

UNIVERSIDAD DE PANAMÁ
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS
ESCUELA DE INGENIERÍA AGRÍCOLA

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN EN LA PARTE
ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO SANTA MARÍA.**

KAROLINE CRISTEL CASTILLO

4-776-1632

DAVID, CHIRIQUÍ
REPÚBLICA DE PANAMÁ

2023

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN EN LA PARTE
ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO SANTA MARÍA.**

**TRABAJO DE GRADUACIÓN SOMETIDO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE
INGENIERÍA EN MANEJO DE CUENCAS Y AMBIENTE.**

**PERMISO PARA SU PUBLICACIÓN, REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL
DEBE SER OBTENIDO DE LA FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS**

APROBADO:

PROF. TIRSO SOLÍS

DIRECTOR

PROF. NOÉ AGUILAR

ASESOR

PROF. CAROLINA GUERRA

ASESOR

DAVID, CHIRIQUÍ

REPÚBLICA DE PANAMÁ

2023

AGRADECIMIENTO

Eternamente agradecida con Dios por bendecirme, escuchar todas mis oraciones y ser esa luz que ilumina mis momentos de debilidad, sobre todo por darme la fortaleza de estudiar y trabajar para lograr mis metas.

Agradezco desde el fondo de mi corazón a mi familia, por su apoyo incondicional en todos mis proyectos y los sueños que aún deseo cumplir; principalmente a mi madre, mi hermano, mi abuela y a mi pequeña hija Shirlyn, en estas pequeñas líneas quiero agradecerle por enseñarme a ser fuerte y encontrarme a mí misma para devorar el mundo con tal de demostrarle lo lejos que puedo llegar por ella.

Esta tesis es el fruto del trabajo, durante los últimos años, de CREHO RAMSAR con quienes estaré infinitamente agradecida, ya que a lo largo de ese tiempo he aprendido, disfrutado cada experiencia, madurado y crecido profesionalmente. Mi sincero agradecimiento a mi asesor Conrado de León de CREHO RAMSAR y mis asesores de la universidad de Panamá: Tirso Solís y Richard Ortega, que me inspiraron a ser mejor cada día, gracias por aceptar este enorme reto conmigo y brindarme todos sus conocimientos, gracias por su comprensión, confianza, generosidad y crítica constructiva para llevar a cabo esta investigación.

Agradezco al Dr. Percy Peralta, Lic. Cándido Carpintero, Arq. Andreina Pernía, Lic. Tania Maure y a todo el equipo de trabajo de CREHO RAMSAR por su esfuerzo y dedicación para llevar a cabo el proyecto y la logística en pandemia. De igual manera, a todos los miembros de la Cooperativa la Esperanza de los Campesinos y sus caficultores, en especial al señor Francisco Pineda y el señor Harmodio Cisneros, por permitirme el acceso a las fincas y brindarme toda la información necesaria para elaborar esta investigación y consecutivamente a los profesores de la universidad Carolina Guerra, Noé Aguilar, Alexis Samudio, José Pineda, Juan Corella y Julián Gutiérrez por brindarme sus conocimientos que fueron de suma importancia para desarrollar esta tesis. De igual manera, al equipo de ESRI Panamá, en especial al Ing. Jean Guevara, por su disposición y apoyo en la elaboración de los mapas.

A los profesores de la carrera de Ingeniería en Manejo de Cuencas y Ambiente por hacer de mí, una profesional capaz de enfrentar cualquier reto que se le presente y tener la capacidad de analizar e investigar cuando se requiera.

Con mucho amor y cariño agradezco a todos mis compañeros de clase por enseñarme el valor de trabajar en equipo, especialmente a Leily Castrellón, Kristellys Hernández y Alanis Samudio quienes me brindaron su confianza y amistad durante esta hermosa carrera. Es poco mencionar que me siento afortunada de contar ustedes, ya que fueron testigo de mi lucha constante por culminar esta tesis. Chicas, mil gracias por enfrentar conmigo este reto.

Con amor, *Karoline Cristel Castillo*

DEDICATORIA

Con todo mi amor y cariño, a mi querida hija *Shirlyn*.

Hija, fuiste mi pilar y mi inspiración desde el primer día, luche tanto por dar siempre lo mejor de mí, para ti, que solo puedo obsequiarte mi amor y empeño cada día. Eres la detonante de mi felicidad, me has enseñado y me sigues enseñando lo valiente que puedo ser.

Madre, sin duda alguna no lo hubiera logrado sin ti, es un hecho que tu bendición a diario me ha protegido a lo largo de mi vida. Eres mi más grande ejemplo y el espejo en el cual me quiero reflejar, pues tus virtudes y tu gran amor me han llevado por el buen camino.

Hermanito, admiro tantas cualidades en ti y valoro el apoyo y todos los consejos que siempre me has brindado. Estoy muy orgullosa de ti y quiero decirte que has fomentado en mí el deseo de superación y de triunfo en la vida.

Abuelita, no tengo palabras para expresar lo agradecida que me siento por todo su apoyo brindado, pues usted me ayudó e inspiró a perseguir mis sueños hasta poder alcanzarlos.

Con amor, *Karoline Cristel Castillo*

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN EN LA PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO SANTA MARÍA.

Castillo, KC. 2023. Análisis comparativo de la evapotranspiración en la parte alta de la cuenca del río Santa María. Tesis Ing. en Manejo de Cuencas y Ambiente. Chiriquí, PA, UP. 140p.

RESUMEN

El cultivo de café es el principal sistema productivo en la parte alta de la cuenca del río Santa María y existe poca información científica para estimar la evapotranspiración. Por ello, en esta investigación se analizó la evapotranspiración en tres fincas: Santa Fe, comunidad de Alto de Piedra; El Pantano, comunidad de Pajonal y El Alto, comunidad de El Gallo. Por lo cual, se calculó la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o) y la evapotranspiración del cultivo de café (ET_c), con el método de Penman-Monteith, utilizando imágenes satelitales Landsat, donde los resultados indican que la ET_o no presenta diferencia significativa al comparar los valores de las tres fincas, sin embargo, la ET_c muestra una diferencia significativa en las fincas El Alto, El Gallo (3.06 mm día^{-1}) con El Pantano, Pajonal (1.45 mm día^{-1}). Posteriormente, se comparó la ET_o y la ET_c en la finca El Pantano, Pajonal; utilizando las imágenes satelitales Landsat y la estación meteorológica Tempest, donde los resultados de ET_o indican que no hay diferencia significativa, sin embargo, la ET_c es más alta para la estación meteorológica Tempest (4.40 mm día^{-1}) que para las imágenes satelitales Landsat (1.57 mm día^{-1}). Por último, se calculó el balance hídrico con datos de ET_o de la estación meteorológica de ETESA, donde resultaron valores más bajos en diciembre (3.16 mm día^{-1}) y más altos en abril (4.25 mm día^{-1}).

Palabras claves: Evapotranspiración del cultivo de referencia, evapotranspiración del cultivo, café, balance hídrico e imágenes satelitales Landsat.

COMPARATIVE ANALYSIS OF EVAPOTRANSPIRATION IN THE UPPER SANTA MARÍA RIVER WATERSHED

Castillo, KC. 2023. Comparative analysis of evapotranspiration in the upper Santa María river watershed. Engineering Thesis in Watershed Management and Environment. Chiriquí, PA, UP. 140p.

ABSTRACT

Coffee cultivation is the main productive system in the upper Santa María river watershed, and there is little scientific information to estimate evapotranspiration. Therefore, in this research, evapotranspiration was analyzed in three farms: Santa Fe, community of Alto de Piedra; El Pantano, community of Pajonal and El Alto, community of El Gallo. For this, the evapotranspiration of the reference crop (ET_o) and the evapotranspiration of the coffee crop (ET_c) were calculated with the Penman-Monteith method, using Landsat satellite images, where the results indicate that the ET_o does not present a significant difference in the values of the three farms. However, the ET_c shows a significant difference between the farms El Alto, El Gallo (3.06 mm day^{-1}) with El Pantano, Pajonal (1.45 mm day^{-1}). Subsequently, the ET_o and the ET_c were compared using the satellite images and the Tempest weather station on the El Pantano farm, Pajonal; where the ET_o results indicate no significant difference. Nevertheless, the ET_c is higher for the Tempest weather station (4.40 mm day^{-1}) than for Landsat satellite images (1.57 mm day^{-1}). Finally, the water balance was calculated with ET_o data from the ETESA weather station, where the lowest values were found in December (3.16 mm day^{-1}) and highest in April (4.25 mm day^{-1}).

Keywords: Reference crop evapotranspiration, crop evapotranspiration, coffee, water balance and Landsat satellite images.

ÍNDICE DE CONTENIDO

Página

PÁGINA DE APROBACIÓN	II
AGRADECIMIENTO	III
DEDICATORIA	V
RESUMEN.....	VI
ABSTRACT	VII
ÍNDICE DE CONTENIDO	VIII
ÍNDICE DE CUADROS.....	XII
ÍNDICE DE FIGURA.....	XII
ÍNDICE DE ANEXOS.....	XVII
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	XVIII
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Planteamiento del problema a investigar.....	3
1.2 Antecedentes	4
1.2.1 El recurso hídrico para uso agrícola	4
1.2.2 La teledetección en la agricultura	6
1.2.3 El cultivo de café.....	8
1.3 Justificación	10
1.4 Objetivos	11

1.4.1	Objetivo general.....	11
1.4.2	Objetivos específicos	11
1.5	Hipótesis.....	12
1.6	Alcances y limitaciones del estudio	12
1.6.1	Alcances	12
1.6.2	Limitaciones.....	13
2	REVISIÓN DE LA LITERATURA	14
2.1	Proceso de la evapotranspiración	14
2.1.1	Evaporación.....	14
2.1.2	Transpiración	14
2.1.3	Evapotranspiración	15
2.2	Método para calcular la evapotranspiración	17
2.2.1	Ecuación FAO Penman-Monteith.....	18
2.3	Teledetección	19
2.3.1	Imágenes Landsat	21
2.3.2	METRIC - EEFlux	22
2.4	Estaciones meteorológicas.....	27
2.4.1	Sistema meteorológico de Tempest.....	27
2.4.2	Datos meteorológicos globales para SWAT	28
2.4.3	Estaciones meteorológicas de ETESA	29

2.5	Características de la parte alta de la cuenca.....	29
2.5.1	Ubicación geográfica	29
2.5.2	Clima.....	30
2.5.3	Relieve.....	33
2.5.4	Hidrología	33
2.6	Cultivo de café.....	33
3	MATERIALES Y METODOLOGÍA	36
3.1	Materiales y equipos.....	36
3.1.1	Fuentes de datos climáticos	36
3.1.2	Software.....	38
3.1.3	Equipos y herramientas	38
3.2	Metodología.....	39
3.2.1	Localización y descripción de las fincas	39
3.2.2	Proceso metodológico para el cálculo de la evapotranspiración	43
3.2.3	Comparación de la evapotranspiración de imágenes satelitales Landsat y datos de la estación meteorológica de Tempest	51
3.2.4	Cálculo del balance hídrico mensual con la estación meteorológica de ETESA.....	54
4	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	56
4.1	Resultados de la evapotranspiración.....	56

4.1.1	Análisis comparativo de la evapotranspiración en las fincas por medio de las imágenes satelitales Landsat en METRIC EEFlux	56
5	CONCLUSIONES	74
6	RECOMENDACIONES.....	76
7	REFERENCIAS CITADAS.....	78
8	ANEXOS.....	86

ÍNDICE DE CUADROS

N°		Página
I	Información de la estación meteorológica de Tempest.....	36
II	Información de datos meteorológicos globales de SWAT.....	37
III	Información de la estación meteorológica de ETESA.....	38
IV	Rangos del coeficiente de determinación para interpretación	52
V	Valores de la evapotranspiración del cultivo de referencia, estación meteorológica de ETESA.....	69
VI	Precipitación y precipitación efectiva de la estación de ETESA	70
VII	Balance hídrico mensual con la estación de ETESA, Santa Fe.....	72
VIII	Rango de valores de ET_0 para las regiones agroclimáticas	86
IX	Valores del coeficiente de cultivo y altura de las plantas en condiciones óptimas para la fórmula de ET_0 de la FAO Penman-Monteith	86
X	Insolación máxima diaria para diferentes latitudes	87
XI	Radiación extraterrestre diaria para diferentes latitudes.....	87
XII	Clases de gradiente de la pendiente del suelo	88
XIII	Datos climáticos diarios del mes diciembre de la estación de Tempest ..	91
XIV	Datos climáticos diarios del mes de enero de la estación de Tempest....	92
XV	Datos climáticos diarios del mes de febrero de la estación de Tempest..	93
XVI	Datos climáticos diarios del mes de marzo de la estación de Tempest...	94
XVII	Datos climáticos diarios del mes de abril de la estación de Tempest	95
XVIII	Datos históricos de temperatura mínima de la estación de ETESA.....	97
XIX	Datos históricos de temperatura máxima de la estación de ETESA.....	98

