}} \right)$ diaria para los diferentes productos satelitales.

Fuente: El Autor.

Elaboración: El Autor.

La Figura 13 muestra los mapas de R_n , en estos se puede notar que los valores altos de radiación se dan en los cerros Ventanas y Villonaco, como la radiación es un factor determinante en la evaporación, por lo tanto, se espera que los valores altos de ETo se den en aquí.

3.3.4. Mapas de Evapotranspiración del cultivo de referencia.

En el software ArcGIS se generó mapas, con las diferentes variables calculadas con las ecuaciones: (Ec. 2), (Ec. 3), (Ec. 6), (Ec. 7), (Ec. 23) y (Ec. 28), seguidamente se generaron mapas de ETo con la ecuación (Ec. 1) de Penman-Monteith. La velocidad del viento, humedad relativa, y la radiación solar de onda corta R_a son variables medidas en las estaciones meteorológicas, por lo tanto, con estos valores se creó mapas en ArcGIS usando el método de interpolación de la distancia inversa IDW.

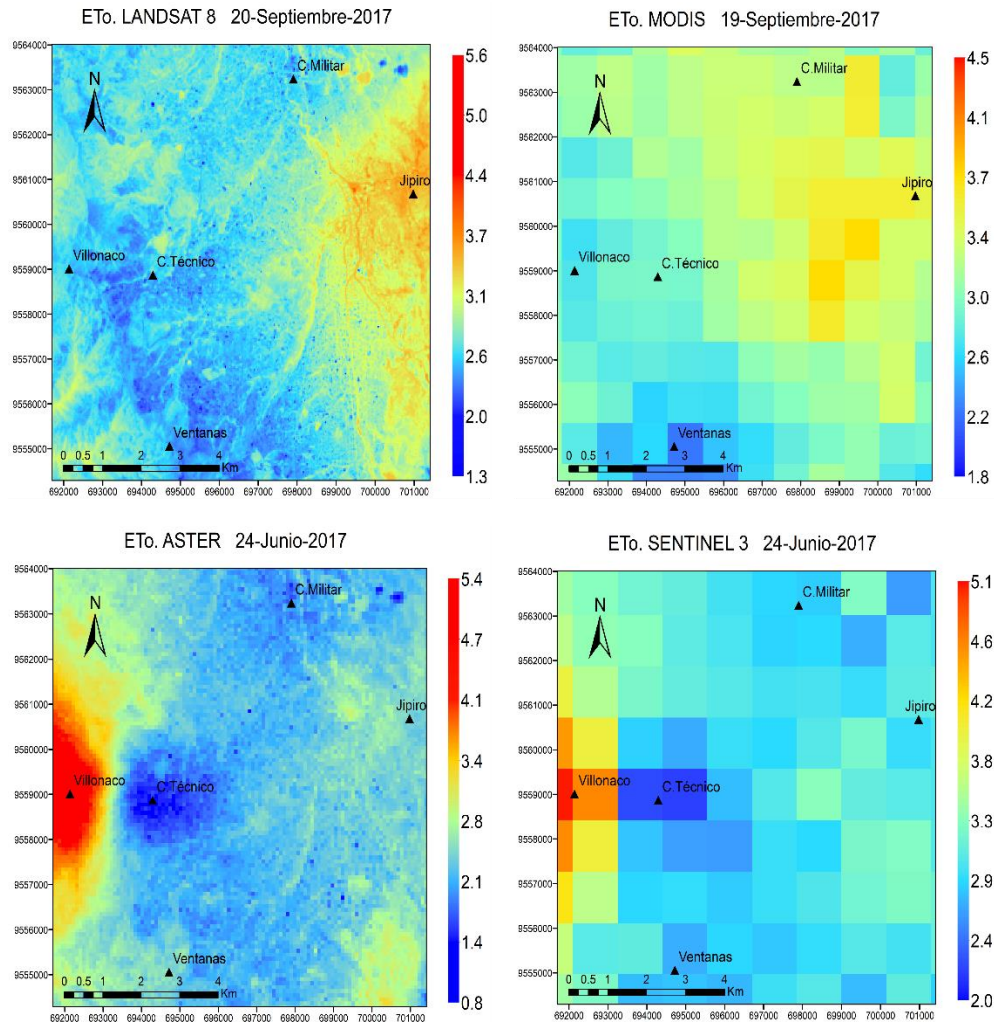


Figura 14: Mapas de ETo (mm/día) para los diferentes productos satelitales.
Fuente: El Autor.
Elaboración: El Autor.

Los mapas de Eto mostrados en la Figura 14 pertenecen a fechas similares para Landsat y Modis y la misma fecha para Sentinel y Aster. Se puede observar que el comportamiento de la ETo es similar en los dos casos. La Eto varía desde 0.8 mm/día hasta 5.6 mm/día. Los mapas de ETo para cada una de las fechas propuestas se encuentran en el Anexo 2.

Como se había descrito antes, la velocidad del viento es un factor determinante que causa la ETo (Jensen et al., 2016). Para el día 24 de Junio la ETo es máxima en la zona del Villonaco, esto se debe a que en este día se registró una velocidad promedio de $9.35 \frac{m}{s}$.

3.4. Validación de resultados.

Con los mapas de Eto se identificó el valor del pixel en la ubicación de cada una de las estaciones y se relacionó con la Eto calculada con datos meteorológicos, para así determinar el coeficiente de determinación para cada uno de los productos satelitales.

Tabla 12: Datos de ETo con datos meteorológicos y Datos satelitales LANDSAT 8.