XX	Datos históricos de la humedad relativa de la estación de ETESA	99
XXI	Velocidad del viento de datos meteorológicos globales de SWAT	100
XXII	Datos históricos de insolación de la estación de ETESA.....	101
XXIII	Datos históricos de radiación solar de la estación de etesa	102
XXIV	Datos históricos de precipitación de la estación de etesa.....	103
XXV	Datos de evapotranspiración del cultivo de referencia mensual en CROPWAT	104
XXVI	Datos de evapotranspiración del cultivo de referencia diaria en CROPWAT	105
XXVII	Resultado de la evapotranspiración de referencia para las imágenes satelitales Landsat	106
XXVIII	Resultado de la fracción de la evapotranspiración del cultivo de referencia para las imágenes satelitales Landsat	107
XXIX	Resultado de la evapotranspiración del cultivo de café para las imágenes satelitales Landsat	108
XXX	Comparación de datos de la evapotranspiración del cultivo de referencia en la finca el Pantano, Pajonal	109
XXXI	Comparación de datos de la evapotranspiración del cultivo en la finca el Pantano, Pajonal.....	110

ÍNDICE DE FIGURA

N°		Página
1	Representación de la evapotranspiración y sus factores.....	16
2	Esquema general de la teledetección	20
3	Estructura de imagen multiespectral y componente satelital.	21
4	Representación del balance de energía para calcular la evapotranspiración.	22
5	Partes del sistema meteorológico Tempest.	28
6	Clasificación climática según Alberto McKay y ubicación de las fincas. ..	32
7	Delimitación de las fincas y gradiente de la pendiente de suelo.....	42
8	Proceso metodológico para el cálculo de la evapotranspiración.....	43
9	Ubicación de las estaciones meteorológicas de Tempest y de ETESA. ..	49
10	Gráfico de la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o) en las tres fincas cafetaleras (izquierda), además los resultados del análisis de varianza de la prueba de ANOVA (derecha superior) y resultados de la prueba de Tukey (derecha inferior).....	57
11	Gráfico de la evapotranspiración del cultivo (ET_c) en las tres fincas (izquierda), además los resultados del análisis de varianza de la prueba de ANOVA (derecha superior) y la prueba de Tukey (derecha inferior).....	58
12	Gráfico de Comparación de la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o) en la finca El Pantano, Pajonal (izquierda), además los resultados del análisis de varianza de la prueba de ANOVA (derecha superior) y resultados de la prueba de Tukey (derecha inferior).....	60

13	Gráfico de Comparación de la evapotranspiración del cultivo de café (ET _c) en la finca El Pantano, Pajonal (izquierda), además los resultados del análisis de varianza de la prueba de ANOVA (derecha superior) y resultados de la prueba de Tukey (derecha inferior).....	61
14	Mapa de la evapotranspiración del cultivo de café en el mes de diciembre con imágenes Landsat - METRIC EEFlux.....	63
15	Mapa de la evapotranspiración del cultivo de café en el mes de enero con imágenes Landsat - METRIC EEFlux.	64
16	Mapa de la evapotranspiración del cultivo de café en el mes de febrero con imágenes Landsat - METRIC EEFlux.	65
17	Mapa de la evapotranspiración del cultivo de café en el mes de marzo con imágenes Landsat - METRIC EEFlux.	66
18	Mapa de la evapotranspiración del cultivo de café en el mes de abril con imágenes Landsat - METRIC EEFlux.	67
19	Mapa de la evapotranspiración del cultivo de café con imágenes Landsat – METRIC EEFlux.....	68
20	Gráfico de balance hídrico mensual de Santa Fe (132-033).....	73
21	Kit completo de estación meteorológica de Tempest.....	89
22	Instalación de estación meteorológica Tempest con el equipo de CREHO y la Cooperativa la Esperanza de los Campesinos.....	89
23	Aplicación Tempest Weather para celular.....	90
24	Estado de la estación meteorológica de ETESA en Santa Fe.	96

25	Vista en la finca ubicada en el corregimiento de Santa Fe, comunidad Alto de Piedra, se visualiza la distribución del café sin sombra.	111
26	Vista en la finca ubicada en el corregimiento de Santa Fe, comunidad Alto de Piedra, se visualiza la distribución del café bajo condiciones de sombra en forma no ordenada.....	111
27	Vista en la finca ubicada en el corregimiento El Alto, comunidad El Gallo, se visualiza la distribución del café bajo condiciones de sombra en forma no ordenada.....	112
28	Procedimiento para acceder a EEFlux, seleccionar el periodo y ubicar del área de interés.....	113
29	Selección de imágenes de Landsat.	114
30	Seleccionar y descargar la ETo y EToF – estándar calibrado.	114
31	Configurar los datos en el programa CROPWAT e ingresar los datos climáticos.	115
32	Estimación de datos faltantes y cálculo de la evapotranspiración de referencia.....	116

ÍNDICE DE ANEXOS

N°		Página
A	Parámetros para la evapotranspiración	86
B	Parámetros de suelo.....	88
C	Estación meteorológica de Tempest.....	89
D	Estación meteorológica de ETESA.....	96
E	Imágenes satelitales Landsat	106
F	Fincas de café.....	111
G	Procedimiento para la adquisición de imágenes satelitales en METRIC EEFlux	113
H	Procedimiento de determinación de la evapotranspiración de referencia del cultivo utilizando el programa de CROPWAT	115
I	Lista de acrónimos.....	117
J	Lista de símbolos.....	119

ÍNDICE DE ECUACIONES

N°		Página
1	Evapotranspiración del cultivo de referencia bajo condiciones estándar .	17
2	Evapotranspiración del cultivo de referencia de la FAO Penman - Monteith	18
3	Residuo de balance de energía superficial EEFlux.....	23
4	Evapotranspiración de la superficie instantánea.....	24
5	Calor latente de vaporización	24
6	Evapotranspiración del cultivo de referencia de Penman-Monteith ASCE estandarizada.	25
7	Fracción de la ET de referencia de pasto – estándar calibrada.....	26
8	Evapotranspiración actual para cada píxel.	26
9	Coefficiente de determinación	52
10	Precipitación efectiva CROPWAT FAO/AGLW	54

1 INTRODUCCIÓN

La investigación está elaborada bajo el marco del proyecto “Garantizando la seguridad hídrica en los bosques de montaña y humedales del río Santa María”, como becaria en la línea de investigación sobre “el análisis de uso de agua a nivel de fincas”, en colaboración con el Centro Regional Ramsar para la Capacitación e Investigación sobre Humedales para el Hemisferio Occidental (CREHO Ramsar), financiado por la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (SENACYT) y el apoyo del Ministerio de Ambiente (MiAMBIENTE), Autoridad de los recursos acuáticos (ARAP), Alianza para la Conservación y el Desarrollo (AcD), Cooperativa la Esperanza de los Campesinos, Universidad de Florida (UF) Center for Latin American Studies y Universidad de Florida (UF) Howard T. Odum Center for Wetlands.

Según el Banco Interamericano de Desarrollo, (2020:4) Panamá es el país número 56 del mundo con mayor recurso hídrico y ocupa el decimotercer lugar en relación a su tamaño. Sin embargo, el principal reto radica en el uso, administración y eficiencia del agua. Evidentemente, la precipitación aporta parte del agua que los cultivos requieren para satisfacer sus necesidades y el suelo actúa como reserva para momentos de déficit o escasez. Desde luego, la utilización de lluvia para riego es suficiente para el desarrollo de cultivos en climas húmedos; no obstante, en regiones secas es necesario compensar el déficit de evapotranspiración con el uso de riego (Frenken y Gillet, 2012).

La evapotranspiración se define como la suma de dos procesos: la evaporación y la transpiración. La evaporación es la pérdida de agua a través del suelo y la transpiración es la pérdida de agua a través del cultivo (Allen et al., 2006:1). Este factor es de gran importancia en la agricultura, ya que permite conocer si el cultivo presenta un déficit de agua, es por ello que mediante la evapotranspiración del cultivo (ET_c) se pueden estimar los requerimientos hídricos con la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o) y el coeficiente del cultivo (K_c) (Ramírez-Builes et al., 2010:2), también es posible conocer si se requiere de un sistema de riego y mejorar la eficiencia en el uso de agua.

El uso de datos meteorológicos y sensores remotos basados en imágenes satelitales son algunas de las metodologías para determinar la evapotranspiración, empleando ecuaciones como Penman-Monteith. Actualmente, estas metodologías son una alternativa potencial para obtener información sobre este tipo de requerimiento, considerando las condiciones climáticas y físicas de la zona, a fin de que los agricultores optimicen el recurso hídrico de sus cultivos (Ramos, 2014).

El área de influencia de esta investigación se centra en la parte alta de la cuenca del río Santa María, ubicada en la provincia de Veraguas, distrito de Santa Fe, en tres pequeñas fincas cafetaleras propiedad de la Cooperativa la Esperanza de los Campesinos y agricultores asociados. Con el objetivo principal de analizar y comparar la evapotranspiración del café mediante datos meteorológicos y herramientas de mapeo basadas en imágenes satelitales Landsat.

1.1 Planteamiento del problema a investigar

El cultivo de café es el sistema productivo que prevalece en la parte alta de la cuenca del río Santa María (ANAM et al., 2009:72). La problemática principal de la investigación se centra en la poca información sobre la capacidad de evapotranspiración del café, basada en trabajos experimentales sólidos. Ramírez et al., (2010:1) señala que, tanto el déficit de agua como el exceso en el suelo afectan la producción del cultivo y su comportamiento fenológico. En el caso de los caficultores del distrito de Santa Fe, provincia de Veraguas, la posible disminución de los rendimientos de productos agrícolas es ocasionada por la escasez de las lluvias y el aumento en las temperaturas asociados a una menor disponibilidad de agua para los cultivos (MiAMBIENTE, 2019:56).

Por ello, es preciso generar información cuantitativa en relación con este tipo de cultivo, ya que en la actualidad no hay investigaciones sobre la evapotranspiración en la zona de estudio, lo que provoca que no se tomen las decisiones adecuadas para el manejo del cultivo.

1.2 Antecedentes

En las últimas décadas, la importancia del recurso hídrico para uso agrícola en la cuenca del río Santa María, identificada por el Sistema Hidrológico de América Central con el número 132, ha dado un notable impulso en la región.

1.2.1 El recurso hídrico para uso agrícola

A nivel mundial, en el año 1993 la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) propone reflexionar en el manejo del recurso hídrico y aprovechar de forma sostenible el agua en la agricultura, advirtiendo que las malas decisiones que se tomen impactarán en el futuro. Al mismo tiempo, establece el manejo eficiente del recurso hídrico a nivel de fincas como una de las cinco áreas de prioridad, para el desarrollo sostenible agrícola. (FAO, 1993)

Panamá, con la Ley N° 41 de 1 de julio de 1998, General del Ambiente, establece los principios y normas básicos para la protección, conservación y recuperación del ambiente, promoviendo el uso sostenible de los recursos naturales. Posteriormente, se crea la Ley N° 44 de 5 de agosto de 2002, que establece el manejo, protección y conservación de las cuencas hidrográficas de la República de Panamá.

En ese mismo sentido de conservación, la cuenca del río Santa María siempre se destaca por su gran caudal e importancia económica, como lo son las actividades agrícolas, situación que la ha llevado en numerosas ocasiones a ser priorizada en Panamá. Por ello, en el año 2004 se realizó una investigación sobre el comportamiento hidrometeorológico del recurso hídrico haciendo uso de las

estaciones meteorológicas ubicadas en la cuenca (ANAM et al., 2004). En el mismo año, se evaluaron algunas zonas para estimar el riesgo de inundación utilizando HEC-RAS como herramienta de análisis (ANAM et al., 2009).

Para el año 2009, se aprueba El Plan de Manejo Integral de la Parte Alta, Media y Baja de la Cuenca del Río Santa María, en donde se reconoce que la gestión de toda la cuenca es una sola unidad y los procesos realizados en la cuenca alta impactan su recorrido hacia la costa (ANAM et al., 2009). Además, se abordan temas como la identificación potencial del uso sostenible del agua, en donde se especifica que se deben considerar análisis futuros y estudios de factibilidad del recurso hídrico que sirvan para la toma de decisiones en riego de cultivos.

Más tarde, se crea El Plan Nacional de Gestión Integrada de Recursos Hídricos de la República de Panamá (PNGIRH) 2010-2030, abarcando estrategias sostenibles para afrontar los principales problemas hídricos que presenta el país (ANAM, 2011). También, proyectan un plan de manejo en la cuenca del río Santa María para minimizar su deterioro, abarcando temas sobre la disponibilidad de agua en actividades agropecuarias y la importancia de garantizar la seguridad alimentaria.

Acto seguido, se presenta El Plan Nacional de Gestión Integrada de Recursos Hídricos de la República de Panamá (PNGIRH) 2015-2050, Agua para todos, con un diagnóstico de la situación de los recursos hídricos y los retos a enfrentar en un corto, mediano y largo plazo, creando planes de acciones bajo cinco metas. Dentro de ellas se resalta: la disponibilidad de agua para el crecimiento

económico, cuencas hidrográficas saludables y la sostenibilidad hídrica (Comité de Alto Nivel de Seguridad Hídrica, 2016).

Simultáneamente, la Universidad de Panamá y CATHALAC realizó una investigación de gestión de recursos hídricos para la adaptación al cambio climático en el municipio de Santa Fe, donde realizaron estudios sobre la capacidad de resiliencia de las zonas afectadas por el cambio climático, buscando promover la seguridad hídrica. (Sabet-Rasekh y Saavedra, 2016)

Actualmente, surge el proyecto de Garantizar la Seguridad Hídrica en los Bosques de Montaña y Humedales del Río Santa María en una iniciativa de CREHO Ramsar, con el apoyo financiero de SENACYT y el Ministerio de Ambiente, del cual esta investigación forma parte, con el objeto de promover el uso sostenible y racional de los recursos hídricos, mediante acciones locales y regionales, a lo largo de la cuenca con base en el Plan Nacional de Gestión Integrada de Recursos Hídricos de la República de Panamá (PNGIRH) 2015-2050 (Sánchez, 2020).

1.2.2 La teledetección en la agricultura

La creciente producción agrícola y el incremento en la población muestran la necesidad de modernizar las técnicas utilizadas en la agricultura y la forma de obtener datos confiables, por lo cual la utilización de imágenes satelitales, como herramientas de teledetección, se han convertido en un factor de gran importancia en la agricultura (SIC, s.f.). Para el año 2013 en Perú, estudios sobre la metodología para calcular la evapotranspiración en grandes áreas, con cualquier tipo de cobertura, a partir de imágenes satelitales Landsat aplicando el modelo SEBAL, concluyeron que los datos obtenidos son representativos, no obstante

muestran la posibilidad de discriminar los cultivos y estados de riego en zonas de ladera o montañosas, además sugieren viable el uso del modelo SEBAL en zonas que posean información limitada (Ramos, 2014).

En Bolivia, estudios que analizan y comparan datos de imágenes satelitales y estaciones meteorológicas enfocados en la precipitación, concluyen que el coeficiente de correlación entre ambos métodos es alto, lo que indica que son excelentes resultados para aplicarlo en estudios de agua (Copa, 2018). Por otro lado, investigaciones realizadas en Chile, sobre la estimación de la evapotranspiración y la validación de los resultados con las mediciones directas, dio resultados de comportamientos similares entre ambas mediciones (Zaror, 2018).

El congreso Nacional de Riegos en Argentina, realizó un estudio con el objetivo de comparar y evaluar diferentes métodos de evapotranspiración para el cálculo de indicadores de riego, utilizando el programa CROPWAT e imágenes satelitales Landsat de EEFlux, donde se concluyó que CROPWAT sobreestima la evapotranspiración y en el caso de la evapotranspiración obtenida por EEFlux, menciona que la fecha de paso del satélite representa un valor puntual y puede diferir de la realidad al obtener valores de la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_0), también indica que sí el cultivo presenta un déficit de agua en el suelo puede no ser adecuadamente detectado (Salgado y Mateos, 2019).

En el mismo año, investigaciones en España sobre monitoreos de ecosistemas mediante la determinación de evapotranspiración y estrés hídrico en base a la METRIC EEFlux, muestran que la obtención de datos meteorológicos, a través de

imágenes satelitales, permite la determinación predictiva del estado hídrico de la zona (Villodre, 2019).

1.2.3 El cultivo de café

El café tiene una relevante importancia a nivel mundial, por lo que muchas personas dependen económicamente de este rubro. Panamá no se escapa de esta realidad, por lo que a menudo se realizan investigaciones para mejorar su producción y calidad.

Un estudio realizado en la Universidad de Cranfield para el 2001, sobre la relación del agua y los requerimientos de riego para el cultivo de café, en donde elaboraron consejos prácticos para ayudar al agricultor a planificar y usar el agua de lluvia o riego, muestra en sus conclusiones que no se obtuvo suficiente información para recomendar con confianza los datos de requerimiento para el café, siendo un cultivo de importancia comercial (Carr, 2001).

En la Universidad de Panamá, para el año 2009, se elaboró una tesis sobre la valorización económica del servicio ambiental hídrico de un sistema agroforestal de café con sombra en Chiriquí, donde se cuantificó el recurso hídrico de dos fincas mediante un método de valorización y analizaron componentes climáticos, dando como resultado la validación de una metodología funcional a través de un análisis biofísico del área y recomendando el mantenimiento del sistema agroforestal para que actúe como reservorio y mantenga el agua en el suelo evitando el déficit de humedad (Vargas, 2009).

Para el año 2010, un artículo de investigación realizado por el Centro Nacional de Investigación de Café (CENICAFÉ), de rangos adecuados de lluvia para el cultivo de café en Colombia explica como la integración de factores influyen en los requerimientos de agua del cultivo, evaluando: la edad, la distribución de las lluvias dentro del cultivo, la altitud, la cuenca hidrográfica y la disponibilidad de agua del suelo (Ramírez et al., 2010).

En el mismo año, se realizó un estudio sobre los índices hídricos que pueden ser empleados para identificar períodos críticos de déficit o exceso hídrico para el cultivo de café en Colombia, basándose en el índice de evapotranspiración, índice de exceso hídrico e índice del suelo. La investigación brinda como resultado que los índices son favorables en estudios con zonificación agroclimática para el cultivo de café integrando variables climáticas de cultivo y del suelo (Ramírez-Builes et al., 2010).

El Plan de Manejo Integral de la Parte Alta, Media y Baja de la Cuenca del Río Santa María explica la situación del cultivo de café, específicamente en la parte alta, e indica que este cultivo es una fuente comercial para los pobladores y se da en sistemas agroforestales con sombra de árboles nativos o frutales y también en sistemas sin sombra. Por otra parte, plantea la problemática que presentan en época de sequía mencionando graves desabastecimientos de agua para el cultivo, donde solo toman en consideración el riego por precipitación, basándose en la agricultura tradicional (ANAM et al., 2009).

Panamá, cuenta con El Plan Estratégico de Café para las zonas productoras de 1,000 msnm en adelante, que busca mejorar la sostenibilidad y producción de esta

actividad con la implementación de tecnologías en cada una sus etapas. El documento establece metas de zonificación, instalación de viveros, rehabilitación, renovación, mantenimiento, consultas en producción y capacitación a productores (MIDA et al., 2018).

Bajo el marco del proyecto Garantizar la Seguridad Hídrica en los Bosques de Montaña y Humedales del Río Santa María, cumpliendo con las metas del Plan Nacional de Gestión Integrada de Recursos Hídricos de la República de Panamá (PNGIRH) 2015-2050 y el escenario planteado, este proyecto de investigación propone realizar los procesos de estimación de la cantidad de evapotranspiración para el cultivo de café, actividad realizada mayormente en la parte alta de la cuenca del río Santa María, utilizando herramientas de información geográfica que permitan un mejor análisis y así contar con información objetiva para la toma de futuras decisiones.

1.3 Justificación

El principal desafío de Panamá de acuerdo con el banco mundial es la gestión del recurso hídrico, esto se debe al incremento en la falta de agua para el sector agropecuario en temporadas secas, donde la reducción de la precipitación limita la producción de los agricultores y disminuye sus cosechas (World Bank Group, 2016). Por esta razón el motivo de la investigación, centrado en la parte alta de la cuenca del río Santa María, se debe a la poca existencia de información científica para estimar la evapotranspiración del cultivo de café, en el cual los productores desconocen el requerimiento hídrico de sus cultivos, ocasionando que no se toman decisiones adecuadas para el manejo de sus fincas.

Cabe considerar que, es de gran importancia el cálculo de la evapotranspiración en la agricultura, ya que permite una adecuada planificación y administración del agua, ya sea en una región o en pequeñas fincas (Guerra, 2016).

Dentro de ese orden de ideas, la ejecución del proyecto beneficiará a los pequeños agricultores de las fincas cafetaleras con información confiable y una base de datos sobre la evapotranspiración del cultivo de café. Por tal motivo, en busca de un desarrollo sostenible para la cuenca del río Santa María, esta investigación analizará la evapotranspiración de cultivo de referencia y la evapotranspiración del cultivo de café.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

- Analizar y comparar la evapotranspiración utilizando diferentes métodos en la parte alta de la cuenca del río Santa María.

1.4.2 Objetivos específicos

- Calcular la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_0) utilizando estaciones meteorológicas e imágenes satelitales Landsat, a partir del método de Penman Monteith, para las tres fincas: Santa Fe, comunidad de Alto de Piedra; El Pantano, comunidad de Pajonal y El Alto, comunidad de El Gallo.
- Comparar la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_0) obtenida de las estaciones meteorológicas con las imágenes satelitales Landsat.

- Calcular la evapotranspiración del cultivo de café (ET_c) para las tres zonas de estudio.

1.5 Hipótesis

- **Hipótesis alternativa (H_a)**

H_a : Existen diferencias en el uso de datos al utilizar las metodologías de imágenes satelitales y estación meteorológica para calcular la evapotranspiración de referencia (ET_o) y evapotranspiración del cultivo (ET_c).

- **Hipótesis nula (H_0)**

H_0 : No existen diferencias en el uso de datos al utilizar las metodologías de imágenes satelitales y estación meteorológica para calcular la evapotranspiración de referencia (ET_o) y evapotranspiración del cultivo (ET_c).

1.6 Alcances y limitaciones del estudio

1.6.1 Alcances

El estudio se enfoca en un análisis comparativo de la evapotranspiración del cultivo de referencia y la evapotranspiración del café en tres fincas cafetaleras, ubicadas dentro del distrito de Santa Fe, en los corregimientos de: Santa Fe, comunidad de Alto de Piedra; El Pantano, comunidad de Pajonal y El Alto, comunidad de El Gallo.

El proyecto beneficiará específicamente a los agricultores de las pequeñas fincas cafetaleras, que contarán con una base de datos objetivos sobre la evapotranspiración. La misma es de vital importancia para aumentar las capacidades de los agricultores y mejorar el sistema de producción en sus fincas.

1.6.2 Limitaciones

Las limitaciones de la investigación se basan en el distanciamiento de las estaciones meteorológicas con datos climáticos completos en el área de estudio, ya que en las estaciones más cercanas no hay suficiente información para la aplicación del método Penman Monteith. También, se puede mencionar el difícil acceso a las comunidades: Alto de Piedra, Pajonal y El Gallo, dado que las fincas se encuentran en localidades bastantes alejadas.

Por otro lado, el almacenamiento de la estación de Tempest en campo es de siete días, por lo tanto, cada semana se realizaba una visita a la estación meteorológico para actualizar y registrar los datos de forma permanente en la aplicación del celular, de lo contrario se perdía la información por la poca capacidad del sistema. Otra de las razones por la cual se dificultó la movilización al sitio de estudio es el confinamiento en el país debido a la crisis pandémica del COVID-19.

Por último, las limitaciones que surgieron por el uso de la teledetección fueron: poca área de cobertura de las imágenes satelitales, alta nubosidad, baja resolución espacial y temporal del sensor Landsat de la zona en estudio y finalmente restricción de datos dentro de la plataforma EEFlux.

2 REVISIÓN DE LA LITERATURA

La evapotranspiración se define como la combinación de dos procesos: evaporación y la transpiración. La evaporación es la pérdida de agua a través de la superficie del suelo y la transpiración es la pérdida de agua a través del cultivo (Allen et al., 2006:1).

2.1 Proceso de la evapotranspiración

2.1.1 Evaporación

La evaporación es un proceso donde el agua se convierte en vapor desde una superficie y pasa a la atmosfera. Para ello, se requiere de energía tales como: la radiación solar y la temperatura; así mismo, requiere de la presión como la fuerza para retirar el vapor de agua de una superficie y la velocidad del viento, como el proceso que ocurre cuando se reemplaza el aire saturado por uno más seco (Allen et al., 2006:1).

2.1.2 Transpiración

La transpiración es el proceso donde el agua líquida de los tejidos de la planta se convierte en vapor y pasa a la atmósfera. Por medio de los estomas, pequeñas aberturas en las hojas donde pasan los gases y el vapor de agua de la planta hacia la atmosfera, los cultivos pierden agua. Las raíces absorben el agua y luego la transportan a la planta, casi toda el agua absorbida en el suelo se pierde en la transpiración y el resto pasa a formar parte de los tejidos vegetales de la planta (Allen et al., 2006:3).

2.1.3 Evapotranspiración

La evapotranspiración (ET) ocurre cuando se combina la evaporación y la transpiración, para ambos procesos se deben considerar los parámetros climáticos. El agua presente en el suelo cultivado se evapora, por medio de la radiación solar, a medida que el dosel de la planta crece e incrementa su sombra, la radiación solar que impacta el suelo disminuye. Por consiguiente, en la primera etapa del cultivo se pierde el 100 por ciento del agua, a través de la evaporación del suelo, pero a medida que se desarrolla el cultivo, cubriendo totalmente el suelo, la transpiración se convierte en el principal proceso, ver Figura 1 (Allen et al., 2006:3).

Los factores que afectan la evapotranspiración son:

- Parámetros meteorológicos: radiación, temperatura del aire, humedad y velocidad del viento. Estos datos se expresan a través de la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_0) (Allen et al., 2006:5).
- Factor de cultivo: se considera el tipo de cultivo, variedad, y etapa de desarrollo. La demanda de evaporación del cultivo, con agua óptima en el suelo y excelentes condiciones ambientales dan como resultado la evapotranspiración del cultivo (ET_c) en condiciones estándar (Allen et al., 2006:5).
- Condiciones ambientales: se consideran factores como la cobertura del suelo, la densidad de plantas, la cantidad de agua en el suelo y el manejo del cultivo. El efecto del contenido de agua del suelo sobre la

evapotranspiración, está condicionado a la magnitud del déficit hídrico y el tipo de suelo (Allen et al., 2006:5).