ETo para Datos Satelitales LANDSAT 8			
Estaciones.	Fechas de Imágenes	ETo Datos Meteorológicos. (mm/día)	ETo Datos Satelitales. (mm/día)
Colegio Militar	07/01/2017	2.80	2.56
	19/08/2017	2.61	2.33
	20/09/2017	3.84	3.46
Jipiro	07/01/2017	1.52	1.67
	19/08/2017	2.90	2.80
	20/09/2017	4.70	4.61
Colegio Técnico	07/01/2017	2.00	2.20
	19/08/2017	3.07	2.63
	20/09/2017	4.09	3.52
Ventanas	07/01/2017	0.90	1.00
	19/08/2017	3.31	3.32
	20/09/2017	3.59	3.49
Villonaco	07/01/2017	5.94	5.99
	19/08/2017	3.07	3.08
	20/09/2017	-	3.57

Fuente: El Autor.

Elaboración: El Autor.

La Tabla 12 muestra los valores de la ETo para el producto satelital LANDSAT 8. Las tablas de los resultados para todos los productos satelitales se encuentran en el Anexo 3.

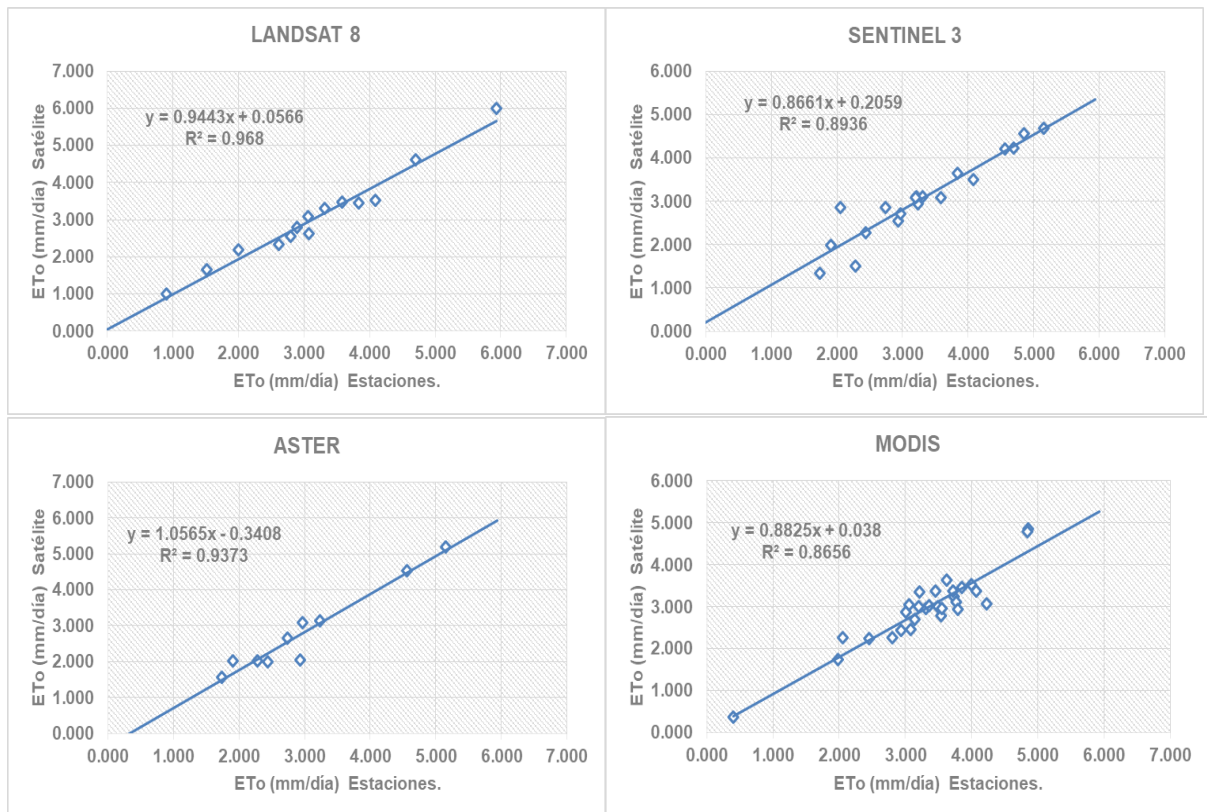


Figura 15: Coeficiente de determinación para los diferentes productos satelitales.

Fuente: El Autor.

Elaboración: El Autor.

En la Figura 15 se puede evidenciar el coeficiente de determinación para cada uno de los productos satelitales. LANDSAT 8 se posiciona como el más preciso con un $R^2 = 0.968$. Como era de esperarse ASTER tiene menor resolución espacial de LANDSAT 8, por lo tanto se ubica segundo con un $R^2 = 0.937$. SENTINEL 3 y MODIS tienen resultados parecidos con coeficientes de determinación de 0.894 y 0.866 respectivamente.

Podemos notar que los productos satelitales con mayor resolución espacial tienen más precisión, esto se explica entre LANDSAT 8 y ASTER que tienen mejor resolución espacial 30m y 90 respectivamente.

La resolución espacial de MODIS es de 916m y la de SENTINEL 3 es de 1154m, a simple vista parece que no se cumple lo antes mencionado, pero, hay que tomar en cuenta que para SENTINEL 3 solo los mapas de Ts tienen resolución espacial de 1154m y los mapas de albedo, emisividad y NDVI tienen resolución de 300m, además, SENTINEL 3 toma ciertos valores de SENTINEL 2 (que tiene resolución espacial de 10m a 60m) para mejorar su estimación de la Ts.

CONCLUSIONES.

Se calculó la tasa de ETo con la fórmula de Penman-Monteith, utilizando datos meteorológicos de la red de estaciones de la UTPL, además, se generó satisfactoriamente mapas de ETo utilizando datos meteorológicos e imágenes satelitales LANDSAT 8, ASTER, SENTINEL 3 y MODIS.