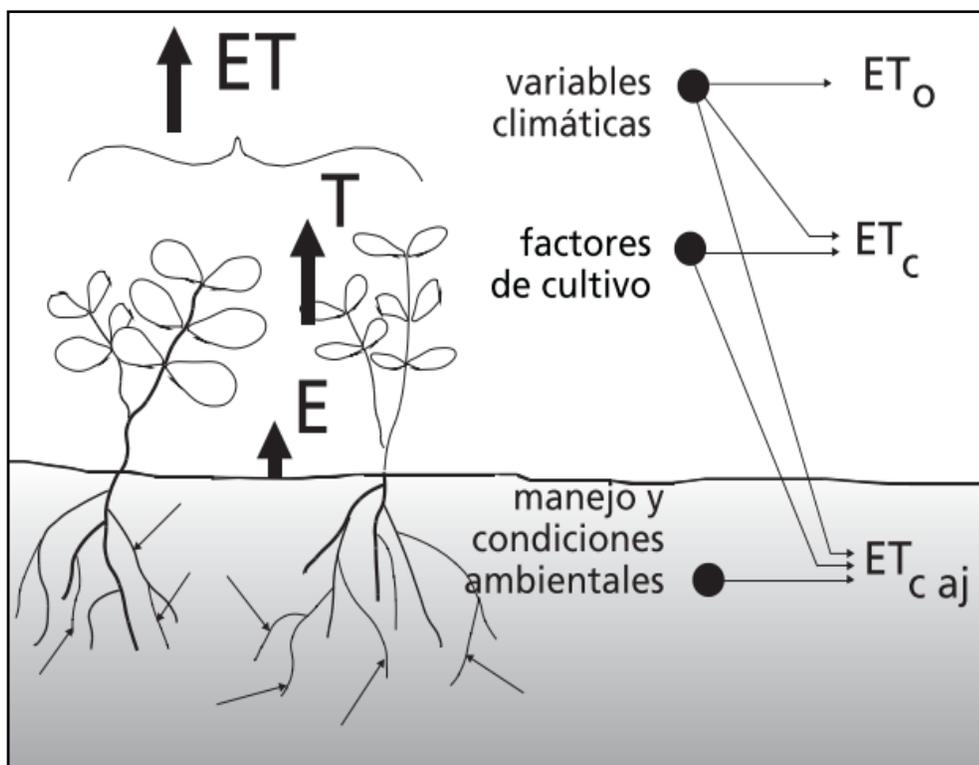


Figura 1. Representación de la evapotranspiración y sus factores.

Fuente: Tomado de R. Allen et al., (2006).

La evapotranspiración incluye las siguientes definiciones:

→ Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o):

Se relaciona con parámetros climáticos que expresan la demanda de evapotranspiración de la atmosfera en una región, donde no se consideran las características del cultivo ni los factores del suelo (Allen et al., 2006). Es decir, indica un cultivo hipotético de pasto con características definidas, tales como: un campo de gramíneas de 12 centímetros de altura, sin falta de agua y resistencia superficial de 70 metros por segundo (Allen et al., 2006). El estudio FAO, riego y

drenaje N°56 solo recomienda el método FAO Penman-Monteith para calcular la ET_o con parámetros climáticos, adicional plantean rangos de ET_o clasificados según las regiones agroclimáticas (ver ANEXO A, CUADRO VIII).

→ Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET_c):

Se relaciona a la evapotranspiración de cualquier tipo de cultivo con características como: libre de enfermedades, buena fertilización, buen desarrollo y bajo condiciones favorables de suelo y agua (Allen et al., 2006). La ecuación de la ET_c es la siguiente:

Ecuación 1. Evapotranspiración del cultivo de referencia bajo condiciones estándar

$$ET_c = ET_o * Kc$$

Donde, ET_o es la evapotranspiración del cultivo de referencia y Kc es el coeficiente del cultivo (Allen et al., 2006).

2.2 Método para calcular la evapotranspiración

De acuerdo con Allen et al., (2006) existen varios métodos para calcular la evapotranspiración que requieren aparatos específicos y mediciones precisas. Podemos mencionar el método de balance de energía, balance de agua en el suelo, lisímetros, estimada con tanque de evaporación y calculada con datos meteorológicos. Dentro del proyecto de investigación se utilizará el método evapotranspiración calculada con datos climáticos, donde se utilizan ecuaciones empíricas para calcular la evapotranspiración a través de datos climáticos y

recomiendan el método Penman-Monteith para calcular la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o).

2.2.1 Ecuación FAO Penman-Monteith

La ecuación FAO Penman-Monteith surgió en el año 1948 y es el único método recomendado para calcular la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o) utilizando datos climáticos y de localización de la región, tales como: la radiación solar, temperatura del aire, humedad, velocidad del viento a dos metros de altura, latitud, longitud y altura sobre el nivel del mar (Allen et al., 2006). La ecuación FAO Penman-Monteith es la siguiente:

Ecuación 2. Evapotranspiración del cultivo de referencia de la FAO Penman - Monteith

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

Donde, ET_o es la evapotranspiración de referencia (mm día^{-1}), R_n es la radiación neta en la superficie del cultivo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$), G la densidad de flujo de calor del suelo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$), T la temperatura del aire a 2 m altura ($^{\circ}\text{C}$), u_2 la velocidad del viento a 2 m de altura (m s^{-1}), e_s la presión de saturación (kPa), e_a la presión de vapor real (kPa), $e_s - e_a$ el déficit de presión de vapor de saturación (kPa), Δ la pendiente de la curva de presión de vapor ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$) y γ la constante psicrométrica ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$) (Allen et al., 2006).

2.3 Teledetección

Según el Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR), la teledetección se define como ***“La captación de las características físicas de la superficie terrestre, basada en mediciones de radiación reflejada y emitida de cada componente de esa superficie”*** (SEGEMAR, s.f.)

Los componentes de la teledetección según Bravo, (2017) son: fuente de energía, superficie terrestre, sistema de sensor del satélite, sistema de recepción, imagen satelital, intérprete y por último el usuario final, como se muestra en la Figura 2.

- Fuente de energía: es producida por la radiación electromagnética que el sensor puede captar. Puede provenir de la luz solar o cuando es emitida por el sensor como el radar, al captar el reflejo.
- Superficie terrestre: son características naturales o creadas por el hombre como: vegetación y construcciones, que reflejan señal hacia el sensor.
- Sistema de sensor del satélite: el sensor tiene el objetivo de captar la energía proveniente de la superficie terrestre y almacenarla o enviarla al sistema de recepción. El sensor se compone por cámaras, radar, entre otros y la plataforma que contiene el sensor, ya sea satélite o avión.
- Sistema de recepción: es el sistema que recibe la información del sensor y lo guarda en un formato para distribuirlo.
- Imagen satelital: es la imagen tomada directamente desde el sensor, donde muestra el espacio geográfico.
- Interprete: persona quien transforma los datos, por medio de procedimientos y herramientas digitales.

→ Usuario final: es la persona quien se beneficia del producto final luego de la interpretación, así como también es el responsable de tomar las decisiones que deriven del producto.

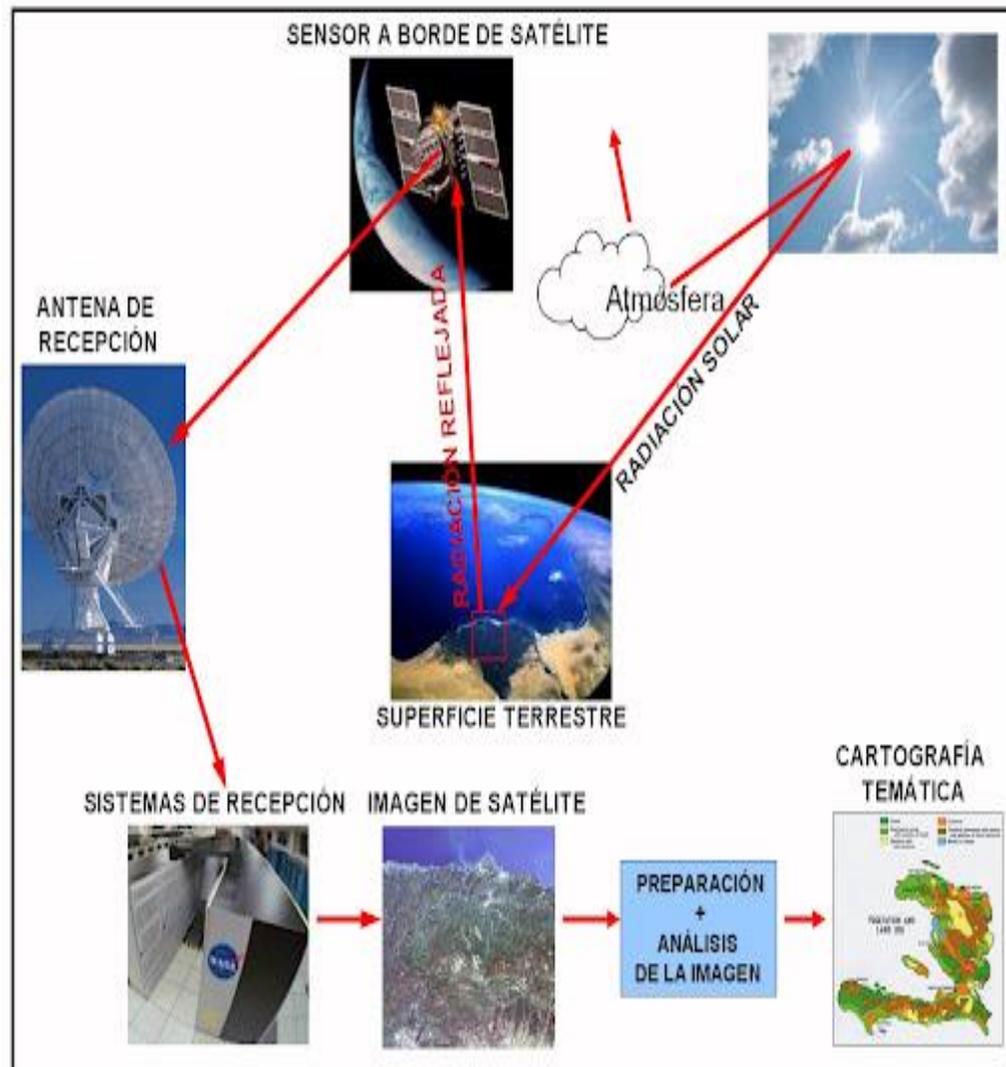


Figura 2. Esquema general de la teledetección

Fuente: Tomado de Fernández et al., (2011).

2.3.1 Imágenes Landsat

Landsat se define como un grupo de satélites que monitorean la tierra. Las imágenes proporcionadas por Landsat para este proyecto son multiespectrales (MS). Bravo, (2017) señala que las imágenes multiespectrales son muchos valores numéricos asociados a los píxeles, donde las bandas espectrales localizan al sensor y tienen la capacidad de recibir información de las ondas electromagnéticas. Estas imágenes son utilizadas para monitorear la vegetación, geología y recursos naturales en general.

Las imágenes satelitales están conformadas por matrices, donde cada celda representa un píxel y sus dimensiones dependen del sensor. Los sensores registran la radiación electromagnética que proviene de la cobertura vegetal y se almacena en cada píxel. Los pixeles son representados con valores numéricos y colores específicos (Bravo, 2017).

La Figura 3 muestra a su izquierda la estructura de las imágenes multiespectrales y a su derecha los componentes de una imagen satelital.

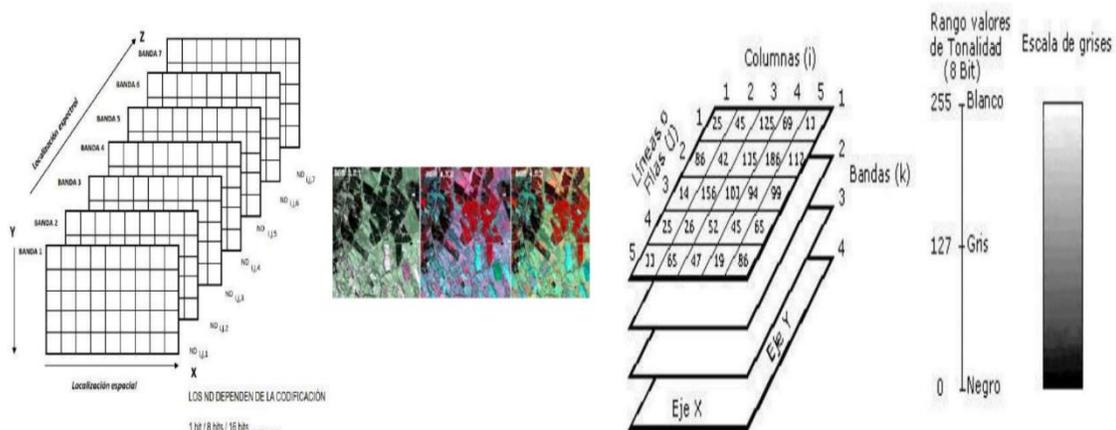


Figura 3. Estructura de imagen multiespectral y componente satelital.

Fuente: Tomado de Bravo, (2017).

2.3.2 METRIC - EEFlux

EEFlux (Flujo de evapotranspiración del motor terrestre) es la versión 0.20.4 de METRIC (Mapeo de evapotranspiración a alta resolución con calibración internalizada) basado en información de imágenes satelitales Landsat, operada por Google Earth Engine, que estima y mapea la evapotranspiración de cultivo, ver Figura 4 (Allen et al., 2007). La plataforma EEFlux fue desarrollada por la Universidad de Nebraska-Lincoln, el Instituto del Desierto y la Universidad de Idaho con el apoyo financiero de Google. La misma, utiliza bandas térmicas de onda corta, proyecta una resolución de 30 metros y procesa individualmente las imágenes desde 1984 hasta la actualidad con datos meteorológicos de NLDAS (Sistema de asimilación de datos terrestres de América del Norte) en los Estados Unidos y CFSv2 (Versión 2 del sistema de pronóstico climático) a nivel mundial para calibrar el balance de energía (Allen et al., 2007).

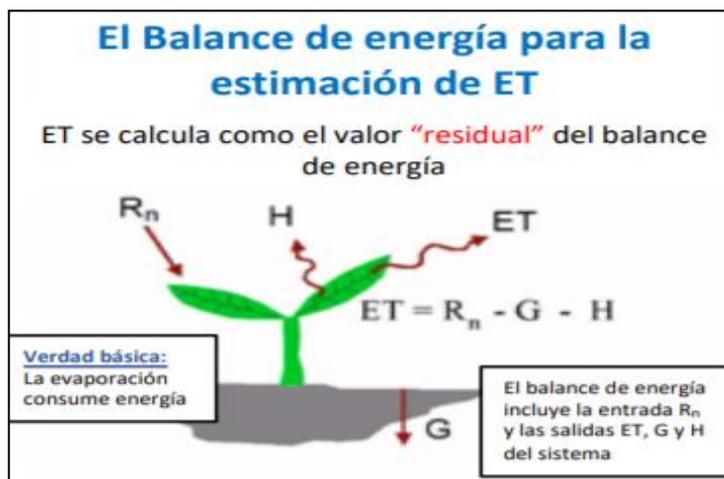


Figura 4. Representación del balance de energía para calcular la evapotranspiración.

Fuente: Tomado de Allen et al., (2002) citado por Pacheco, (2019).

En otras palabras, EEFlux utiliza algoritmos de METRIC que realizan un balance energético completo a la superficie terrestre y calcula el valor instantáneo del calor latente de vaporización (LE), expresado en $W m^{-2}$, obtenido píxel por píxel, la cual se calcula utilizando la siguiente ecuación:

Ecuación 3. Residuo de balance de energía superficial EEFlux

$$LE = R_n - G - H$$

Donde, LE es la energía latente consumida ($W m^{-2}$) siendo esta la energía térmica utilizada por el agua en su cambio de fase de líquido a gas, R_n es la densidad del flujo de radiación neta ($W m^{-2}$), G es la densidad de flujo de calor del suelo ($W m^{-2}$) que representa el calor sensible conducido al suelo y H es el flujo de calor sensible ($W m^{-2}$) en el aire. (Allen et al., 2007).

Según Villodre, (2019) menciona que ***“es habitual en la bibliografía sobre este tema se hable del calor latente de vaporización LE o ET indistintamente, ya que LE representa la energía presente destinada a la evaporación del agua ($W m^{-2}$) y ET es la masa de agua evaporada a la atmosfera (mm)”***.

La evapotranspiración (ET) en METRIC EEFlux se expresa como ET_o y ET_oF , pero al extrapolar datos instantáneos al momento de paso del satélite utiliza el término de evapotranspiración de la superficie instantánea ET_{ins} . A continuación, se definen los términos.

→ **Evapotranspiración de la superficie instantánea (ET_{ins}):**

Es el valor instantáneo de cada píxel de LE obtenido en el momento de paso del satélite como un residuo en la Ecuación 3. El valor del calor latente de

vaporización (LE) es convertido a evapotranspiración de la superficie instantánea, como se muestra en la Ecuación 4 (Pacheco, 2019).

Ecuación 4. Evapotranspiración de la superficie instantánea.

$$ET_{ins} = 3600 \times \frac{LE}{\lambda P_w}$$

Donde, ET_{ins} es la evapotranspiración de la superficie instantánea (mm h^{-1}), 3600 convierte segundos en horas, λ es el calor latente de vaporización (J kg^{-1}), P_w es la densidad del agua (1000 kg m^{-3}) y la LE se estima en el momento exacto de paso del satélite para cada píxel utilizando la Ecuación 3 (Pacheco 2019).

El calor latente de vaporización (λ) expresado como J kg^{-1} se calcula utilizando la siguiente ecuación:

Ecuación 5. Calor latente de vaporización

$$\lambda = [2.501 - 0.00236 (T_s - 273.15)] \times 10^6$$

Donde, λ es el calor latente y T_s es la temperatura de la superficie (Villodre, 2019). Es necesario transformar la ET_{ins} a evapotranspiración actual (ET_a) expresado en mm día^{-1} , ya que es uno de los datos más utilizados en aplicaciones prácticas. Para integrar estos datos EEFlux utiliza la fracción de evapotranspiración de referencia (ET_oF) y la evapotranspiración de referencia del pasto (ET_o).

→ **Evapotranspiración de referencia del pasto (ET_o):**

EEFlux se basa en la evapotranspiración de referencia del pasto (ET_o) de ASCE (American Society of Civil Engineers) para la ecuación Penman-Monteith, ver Ecuación 6 (Allen et al., 2006, 2007) y sus datos representan la tasa de evapotranspiración máxima promedio para hierba cortada. La ET_o diaria en

Estados Unidos se deriva de los datos meteorológicos cuadrículados de alta resolución espacial GRIDMET y para el resto del mundo la ET_o se deriva de datos meteorológicos cuadrículados CFSv2. Por otro lado, puede producirse un sesgo alto del 10 al 20 por ciento en la ET_o causado por la temperatura del aire y la presión de vapor en datos debido a un sesgo heredado comparándolo con un área agrícola en óptimas condiciones (Allen et al., 2007).

Ecuación 6. Evapotranspiración del cultivo de referencia de Penman-Monteith ASCE estandarizada.

$$ET_o = \frac{\left[\frac{\Delta(R_n - G) + k_1 \rho C_p \frac{(e_{sa} - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(\frac{r_c}{r_a} \right)} \right]}{\lambda}$$

Donde, ET_o es la evapotranspiración de referencia del pasto (mm día^{-1}), R_n es la radiación neta en la superficie del cultivo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$), G es el flujo de calor sensible del suelo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$), Δ es la pendiente de la curva de presión de vapor (kPa), γ es la constante psicométrica ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$), λ es el calor latente de vaporización ($\text{MJ}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$), e_{sa} es la presión de vapor a saturación de 1.5 a 2.5 m sobre el suelo (kPa), e_a es la presión de vapor actual de 1.5 a 2.5 m sobre el suelo (kPa), r_c es la resistencia superficial a la transferencia de vapor (S m^{-1}), r_a es la resistencia aerodinámica al calor sensible (S m^{-1}), k_1 es la constante para la conversión de unidades (86400 S día^{-1}), ρ es la densidad del aire a presión constante (kPa) y C_p es el calor específico del aire a presión constante ($\text{MJ kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) (Walter et al., 2000 citado por Mundo-Molina, 2009).

Fracción de Evapotranspiración de referencia de pasto (ET_oF) - estándar calibrada:

La fracción de evapotranspiración de referencia de pasto (ET_oF) es similar al coeficiente de cultivo basado en referencia de pasto de la FAO 56. La ET_oF oscila entre 0 a 1.4 y utiliza una calibración estándar automática. Se desarrolla en EEFlux utilizando la Ecuación 7 para extrapolar la evapotranspiración del instante de paso del satélite a un período de 24 horas de la imagen, adicional la imagen cuenta con una calibración automática incorporada de METRIC EEFlux (Allen et al., 2007).

Ecuación 7. Fracción de la ET de referencia de pasto – estándar calibrada.

$$ET_oF - \text{estand. calib.} = \left(\frac{ET_{ins}}{ET_o} \right)$$

Donde, ET_oF es la fracción de evapotranspiración de referencia de pasto, ET_o es la evapotranspiración de referencia de pasto y ET_{ins} es la evapotranspiración instantánea (Mundo-Molina, 2009).

→ **Evapotranspiración actual (ET_a) o evapotranspiración del cultivo (ET_c):**

Está expresada en mm día⁻¹ y es la ET_a de 24 horas de cada píxel de una imagen asociada a una fecha dada y se encuentra calibrada automáticamente dentro de METRIC EEFlux. Para obtener la ET_a debe utilizar la Ecuación 8. ET_oF se puede interpolar entre imágenes adyacentes en el tiempo.

Ecuación 8. Evapotranspiración actual para cada píxel.

$$ET_a = ET_oF \times ET_o$$

Donde, ET_a es la evapotranspiración actual para 24 horas, ET_oF es la fracción de referencia de pasto y es similar al coeficiente del cultivo y la ET_o es la evapotranspiración de referencia del pasto.

2.4 Estaciones meteorológicas

Las estaciones meteorológicas son de gran importancia en la agricultura ya que realizan mediciones puntuales de los diferentes parámetros climáticos con instrumentos adecuados que permiten establecer el comportamiento en un área de estudio.

2.4.1 Sistema meteorológico de Tempest

Descripción del sistema meteorológico Tempest marca Weatherflow:

→ Toma de datos climáticos como: temperatura, radiación solar y ultravioleta, humedad, presión barométrica, velocidad y dirección del viento, punto de rocío, golpes de rayo, lluvia, etc.

→ Sensor solar exterior con transmisión inalámbrica y actualizaciones cada tres segundos, fácil instalación del sistema. Sin partes móviles, sin mantenimiento, acceso instantáneo en línea a través de la aplicación que utiliza inteligencia artificial, página web del tiempo personal y enlace directo. Utiliza el avanzado aprendizaje de la máquina WeatherFlow para afinar la precisión de la estación y obtener mejor pronóstico local con el tiempo, además se puede compartir el panel Tempest a través de una página web especial.



Figura 5. Partes del sistema meteorológico Tempest.

Fuente: Tomado de WeatherFlowSHOP, (2020).

2.4.2 Datos meteorológicos globales para SWAT

SWAT es un sistema de datos meteorológicos globales de alta resolución provenientes del sistema de pronóstico del clima (CFSR) durante el periodo de 1979 a 2014, obtenido desde un sitio web. El archivo de datos se obtiene seleccionando la ubicación y el periodo de tiempo, donde permite la descarga de información climática diaria, tales como: precipitación, radiación solar, velocidad del viento, humedad relativa, temperatura máxima y temperatura mínima (SWAT, 1981).

2.4.3 Estaciones meteorológicas de ETESA

Según información actual de ETESA, la cuenca contempla un total de nueve estaciones meteorológicas activas y quince inactivas. Las estaciones meteorológicas activas, tipo A y B son: Laguna la Yeguada, Divisa, Santa Fe y Llano Sánchez. La estación meteorológica utilizada en el proyecto es:

→ Estación Santa Fe (132-033): Se ubica en la provincia de Veraguas a una elevación de 463 msnm. Esta estación es de tipo BC (tipo B Convencional), operada por ETESA y está en funcionamiento desde 1956. En la estación se registra la lluvia (cantidad, duración e intensidad), las temperaturas extremas y la humedad relativa a las 07:00, 13:00 y 18:00 horas.

2.5 Características de la parte alta de la cuenca

La parte alta de la cuenca del río Santa María según ANAM et al., (2009) está conformada por la Comarca Ngäbe Buglé, distrito de Nürum y la provincia de Veraguas, distritos: Calobre, Cañazas, San Francisco y Santa Fe. No obstante, este proyecto se enfoca en el distrito de Santa Fe conformado por los corregimientos: El Alto, El Pantano y Santa Fe (ver Figura 6).

2.5.1 Ubicación geográfica

El distrito de Santa Fe se ubica al norte de Veraguas, donde se localiza la Cordillera Central del país y la costa del Mar Caribe. Limita al norte con el Mar Caribe, al sur con los distritos de Cañazas y San Francisco, al oeste con la comarca Ngäbe Buglé y al este con la provincia de Colón, Coclé y el distrito de Calobre (ANAM et al., 2009).

2.5.2 Clima

Es tropical húmedo lluvioso con precipitaciones anuales de 2,500 milímetros, la media anual de la evaporación es de 1,277.5 milímetros, temperaturas anuales promedio de 23.5 °C a 24.5 °C (ANAM et al., 2009). Según el Atlas Nacional de Panamá citado por Municipio de Santa Fe et al., (2018) la zona posee los siguientes climas:

- Clima tropical húmedo con influencias monzónicas y régimen de vientos, con temperatura mínima de 18 °C, lluvias anuales de 2250 milímetros.
- Clima tropical de sabana con precipitaciones anuales de 1000 milímetros.
- Clima tropical muy húmedo y clima templado muy húmedo con temperatura media para el mes más fresco de 18 °C y precipitaciones todos los meses mayores a 60 milímetros.
- Clima templado húmedo con temperatura mínima inferior a 18 °C.

Según la clasificación climática Alberto McKay, como se aprecia en la Figura 6, las tres fincas ubicadas en el distrito de Santa Fe pertenecen a dos grupos, donde:

- **Clima tropical oceánico:** la parte noreste del estudio donde se ubican las fincas El Pantano, El Alto y parte de Santa Fe. Las fincas tienen un clima tropical oceánico con temperaturas anuales promedio que ascienden a los 25 y 27 °C, precipitaciones totales anuales de 4,346 milímetros. El clima no posee estación seca y en todos los meses caen lluvias que ascienden los 100 mm, los vientos alisios provienen del norte y del Noreste ocasionando lluvias orográficas copiosas (ANAM y BID, 2010).

→ **Clima tropical de montaña baja:** en el mapa se muestra que la zona suroeste donde se ubica parte de la finca Santa Fe que tiene un clima tropical de montaña de la vertiente del Pacífico que se sitúa desde 900 a 1,000 metros sobre el nivel del mar con precipitaciones totales altas. El efecto foehn, se produce a principios del año, es considerablemente seca para la vertiente del Pacífico con alto riesgo de incendios en regiones boscosas (ANAM y BID, 2010).