Se generó mapas de temperatura del aire con ecuaciones obtenidas a partir de regresión múltiple, estos mapas de T_a tienen mejor correlación con la temperatura real medida por las estaciones, esto puede demostrarse con el coeficiente de determinación $R^2 = 0.962$.

Los mapas de Rn_d se obtuvieron al corregir la Rn_{di} con el cociente Cd. Para el cálculo del cociente Cd se determinó que el método de Sobrino obtiene un mejor coeficiente de determinación $R^2 = 0.869$, en comparación con el método de Carmona que tiene un $R^2 = 0.860$, según Carmona estos coeficientes de determinación son aceptables para el cálculo de la ETo.

Basándose en el criterio de precisión, esta investigación demuestra que el producto satelital LANDSAT 8 obtiene valores de ETo más precisos, comprobable con el coeficiente de determinación $R^2 = 0.968$. Seguidamente el producto ASTER tiene un valor $R^2 = 0.937$. SENTINEL 3 le sigue en tercer lugar con un valor de $R^2 = 0.894$. Por ultimo con un valor $R^2 = 0.866$ se encuentra MODIS.

Tomando en cuenta la interpretación de Murillas & Londoño, (2014) se concluye que los coeficientes de determinación de los cuatro productos satelitales son bastante aceptables para el cálculo regional de la ETo.

Los resultados demuestran que la precisión de los cálculos es proporcional a la resolución espacial, esto debido a que a mayor resolución espacial hay mayor información de la superficie en estudio.

Tomando como criterio la disponibilidad de los datos en la zona de estudio, el producto satelital SENTINEL 3 obtienen los mejores resultados al obtener un total de quince imágenes por mes, esto debido a su alta resolución temporal, además este producto cuenta con imágenes reprocesadas por lo que cada una de sus imágenes son aprovechables para realizar cálculos de ETo.

En los proyectos de ingeniería es mejor contar con datos de ETo diarios para poder realizar análisis precisos, por lo tanto la resolución temporal y la disponibilidad de datos en la zona de estudio es tan importante como la precisión, tomando en cuenta que el producto satelital SENTINEL 3 dispone de imágenes cada dos días en la zona de estudio y que la precisión es considerada buena, finalmente se concluye que este producto satelital es el más idóneo para el cálculo regional de la ETo.

RECOMENDACIONES.

Se recomienda como futura línea de investigación realizar cálculos de evapotranspiración real E_{Tr} , de manera netamente remota, usando el modelo SEBAL o METRIC, para después comparar la precisión con datos meteorológicos.

Una posible debilidad de este estudio es que no se pudo realizar validación cruzada, debido a la gran variabilidad de los datos meteorológicos entre las estaciones, por lo tanto se recomienda realizar una investigación similar en otra zona de estudio, donde los datos meteorológicos no varíen demasiado, facilitando así la validación cruzada y tener un valor de correlación más fidedigno.

Al trabajar con imágenes SENTINEL 3 se recomienda hacer las correcciones geométricas en el software SNAP de la Agencia Espacial Europea, ya que los formatos de descarga de estas imágenes no son reconocidos fácilmente por otros programas.

BIBLIOGRAFÍA.

- Agencia Espacial Europea. (2018). Presentamos Sentinel-3. Recuperado el 17 de julio de 2018, de http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-3/Introducing_Sentinel-3
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements*. FAO. Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2010.12.001>
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo : guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Recuperado de <https://bit.ly/2OBGZSc>
- Artis, D. A., & Carnahan, W. H. (1982). Survey of emissivity variability in thermography of urban areas. *Remote Sensing of Environment*, 12(4), 313–329. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(82\)90043-8](https://doi.org/10.1016/0034-4257(82)90043-8)
- Barsi, J. A., Lee, K., Kvaran, G., Markham, B. L., & Pedelty, J. A. (2014). The Spectral Response of the Landsat-8 Operational Land Imager. *Remote Sensing*, 10232–10251. <https://doi.org/10.3390/rs61010232>
- Bastiaanssen, W. G. . (2000). SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. *Journal of Hydrology*, 229(1–2), 87–100. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(99\)00202-4](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(99)00202-4)
- Bastiaanssen, W. G. M. (1995). *Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain : a remote sensing approach under clear skies in Mediterranean climates*. [publisher not identified]. Recuperado de <https://library.wur.nl/WebQuery/wda/918192>
- Bejar, M. V. (2004). *Hidrología*. (T. de C. Rica., Ed.). Cartago.
- Brizuela, A. B., Aguirre, C. A., & Velasco, I. (2007). Aplicación de métodos de corrección atmosférica de datos Landsat 5 para análisis multitemporal. *TELEDETECCIÓN*. <https://doi.org/ISBN: 978-987-543-126-3>
- Brutsaert, W. (1975). On a derivable formula for long-wave radiation from clear skies. *Water Resources Research*, 11(5), 742–744. <https://doi.org/10.1029/WR011i005p00742>
- Carlson, T. N., & Ripley, D. A. (1997). On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote Sensing of Environment*, 62(3), 241–252. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(97\)00104-1](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(97)00104-1)

- Carmona, F. (2014). *Desarrollo de un modelo general para la estimación de la radiación neta con imágenes de satélite*. Universidad de Valencia. Recuperado de <http://roderic.uv.es/handle/10550/33515>
- Carrasco, M., Ortega, S., Morales, L., Lagos, O., & Bennewitz, E. (2013). Estimación de la evapotranspiración real (ETa) para viñedos de variedades tintas, regados por goteo, mediante el uso de imágenes de satélite y datos meteorológicos. *ResearchGate*, (January 2014).
- Chavez, P. S. (1988). An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. *Remote Sensing of Environment*, 24(3), 459–479. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90019-3](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90019-3)
- Chow, V. Te. (1994). *Hidrología Aplicada*. Santa Fé de Bogotá.
- Chuvieco, E. (1995). *Fundamentos de Teledetección Espacial*. (Segunda Ed). Madrid.
- Didan, K. (2015). MOD13A1 MODIS / Terra Índices de vegetación 16 días L3 Global 500m SIN Grid V006. Recuperado el 22 de julio de 2018, de <https://lpdaac.usgs.gov/node/838>
- Donlon, C., Berruti, B., Buongiorno, A., Ferreira, M.-H., Féménias, P., Frerick, J., ... Sciarra, R. (2012). The Global Monitoring for Environment and Security (GMES) Sentinel-3 mission. *Remote Sensing of Environment*, 120, 37–57. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.07.024>
- EUMESAT. (s/f). Monitoring Weather and Climate from Space. Recuperado el 17 de julio de 2018, de <https://www.eumetsat.int/website/home/index.html>
- Frank, B., & Tingo, M. (2017). *Teledetección Espacial*. Huánuco. Recuperado de https://issuu.com/ninoobravomorales/docs/libro_teledeteccion_espacial_2017
- Gea, M. M., & Batanero, C. (2014). El sentido de la correlación y regresión El sentido de la correlación y regresión, (January). Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/282278998_El_sentido_de_la_correlacion_y_regresion
- Gilmore, S., Saleem, A., & Dewan, A. (2015). *Effectiveness of DOS (Dark-Object Subtraction) method and water index techniques to map wetlands in a rapidly urbanising megacity with Landsat 8 data*. Recuperado de <http://ceur-ws.org>
- Guevara D., J. (2006). La fórmula de Penman-Monteith FAO 1998 para determinar la evapotranspiración de referencia, ETo. *Terra Nueva Etapa*, XXII(31), 31–72. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=72103103>

- INAMHI. (2017). 2011. *Anuario Meteorológico* (Vol. 51). Recuperado de <http://www.serviciometeorologico.gob.ec>
- Instituto Geográfico Militar - Ecuador. (s/f). Instituto Geográfico Militar - Ecuador. Recuperado el 18 de julio de 2018, de <http://www.igm.gob.ec/index.php/en/>
- Jensen, M. E., Burmann, R. D., & Allen, R. G. (2016). *Evaporation and irrigation water requirements. ASCE manual and reports on engineering practice* (Vol. No. 70). Virginia.
- Jiménez Muñoz, J. C., & Carlos, J. (2005). Estimación de la temperatura y la emisividad de la superficie terrestre a partir de datos suministrados por sensores de alta resolución. Recuperado de <http://roderic.uv.es/handle/10550/14923>
- Labrador, M., Évora, J. A., & Arbelo, M. (2012). *Satélites de teledetección para la gestión del territorio*. (P. y A. del G. de C. Consejería de Agricultura, Ganadería, Ed.). Canarias. Recuperado de http://media.wix.com/ugd/1c299f_61722d445ea4b03dd776be74bb6f1513.pdf
- Liang, S. (2000). Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I Algorithms. *Remote Sensing of Environment*. Recuperado de www.elsevier.com/locate/rse
- Martínez, J., & Díaz, A. (2005). *Fundamentos de Teledetección Espacial. Comisión Nacional del Agua*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Murillas, A., & Londoño, E. A. (2014). *Estimación de la evapotranspiración en cultivos de arroz con sensores remotos*. Universidad del Valle. Recuperado de <http://bibliotecadigital.univalle.edu.co/bitstream/10893/7894/1/CB-0510997.pdf>
- NASA LP DAAC, U. (2014). MODIS | LP DAAC :: Productos y servicios de datos terrestres de la NASA. Recuperado el 14 de agosto de 2018, de https://lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/modis
- NASA LP DAAC, U. (2015). *ASTER Level 1 Precision Terrain Corrected Registered At-Sensor Radiance (AST_L1T)*. USGS EROS Data Centre. <https://doi.org/10.3133/OFR20151171>
- Ninyerola, M., Pons, X., & Roure, J. M. (2000). A methodological approach of climatological modelling of air temperature and precipitation, 1841, 1823–1841.
- Olaya, V. (2016). *Sistemas de Información Geográfica*. Recuperado de <http://volaya.github.io/libro-sig/>
- Pérez, C., & Muñoz, A. L. (2006). *Teledetección : nociones y aplicaciones*. (A. L. M. N. Carlos Pérez Gutiérrez, Ed.). Recuperado de <https://bit.ly/2Pc0eDc>

- Perez, D. J. (2007). *Introducción a los Sensores Remotos - Aplicaciones en Geología. Universidad de Buenos Aires*. (Vol. 9). Buenos Aires. Recuperado de http://aviris.gl.fcen.uba.ar/Curso_SR/Guia_Curso_sr_2007.pdf
- Rios, J. R., Laguado, W. G., Trujillo, C., & Sánchez, P. (2012). *Análisis y Modelación de Deforestación*. Recuperado de <http://unesdoc.unesco.org/images/0022/002259/225969S.pdf>
- Rouse, J. W. . J., Haas, R. H., Deering, D. W., Schell, J. A., & Harlan, J. C. (1974). Monitoring the Vernal Advancement and Retrogradation (Green Wave Effect) of Natural Vegetation. [Great Plains Corridor]. Recuperado de <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=19750020419>
- Sistema Nacional de Información de Tierras Rurales e Infraestructura Tecnológica. (2018). Sistema Nacional de Informacion de Tierras Rurales e Infraestructura Tecnológica | SIGTIERRAS. Recuperado el 18 de julio de 2018, de <http://www.sigtierras.gob.ec/>
- Sobrino, J. A., Gómez, M., Jiménez-Muñoz, J. C., & Oliso, A. (2007). Application of a simple algorithm to estimate daily evapotranspiration from NOAA–AVHRR images for the Iberian Peninsula. *Remote Sensing of Environment*, 110(2), 139–148. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2007.02.017>
- Tasumi, M., Trezza, R., Allen, R. G., & Wright, J. L. (2008). Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC)—Applications. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 133(3–4), 395–406. <https://doi.org/10.1007/s10795-005-5186-0>
- U.S. Geological Survey. (s/f). USGS.gov | Ciencia para un mundo cambiante. Recuperado el 19 de julio de 2018, de <https://www.usgs.gov/>
- Valor, E., & Caselles, V. (1996). Mapping land surface emissivity from NDVI: Application to European, African, and South American areas. *Remote Sensing of Environment*, 57(3), 167–184. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(96\)00039-9](https://doi.org/10.1016/0034-4257(96)00039-9)
- Veguillas, J. L. (2016). *Cálculos de la emisividad efectiva en cavidades de cuerpo negro cilíndricas, cónicas y cilíndrico-cónicas. Modelos y aplicaciones a la termometría de radiación*. Recuperado de <http://uvadoc.uva.es/bitstream/10324/22111/1/Tesis1193-170117.pdf>