Según miembros de la cooperativa¹, el frente de lluvias procedente del sur alcanza toda la región de Santa Fe, durante los meses de junio a diciembre. El frente de lluvias del norte, llamado la nortera, llega hasta el centro poblado de Santa Fe entre los meses de octubre a febrero. La presencia de estos frentes y su convergencia en la zona norte de Santa Fe ocasiona que las áreas al norte experimenten un periodo de sequía que va desde marzo hasta el inicio o mediados de mayo, y que las áreas al sur experimenten un periodo de sequía más prolongado, siendo en algunos años desde diciembre hasta mayo.

¹ Reunión con miembros de la Cooperativa la Esperanza de los Campesinos el 26 de octubre de 2020, donde participaron los señores: Leopoldo Gonzáles (presidente de la junta de directores), Nelson Rodríguez (gerente de la cooperativa) y Francisco Pineda (administrador del departamento de producción).

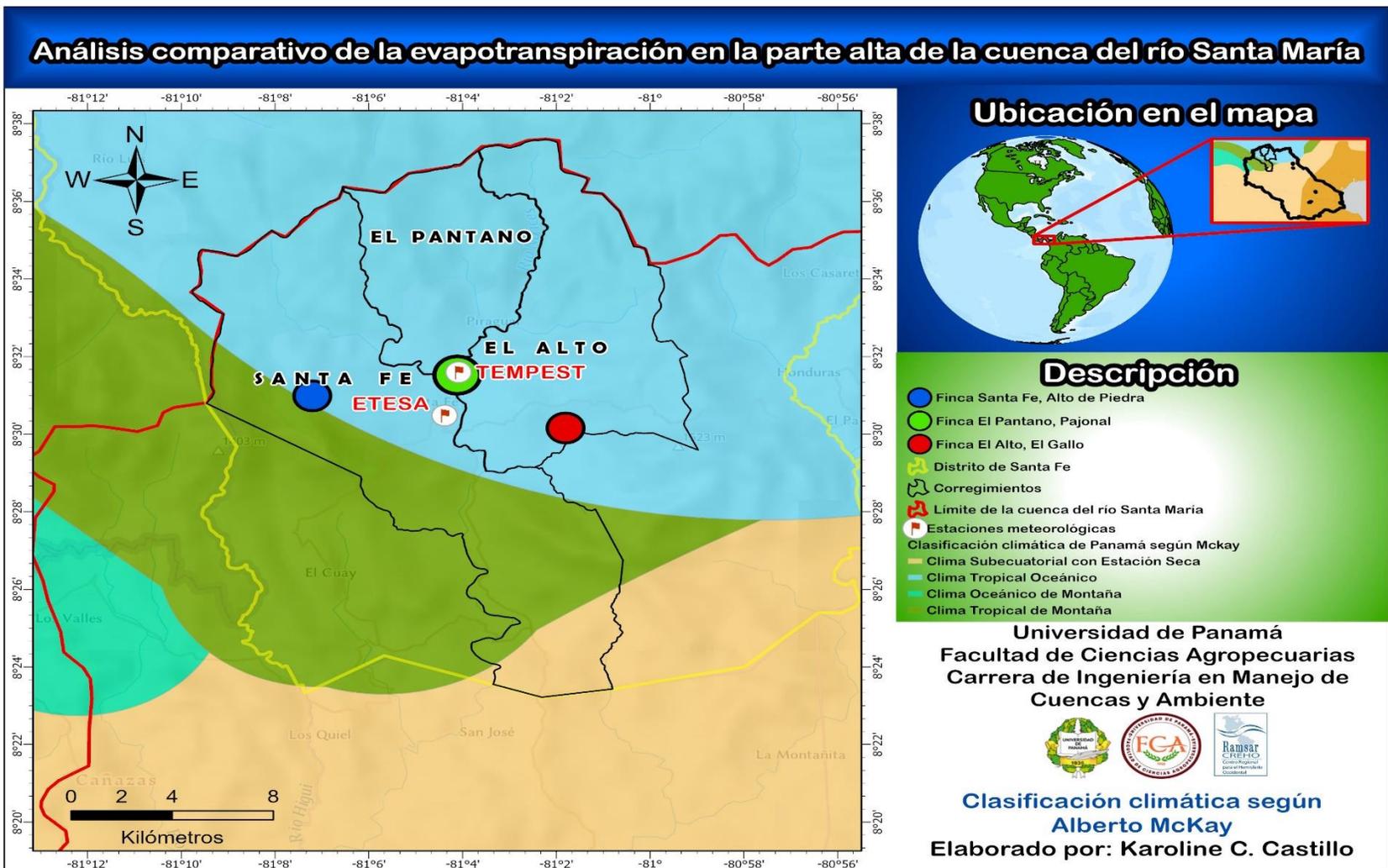


Figura 6. Clasificación climática según Alberto McKay y ubicación de las fincas.

Fuente: Elaborado en base en ANAM y BID, (2010).

2.5.3 Relieve

Según el Municipio de Santa Fe et al., (2018) la zona consta de tres regiones morfo estructurales que son:

- Región montañosa que se encuentra en la cordillera Veragüense-Coclesana y tiene alturas desde 600 a 2000 metros sobre el nivel del mar.
- Región de cerros bajos y colinas con elevaciones moderadas entre 200 a 600 metros sobre el nivel del mar ubicadas en el sur de la Cordillera Central.
- Regiones bajas y planicies litorales con elevaciones menores a 200 metros sobre el nivel del mar en las costas del Atlántico.

2.5.4 Hidrología

El distrito de Santa Fe se caracteriza por tener ríos caudalosos tanto en la vertiente del Caribe como el río Calovébora, río Belén y río Coclé. Por otro lado, en el Pacífico se encuentra el río Santa María (Municipio de Santa Fe et al., 2018). Al crear algún proyecto en la zona se contempla las futuras potencialidades donde se destaca la implementación de sistemas de riego para los cultivos y proyectos de abastecimiento de agua potable en las comunidades (ANAM et al., 2009).

2.6 Cultivo de café

En la parte alta de la cuenca el café es el principal sistema comercial y se da en dos tipos de producción: sin sombra y bajo sombra. El sistema de producción sin sombra es aquel donde se elimina la cobertura vegetal y los sistemas agroforestales bajo sombra son aquellos que incluyen árboles nativos o frutales,

generalmente en asocio con plátano, guineo y plantas medicinales (ANAM et al., 2009).

Los cafetales en las comunidades del distrito de Santa Fe se cultivan a través de semillas, seleccionando las mejores para la siembra, luego son situadas en pequeños viveros durante dos meses, para después ser colocadas en almácigos por un periodo de cinco a doce meses hasta su plantación en el campo. La distancia comúnmente utilizada en la siembra es de 2.0 por 2.5 metros, lo cual es aproximadamente 2,000 árboles por hectárea. Las cerezas de café son cosechadas después de dos a cuatro años de haber sido sembradas, usualmente una cosecha anual. Es poco común el manejo agronómico en la zona, solo se basan en la limpieza de la parcela antes de la cosecha para poder acceder a ella, mientras que algunos productores solo fertilizan una vez con abono completo y urea, generalmente se encuentran frutos de café brocados, sin aplicar alguna medida de control (ANAM et al., 2009).

La panta de café según Innatia, s/f citado por Figueroa et al., (2012); Heredia, (2011) requiere de condiciones ambientales para su óptimo desarrollo y producción tales como:

→ **Elevación:** la altura adecuada para el cultivo de café oscila entre los 500 a 1,700 metros sobre el nivel del mar. Sí se cultiva a una menor elevación de la indicada aumentan los costos de producción debido a la reducción en la calidad del grano de café, pero sí se cultiva a una mayor elevación se reduce el crecimiento de la planta.

→ **Temperatura:** la temperatura adecuada debe oscilar entre 17 a 26 grados centígrados. Sí la temperatura llega a ser inferior a 10 grados centígrados se puede disminuir el crecimiento de hojas jóvenes, quemar los brotes y presentar clorosis, amarillamiento en el tejido foliar por falta de clorofila; pero sí la temperatura supera los 27 grados centígrados habría riesgo de deshidratación y reducción de la fotosíntesis.

→ **Vientos:** es importante resaltar que los vientos no deben superar los 30 kilómetros por hora, ya que puede causar caída de las hojas, deshidratación de las yemas y daño en las flores y los frutos. Por tal razón, es recomendable escoger terrenos protegidos del viento o establecer rompevientos como medida de prevención.

→ **Precipitación:** el rango establecido de precipitación es de 1,000 a 3,000 milímetros por año para la producción de café. Sí la precipitación es superior a la establecida se producen hongos en la planta, pero si la precipitación es inferior, se reduce el crecimiento en el cultivo inclusive un periodo de sequía muy prolongado puede provocar defoliación de la planta y hasta su muerte.

→ **Humedad:** el rango de humedad relativa establecido para el buen desarrollo de la planta de café oscila entre 65 y 85 por ciento. Sí la humedad relativa supera el rango establecido, se tiene el riesgo de incrementar las enfermedades por hongos.

3 MATERIALES Y METODOLOGÍA

3.1 Materiales y equipos

3.1.1 Fuentes de datos climáticos

Las fuentes de datos climáticos utilizadas en este proyecto son:

→ Datos de imágenes satelitales Landsat de METRIC EEFlux.

Datos de imágenes satelitales Landsat obtenido de la aplicación web METRIC EEFlux versión 0.20.4 (<https://eeflux-level1.appspot.com/>), tales como: evapotranspiración de referencia del pasto (ET_o) y fracción de evapotranspiración de referencia del pasto (ET_oF – estándar calibrado) desde diciembre 2020 hasta abril 2021.

→ Estación meteorológica de Tempest.

Instalación de un Kit completo de estación meteorológica marca Tempest que incluye: dispositivo de sensor, accesorios para montaje en poste y base plana, concentrador WiFi, cable de alimentación USB y enchufe de pared. Adicional un modem con internet permanente, como se observa en el ANEXO C.

CUADRO I. INFORMACIÓN DE LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA DE TEMPEST

Estación meteorológica de Tempest						
Periodo 2020 - 2021						
Estación	Provincia	Distrito	Tipo	Altitud	Latitud	Longitud
El Pantano, Pajonal	Veraguas	Santa Fe	Automática	297 m	8°31'35"N	81°04'40"O

→ Datos meteorológicos globales para SWAT

Se descargó el formato de archivo SWAT de datos climáticos para la zona de estudio con información de: precipitación, temperatura máxima, temperatura mínima, humedad relativa del aire, radiación solar y velocidad del viento a dos metros.

CUADRO II. INFORMACIÓN DE DATOS METEOROLÓGICOS GLOBALES DE SWAT

Datos meteorológica globales de SWAT						
Periodo 1981 - 2013						
Estación	Provincia	Distrito	Tipo	Altitud	Latitud	Longitud
Santa Fe	Veraguas	Santa Fe	Satelital	854 m	8°35'10"N	80°56'15"O

Fuente: Elaborado con base en SWAT, (1981).

→ Registros de datos históricos de la estación Santa Fe (132-033) de ETESA.

Se seleccionó la estación meteorológica más cercana a las fincas, administrada por la Empresa de Transmisión Eléctrica S.A. (ETESA), donde la distancia de la estación meteorológica a las fincas es: Santa Fe, comunidad Alto de Piedra se encuentra a 5.33 km; le antecede El Alto, comunidad El Gallo a 4.83 km y finalmente la finca ubicada en El Pantano, comunidad Pajonal a 2.21 km.

Se facilitaron los siguientes datos históricos: temperatura máxima, temperatura mínima, humedad relativa del aire, radiación solar, heliofanía (horas de luz solar), y precipitación.

CUADRO III. INFORMACIÓN DE LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA DE ETESA

Estación meteorológica de ETESA						
Periodo 1981 - 2013						
Estación	Provincia	Distrito	Tipo	Altitud	Latitud	Longitud
Santa Fe (132-033)	Veraguas	Santa Fe	BC	463 m	8°30'30"N	81°04'23"O

Fuente: Elaborado con base en ETESA, (2013).

3.1.2 Software

Software utilizado en la elaboración del proyecto:

- **ArcGIS Pro-2.8.1** para el procesamiento de imágenes satelitales Landsat y edición de mapas.
- **CROPWAT 8.0** (software de diseño de riego de la FAO) se utilizó para el procesamiento de datos climáticos y el cálculo de la evapotranspiración de referencia del cultivo.
- **InfoStat – versión estudiantil** es un software estadístico que se utilizó para el análisis de la evapotranspiración.
- Microsoft Excel, Microsoft Word y CmapTools.

3.1.3 Equipos y herramientas

Los equipos y herramientas utilizados durante la elaboración del proyecto fueron:

- Una computadora con los requisitos mínimos para instalar los softwares antes mencionados.
- Utensilios de escritorio e internet.

3.2 Metodología

3.2.1 Localización y descripción de las fincas

Según comunicaciones personales con miembros locales de la Cooperativa la Esperanza de los Campesinos y agricultores, en el distrito de Santa Fe existen zonas caracterizadas por presentar diferencias en la precipitación: una zona húmeda, una zona intermedia y una zona seca. Para analizar la evapotranspiración de referencia se realizó una dinámica, con miembros de la cooperativa, donde se seleccionó una finca cafetalera por zona, teniendo en cuenta la accesibilidad.