ANEXOS.

Anexo 1: Ecuaciones para el cálculo de Temperatura del aire.

Tabla 13: Ecuaciones para el cálculo de T_a .

Imagen Satelital	Ecuación para T_a .
Landsat 8 (07/01/2017)	$T_a = 31.901 - 0.00786z + 0.0893T_s$
Modis (17/01/2017)	$T_a = 79.961 - 0.01546z - 1.1131T_s$
Modis (13/02/2017)	$T_a = 27.239 - 0.00675z + 0.1313T_s$
Modis (29/03/2017)	$T_a = 38.777 - 0.008317z - 0.133T_s$
Sentinel 3 (07/05/2017)	$T_a = 34.6518 - 0.00733z - 0.1604T_s$
Aster (07/05/2017)	$T_a = 28.963 - 0.00585z + 0.01104T_s$
Sentinel 3 (24/06/2017)	$T_a = 21.7586 - 0.00625z + 0.3755T_s$
Aster (24/06/2017)	$T_a = 28.991 - 0.00663z + 0.05198T_s$
Sentinel 3 (14/07/2017)	$T_a = 31.7595 - 0.00771z + 0.0356T_s$
Modis (14/07/2017)	$T_a = 30.696 - 0.00723z + 0.0220T_s$
Modis (14/08/2017)	$T_a = 40.953 - 0.00875z - 0.2319T_s$
Landsat 8 (19/08/2017)	$T_a = 25.822 - 0.00414z - 0.0000201T_s$
Modis (19/09/2017)	$T_a = 8.785 - 0.004197z - 0.5991T_s$
Landsat 8 (20/09/2017)	$T_a = 34.122 - 0.00837z + 0.0667T_s$
Sentinel (20/09/2017)	$T_a = 31.288 - 0.00783z + 0.1384T_s$

Fuente: El Autor.
Elaboración: El Autor.

Anexo 2: Mapas de Evapotranspiración del cultivo de referencia ETo.

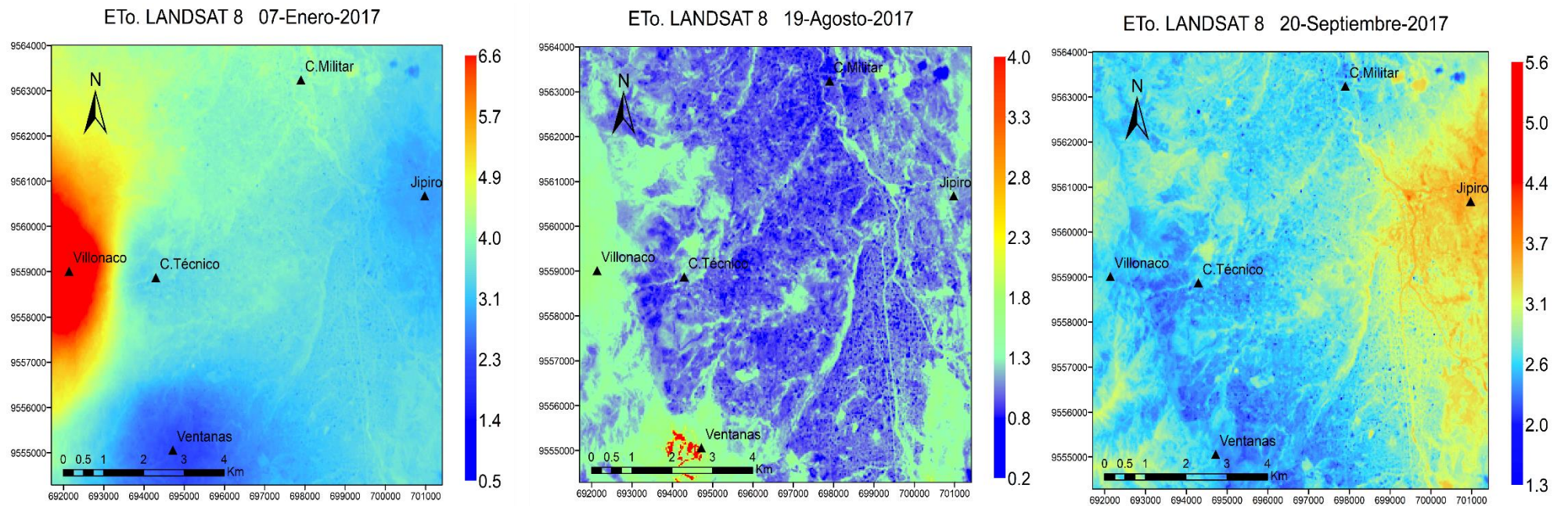


Figura 16: Mapas de ETo (mm/día) de LANDSAT 8.

Fuente: El Autor.

Elaboración: El Autor.