Las tres fincas están ubicadas dentro del distrito de Santa Fe, en los corregimientos de: Santa Fe, comunidad Alto de Piedra; El Pantano, comunidad Pajonal y El Alto, comunidad El Gallo, perteneciendo así a la Cooperativa la Esperanza de los Campesinos y agricultores asociados. Cabe resaltar que, serán nombradas en este documento por corregimiento y comunidad.

→ Finca Santa Fe, Alto de Piedra: Propiedad de la Cooperativa la Esperanza de los Campesinos, se localiza geográficamente a 8.52° latitud norte y - 81.12° longitud oeste con una elevación de 816 msnm, dos años de siembra y un área de 1.04 hectáreas, la cual está cultivada con café *Coffea arabica*, variedades: obata en un 75 por ciento y marsellesa en un 25 por ciento del área total; la distancia de siembra es de 2.40 metros entre surcos y 1.50 metros entre plantas para una densidad de 2,888 plantas de café hectárea⁻¹.

La finca de café no cuenta con sombra a excepción del árbol de guabo *Inga spp*, en poco porcentaje distribuido de forma no ordenada. El suelo está protegido por plantas herbáceas y de acuerdo con el CUADRO XII el terreno presenta una pendiente moderadamente escarpada mayores a 15 por ciento como se muestra en la Figura 7.

→ Finca El Pantano, Pajonal: Propiedad de la Cooperativa la Esperanza de los Campesinos, se localiza geográficamente a 8.53° latitud norte y -81.07° longitud oeste con una elevación de 296 msnm, dos años de siembra y un área de 0.37 hectáreas. La cual está cultivada con café *Coffea canephora* y *Coffea arabica*, variedades: robusta en un cinco por ciento, obata en un 71 por ciento y caturra en un 9 por ciento del área total; la distancia de siembra es de 2.00 metros entre surcos y 2.00 metros entre plantas para una densidad de 852 plantas de café hectárea⁻¹.

La finca de café utiliza una técnica agroforestal, es decir se encuentra en condiciones de sombra en forma no ordenada, constituida principalmente por: plátano *Musa spp* y especies arbóreas como: higuera y ceiba.

El suelo está protegido por plantas herbáceas y de acuerdo con el CUADRO XII el terreno presenta una pendiente ligeramente inclinada mayor a 5 por ciento como se muestra en la Figura 7.

→ Finca El Alto, El Gallo: Propiedad del señor Harmodio Cisneros Rodríguez, socio de la Cooperativa la Esperanza de los Campesinos, se localiza geográficamente a 8.50° latitud norte y -81.03° longitud oeste con una elevación de 426 msnm y un área de 0.64 hectáreas. La cual está cultivada con café *Coffea*

arabica, variedades: caturra en un 22 por ciento, catimor en un 68 por ciento y castillo en un 10 por ciento del área total; la distancia de siembra es de 2.00 metros entre surcos y 1.80 metros entre plantas para una densidad de 1777 plantas de café hectárea⁻¹.

La finca de café utiliza una técnica agroforestal, es decir se encuentra en condiciones de sombra en forma no ordenada, constituida principalmente por especies arbóreas como: guaba machete *Inga spp* y guabo cansa boca *Inga spp*. El suelo está protegido por plantas herbáceas y de acuerdo con el CUADRO XII el terreno presenta una pendiente moderadamente escarpada mayores a 15 por ciento como se muestra en la Figura 7.

Los rangos de la gradiente de pendiente del suelo que se muestra en la Figura 7 se basa en valores determinados por la FAO, (2009) como se indican en el CUADRO XII.

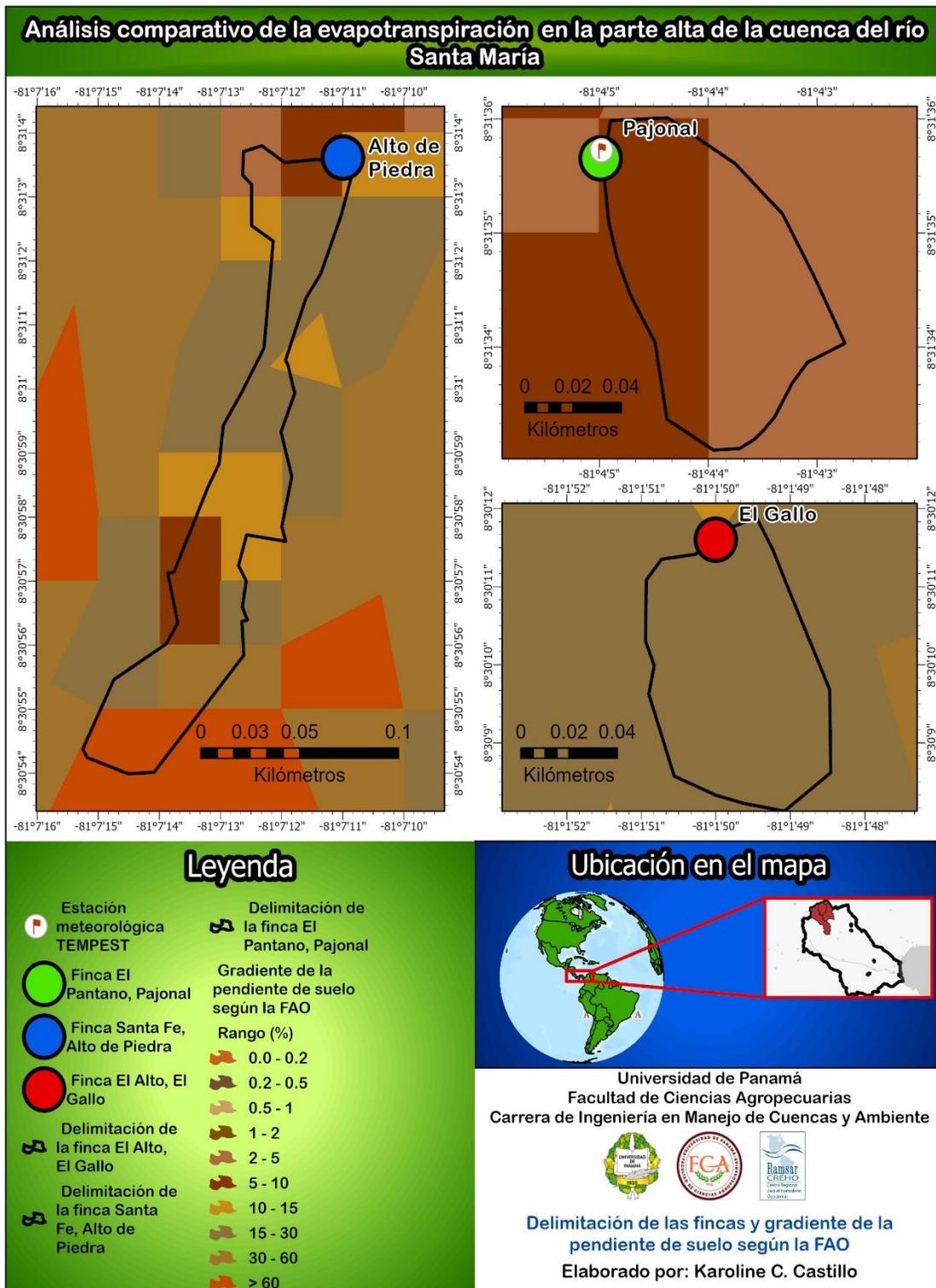


Figura 7. Delimitación de las fincas y gradiente de la pendiente de suelo.

Fuente: Elaborado con base en FAO, (2009).

3.2.2 Proceso metodológico para el cálculo de la Evapotranspiración

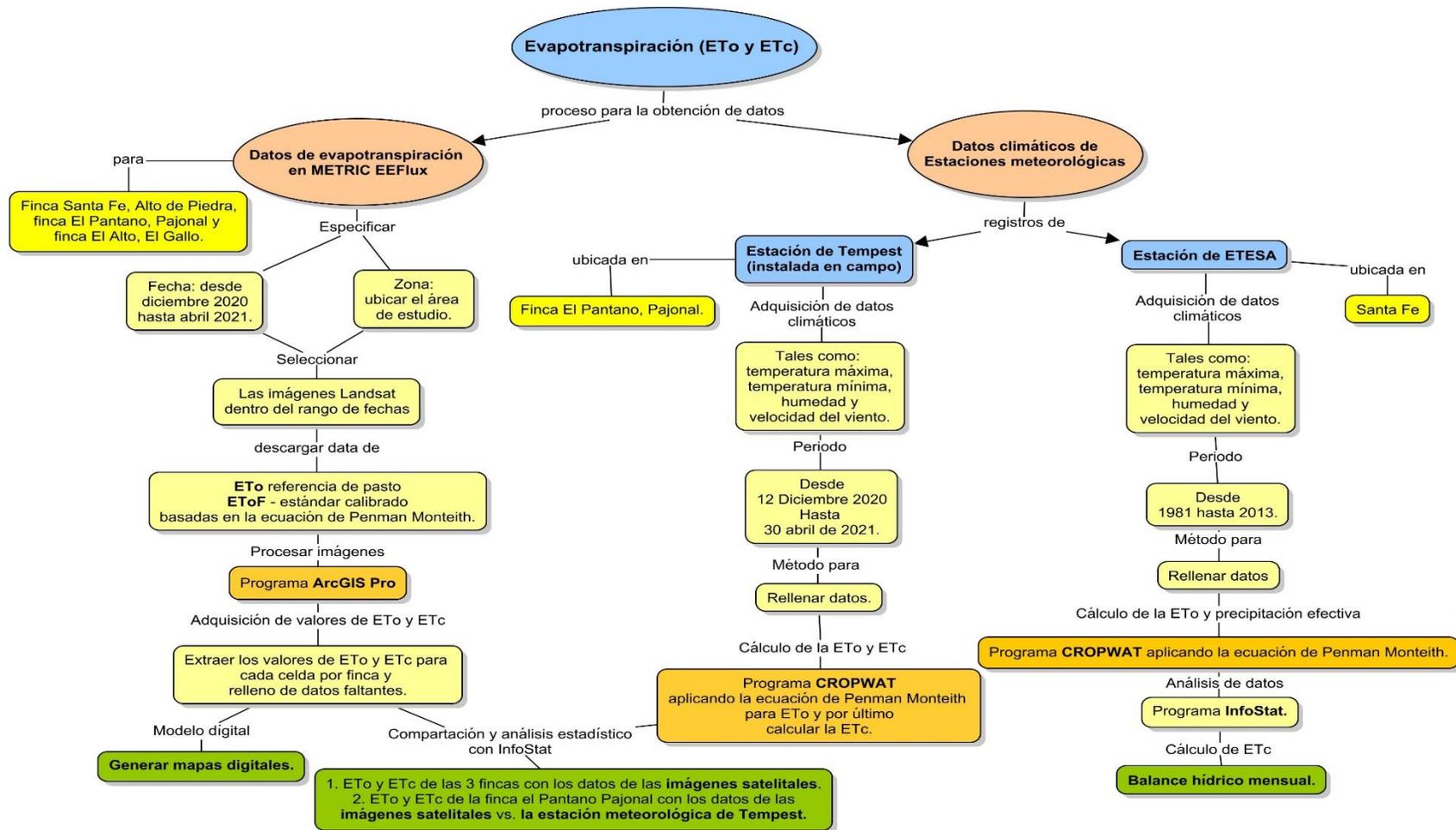


Figura 8. Proceso metodológico para el cálculo de la evapotranspiración.

La primera etapa, consistió en la adquisición de datos de imágenes satelitales con datos de la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o) y la evapotranspiración del cultivo (ET_a) calculada con el método de Penman-Monteith. Los registros fueron extraídos del sitio web METRIX EEFlux para las tres fincas de estudio, durante la época seca, luego se procesaron a través del programa ArcGIS Pro y finalmente se realizó una comparación entre cada una de las fincas para identificar si existe una zona húmeda, intermedia o seca. Cabe resaltar que la simbología de ET_a y ET_c para efecto de esta investigación significan evapotranspiración del cultivo.

La segunda etapa, se basó en la comparación y análisis estadístico de datos climáticos de la estación meteorológica de Tempest (instalada en la finca El Pantano, Pajonal) con los resultados de las imágenes satelitales Landsat, durante la época seca, utilizando los programas CROPWAT e InfoStat. Finalmente, se calculó un balance hídrico, con los datos climáticos históricos de la estación de ETESA, en un periodo de 33 años de registros (1981-2013).

Los cálculos de evapotranspiración se basaron en el método Penman-Monteith, así como sugiere un estudio de evaluación de métodos para calcular la evapotranspiración, realizado en la Universidad de Panamá (Guerra, 2016). Además, este método es propuesto por la FAO debido a que tiene mayor ajuste tanto en zonas áridas como templadas y tropicales (Allen et al., 2006).

I.Imágenes satelitales Landsat de METRIC EEFlux.

La adquisición de imágenes satelitales Landsat se realizó al ingresar en el sitio web METRIC EEFlux, después se ubicó el pin en la zona de interés dentro del mapa de Google, luego se especificó la fecha de interés comprendido en un periodo de cinco meses, desde diciembre 2020 hasta abril 2021. Una vez colocado los datos, EEFlux generó aquellas imágenes Landsat 7 y Landsat 8 que se encontraban dentro del rango especificado y cubriendo solo el área indicada. Es importante resaltar que la periodicidad de las imágenes son de siete días, por lo tanto, están sujetas al paso del satélite.

Las imágenes además de brindar datos de evapotranspiración, proporcionó el porcentaje de nubosidad de cada escena, esta información es relevante ya que se puede decidir si la imagen es de utilidad, esto se debe a que un alto porcentaje de nubosidad no brinda los datos necesarios para llevar a cabo la investigación.