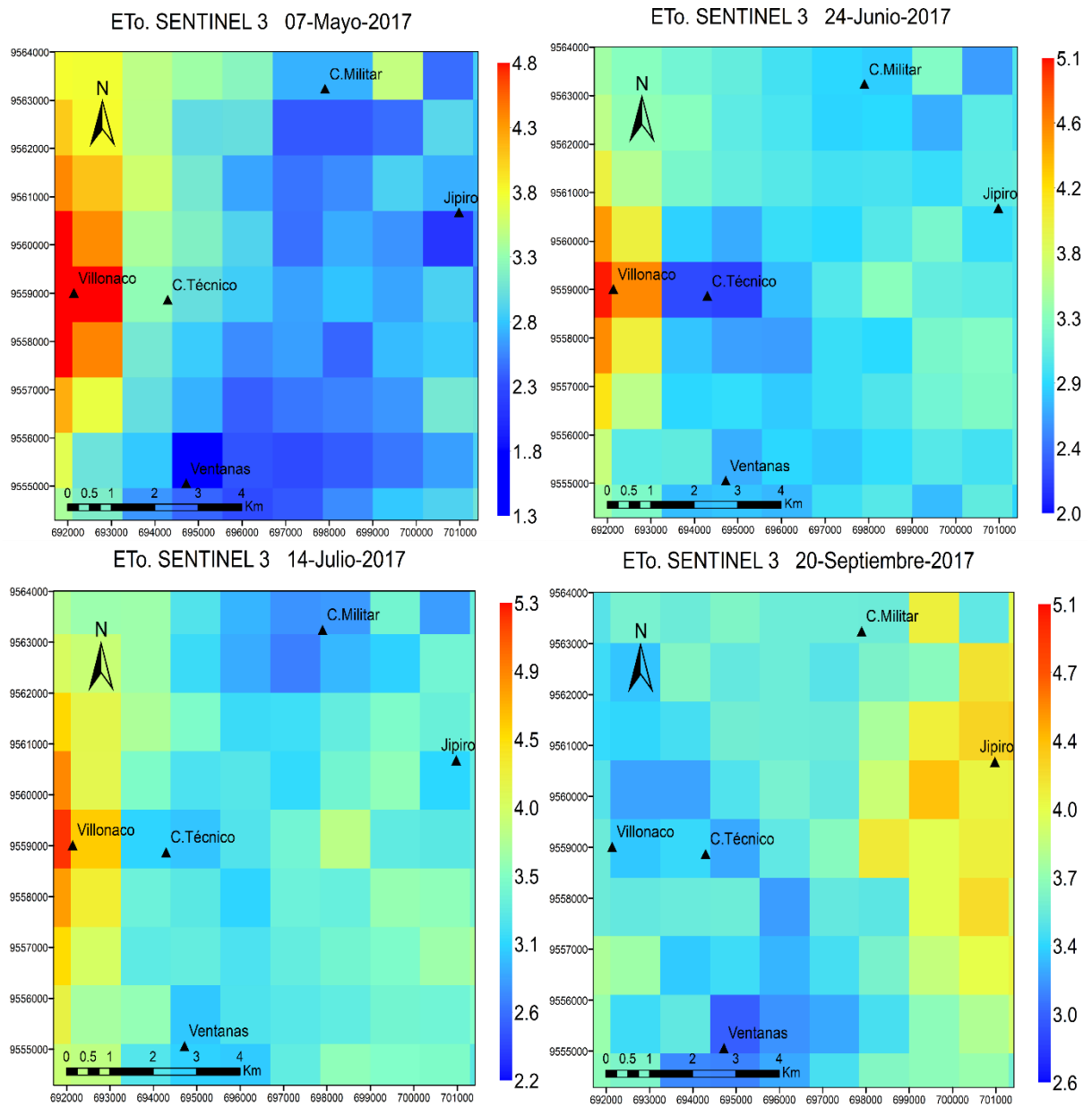
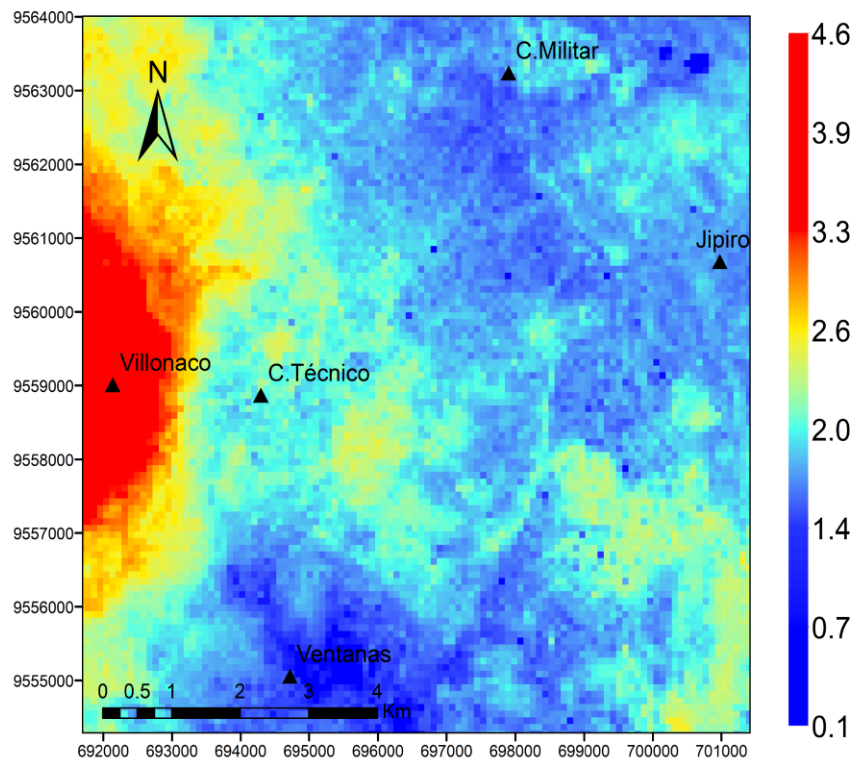


Figura 17: Mapas de ETo (mm/día) de SENTINEL 3.

Fuente: El Autor.

Elaboración: El Autor.

ETo. ASTER 07-Mayo-2017



ETo. ASTER 24-Junio-2017

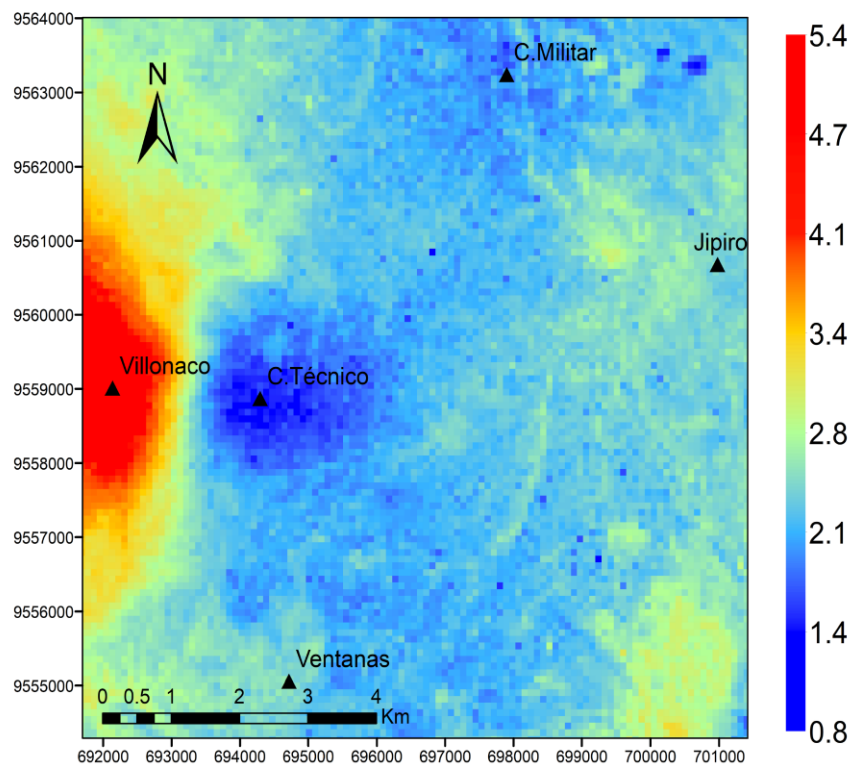


Figura 18: Mapas de ETo (mm/día) de ASTER.

Fuente: El Autor.

Elaboración: El Autor.

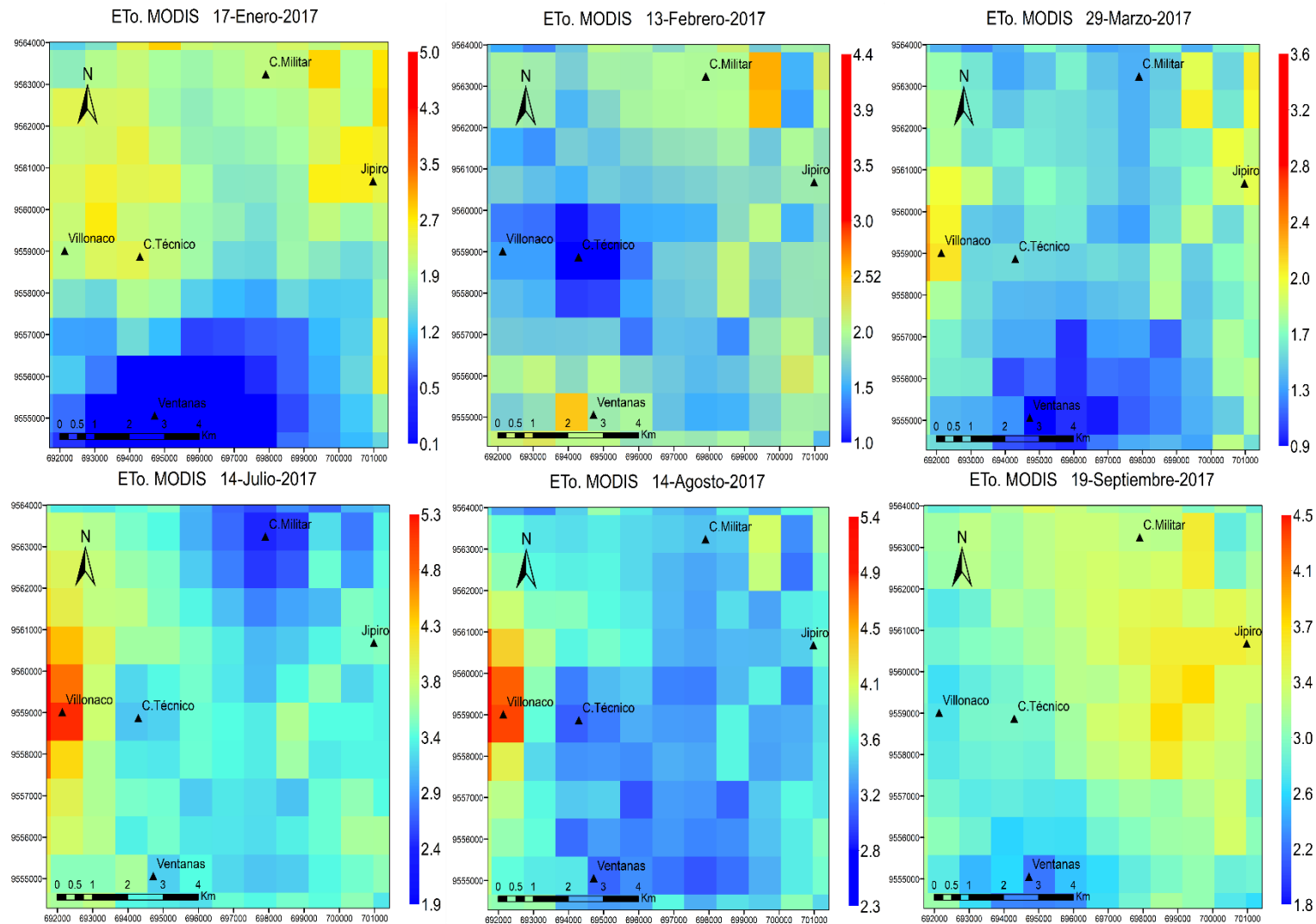


Figura 19: Mapas de ETo (mm/día) para MODIS.
Fuente: El Autor.
Elaboración: El Autor.

Anexo 3: Tablas de Evapotranspiración del cultivo de referencia ETo.

Tabla 14: Datos de ETo con datos meteorológicos y Datos satelitales LANDSAT 8.

ETo para Datos Satelitales LANDSAT 8			
Estaciones.	Fechas de Imágenes	ETo Datos Meteorológicos. (mm/día)	ETo Datos Satelitales. (mm/día)
Colegio Militar	07/01/2017	2.80	2.56
	19/08/2017	2.61	2.33
	20/09/2017	3.84	3.46
Jipiro	07/01/2017	1.52	1.67
	19/08/2017	2.90	2.80
	20/09/2017	4.70	4.61
Colegio Técnico	07/01/2017	2.00	2.20
	19/08/2017	3.07	2.63
	20/09/2017	4.09	3.52
Ventanas	07/01/2017	0.90	1.00
	19/08/2017	3.31	3.32
	20/09/2017	3.59	3.49
Villonaco	07/01/2017	5.94	5.99
	19/08/2017	3.07	3.08
	20/09/2017	-	3.57

Fuente: El Autor.

Elaboración: El Autor.

Tabla 15: Datos de ETo con datos meteorológicos y Datos satelitales ASTER.

ETo para Datos Satelitales ASTER			
Estaciones.	Fechas de Imágenes	ETo Datos Meteorológicos. (mm/día)	ETo Datos Satelitales. (mm/día)
Colegio Militar	07/05/2017	1.91	2.01
	24/06/2017	2.74	2.65
Jipiro	07/05/2017	2.28	2.02
	24/06/2017	3.23	3.15
Colegio Técnico	07/05/2017	2.93	2.04
	24/06/2017	2.44	2.00
Ventanas	07/05/2017	1.74	1.56
	24/06/2017	2.97	3.09
Villonaco	07/05/2017	4.56	4.53
	24/06/2017	5.15	5.19

Fuente: El Autor.

Elaboración: El Autor.

Tabla 16: Datos de ETo con datos meteorológicos y Datos satelitales SENTINEL 3.

ETo para Datos Satelitales SENTINEL 3			
Estaciones.	Fechas de Imágenes	ETo Datos Meteorológicos. (mm/día)	ETo Datos Satelitales. (mm/día)
Colegio Militar	07/05/2017	1.91	1.99
	24/06/2017	2.74	2.87
	14/07/2017	2.06	2.85
	20/09/2017	3.84	3.65
Jipiro	07/05/2017	2.28	1.50
	24/06/2017	3.23	2.95
	14/07/2017	3.21	3.12
	20/09/2017	4.70	4.23
Colegio Técnico	07/05/2017	2.93	2.54
	24/06/2017	2.44	2.28
	14/07/2017	3.31	3.11
	20/09/2017	4.09	3.50
Ventanas	07/05/2017	1.74	1.35
	24/06/2017	2.97	2.73
	14/07/2017	3.20	3.09
	20/09/2017	3.59	3.10
Villonaco	07/05/2017	4.56	4.21
	24/06/2017	5.15	4.68
	14/07/2017	4.86	4.56
	20/09/2017	-	3.43

Fuente: El Autor.

Elaboración: El Autor.

Tabla 17: Datos de ETo con datos meteorológicos y Datos satelitales MODIS.

ETo para Datos Satelitales MODIS			
Estaciones.	Fechas de Imágenes	ETo Datos Meteorológicos. (mm/día)	ETo Datos Satelitales. (mm/día)
Colegio Militar	17/01/2017	3.54	2.78
	13/02/2017	3.86	3.45
	29/03/2017	2.46	2.25
	14/07/2017	2.06	2.27
	14/08/2017	3.45	3.37
	19/09/2017	3.73	3.24
Jipiro	17/01/2017	3.77	3.11
	13/02/2017	3.72	3.37
	29/03/2017	3.00	2.88
	14/07/2017	3.21	3.35
	14/08/2017	3.63	3.65
	19/09/2017	4.00	3.53
Colegio Técnico	17/01/2017	4.23	3.06
	13/02/2017	3.08	2.47
	29/03/2017	2.94	2.44
	14/07/2017	3.31	2.96
	14/08/2017	3.49	3.01
	19/09/2017	3.79	2.95
Ventanas	17/01/2017	0.40	0.37
	13/02/2017	4.07	3.37
	29/03/2017	1.98	1.75
	14/07/2017	3.20	3.01
	14/08/2017	3.36	3.03
	19/09/2017	2.80	2.26
Villonaco	17/01/2017	3.15	2.70
	13/02/2017	3.55	2.96
	29/03/2017	3.05	3.05
	14/07/2017	4.86	4.86
	14/08/2017	4.85	4.80
	19/09/2017	-	2.75

Fuente: El Autor.

Elaboración: El Autor.