Tomando en consideración el párrafo anterior, se seleccionó la imagen y se descargaron las capas de evapotranspiración de referencia de pasto (ET_o) y fracción de la evapotranspiración de referencia de pasto – estándar calibrada (ET_{oF} - estándar calibrado). Es importante señalar que, EEFlux generó las capas de las imágenes utilizadas con el método de Penman Monteith (Allen et al. 2006). La metodología para la descarga de los datos de observa paso a paso en el ANEXO G.

Posteriormente, se obtuvo 38 imágenes provenientes de Landsat 7 y Landsat 8 con una periodicidad de siete días (ver Figura 14, Figura 15, Figura 16, Figura 17, Figura 18 y Figura 19).

Luego, se procesaron con el software ArcGIS Pro y se estimó la evapotranspiración (ET_o y ET_a) en la que se estableció un rango de valores diferenciados por color y se identificaron las zonas con mayor y menor evapotranspiración del cultivo de café (ET_c). El color verde representó la ET_c en un rango de $0.01 - 1.50 \text{ mm día}^{-1}$, verde caña $1.51 - 2.50 \text{ mm día}^{-1}$, amarillo $2.51 - 3.50 \text{ mm día}^{-1}$, naranja $3.51 - 5.00 \text{ mm día}^{-1}$ y rojo $> 5.00 \text{ mm día}^{-1}$.

. Donde, ET_a es la evapotranspiración actual para 24 horas, ET_oF es la fracción de referencia de pasto y es similar al coeficiente del cultivo y la ET_o es la evapotranspiración de referencia del pasto.

$$ET_a = ET_oF \times ET_o$$

En otras palabras, la capa de la ET_o se multiplicó con la ET_oF -estándar calibrado en el software ArcGIS Pro con la herramienta calculadora ráster para interpolar la evapotranspiración a 24 horas. La lectura de la evapotranspiración se realizó para cada píxel donde se localizaba cada una de las tres fincas de estudio.

II. Datos climáticos de la estación meteorológica de Tempest y la estación meteorológica de ETESA.

Los datos climáticos se obtuvieron a través de dos estaciones meteorológicas:

→ Estación meteorológica de Tempest

La estación meteorológica de Tempest se instaló el 12 de diciembre del 2020, hora 11:26 AM, a dos metros de altura en el corregimiento El Pantano, comunidad Pajonal, como se describe en el CUADRO I, con el apoyo del equipo CREHO RAMSAR, el MSc Conrado de León y el Lic. Cándido Carpintero y un miembro de la Cooperativa la Esperanza de los Campesinos, el señor Francisco Pineda del departamento de producción, ver ANEXO C, Figura 22. Se seleccionó una finca perteneciente a la Cooperativa La Esperanza de los Campesinos, miembro colaborador del proyecto Garantizando la Seguridad Hídrica en los Bosques de Montaña y Humedales del Río Santa María, como punto de instalación.

El sistema instalado requirió de un modem de internet para poder almacenar los datos en la nube y recolectar la información, a través de la aplicación Tempest Weather por medio del teléfono celular, ver ANEXO C, Figura 23. El almacenamiento del sistema Tempest en campo es de siete días, por lo tanto, se realizaba una visita cada semana al sistema meteorológico para actualizar y registrar los datos de forma permanente en la nube, reflejados en la aplicación del celular. Se recolectó información diaria de temperatura máxima, temperatura mínima, humedad relativa y velocidad del viento en el periodo de diciembre 2020 hasta abril 2021, luego se analizó en el programa CROPWAT que utiliza la ecuación de Penman Monteith de la FAO y, por último, se agrupó la información en tablas utilizando Microsoft Excel.

→ Estación meteorológica de ETESA

La estación meteorológica de ETESA seleccionada para el proyecto es Santa Fe 132-033 y se encuentra ubicada en el distrito y corregimiento de Santa Fe, como se describe en el CUADRO III. La estación se seleccionó principalmente por su situación geográfica con respecto a la distancia de las tres fincas seleccionadas y por tener una serie extensa de registros fiables con un alto porcentaje del total de datos climáticos diarios y de precipitación.

En primera instancia, se seleccionó las estaciones tipo A² y B³ dentro de la cuenca, sin embargo, solo la estación tipo B³ cumplió con el primer criterio. De hecho, el periodo de registro de la estación meteorológicas de ETESA es de 33 años, desde 1981 hasta el 2013, donde se consideró por la mayor abundancia de registros climáticos tales como: temperatura máxima, temperatura mínima, humedad relativa y precipitación, que posteriormente se analizó en el programa CROPWAT y se agrupó la información en tablas utilizando Excel. Cabe resaltar que, la estación meteorológica de ETESA no contaba con datos de registro de viento, por ser una estación tipo B y se descargó la información de la base de datos meteorológicos globales SWAT para el mismo periodo de tiempo (los datos se muestran en el CUADRO II). La ubicación geográfica de la estación meteorológica de Tempest y la estación meteorológica de ETESA se ven reflejadas en la Figura 9.

² Estación meteorológica tipo A registra precipitación, temperatura, humedad relativa, presión barométrica, viento, radiación y horas de sol, evaporación y temperatura del suelo.

³ Estación meteorológica tipo B registra precipitación, temperaturas extremas, humedad relativa, radiación solar y presión barométrica.

Análisis comparativo de la evapotranspiración en la parte alta de la cuenca del río Santa María

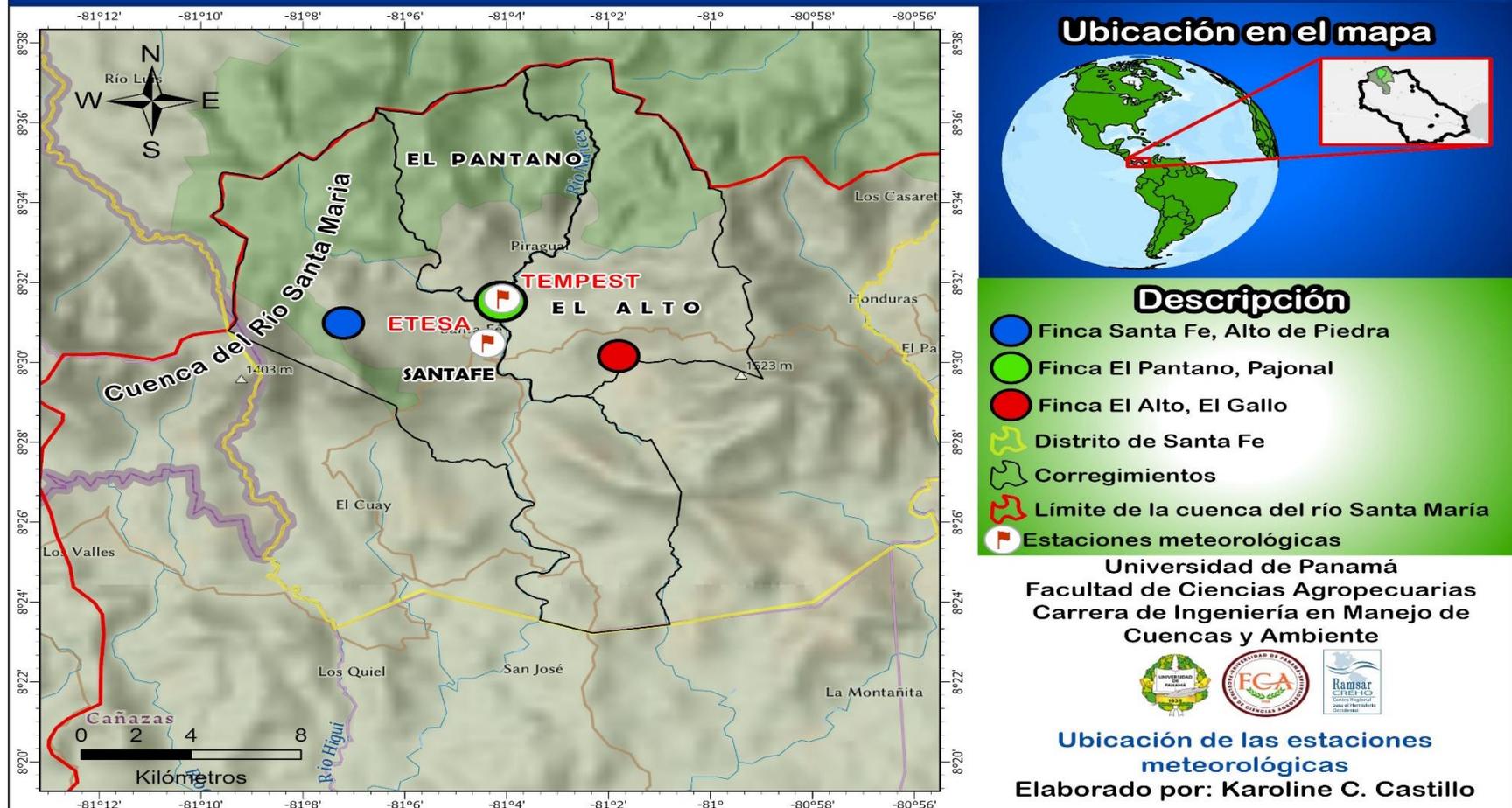


Figura 9. Ubicación de las estaciones meteorológicas de Tempest y de ETESA.

→ **Procesamiento de datos CROPWAT**

Se utilizó el programa CROPWAT que aplica la metodología de la FAO (Allen et al. 2006) por medio de la Ecuación 2 de Penman-Monteith para calcular la evapotranspiración de referencia del cultivo (ET_0). Los parámetros que utiliza el programa para calcular la evapotranspiración son: la elevación, latitud, longitud, temperatura máxima ($^{\circ}C$), temperatura mínima ($^{\circ}C$), humedad relativa (%), horas de brillo solar (h), velocidad del viento a 2 m de altura ($m\ s^{-1}$), radiación solar ($MJ\ m^{-2}\ día^{-1}$) y precipitación ($mm\ mes^{-1}$) (Allen et al. 2006).

Las estaciones meteorológicas de Tempest y de ETESA fueron utilizadas para calcular la ET_0 . En primer lugar, para la estación meteorológica de Tempest se aplicó una serie de datos diarios en los cinco meses de estudio, que se comparó con los datos de las imágenes satelitales Landsat y, en segundo lugar, para la estación de ETESA se utilizó una serie de datos mensuales en un periodo de 33 años para calcular un balance hídrico mensual. Cabe señalar que el programa CROPWAT presenta un ícono de estimación habilitado para realizar aproximaciones en los valores de humedad, velocidad del viento, insolación y radiación solar (ver ANEXO A, CUADRO X y CUADRO XI). Para efecto de la investigación se utilizó el ícono para calcular datos de insolación, radiación y algunos datos faltantes para ambas estaciones. El procedimiento sobre el uso del programa CROPWAT se detalla en el ANEXO H.

3.2.3 Comparación de la evapotranspiración de imágenes satelitales Landsat y datos de la estación meteorológica de Tempest

Se realizó un análisis de comparación tanto para la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o) como para la evapotranspiración del cultivo de café (ET_c). Primero, se hizo la comparación de la evapotranspiración ET_o y ET_c de las tres fincas utilizando solo datos de las imágenes satelitales y colocándolos en cuadros de Microsoft Excel. Los primeros cuadros, contienen datos de las imágenes satelitales Landsat de ET_o y ET_c de las tres fincas: Santa Fe, Alto de Piedra; Pantano, Pajonal y El Alto, El Gallo, los datos se analizaron para conocer diferencia de evapotranspiración en cada zona. Segundo, se hizo un análisis comparativo de la evapotranspiración de ET_o y ET_c , solo con datos de la finca El Pantano, Pajonal, evaluando los resultados de las imágenes satelitales Landsat y la estación meteorológica de Tempest.

En ambos casos, el análisis estadístico se realizó mediante regresión lineal y se calculó el coeficiente de determinación (R^2) a fin de que el resultado de este coeficiente oscile entre cero y uno. Además, se contempló la prueba ANOVA, que es un análisis de varianza que compara las medias entre las muestras y la prueba de Tukey, que agrupa dichas muestras para compararlas entre sí, ambas mediante el programa InfoStat.

→ **Coefficiente de determinación**

El coeficiente de determinación (R^2) es una medida relativa del grado de asociación lineal entre x e y (Porras 2000). De hecho, cuanto más cerca de uno (1), mayor se ajustará el modelo a la variable real y cuanto más cerca este de cero (0) menos ajustado estará el modelo, por lo tanto, será menos confiable

Ecuación 9. Coeficiente de determinación

$$R^2 = \frac{[n \sum x_i y_i - (\sum x_i * \sum y_i)]^2}{\{[n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2] * [n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2]\}}$$

Donde, y_1 es el valor simulado y corresponde al valor en “y” y x_1 es el valor observado y corresponde al valor en “x” según Sagaro & Macias, (2005) citado por Guerra, (2016).

Se han propuesto rangos de interpretación del coeficiente de determinación (R^2) por varios autores según Sagaro & Macias, (2005) citado por Guerra, (2016), donde se menciona que existe una relación para el análisis de resultados empleando los datos del CUADRO IV que se muestra a continuación.

CUADRO IV. RANGOS DEL COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN PARA INTERPRETACIÓN

Rangos del coeficiente de determinación	
Coeficiente de Determinación	Relación entre las variables analizadas
0,00 - 0,06	Nula, escasa o despreciable
0,07 - 0,25	Débil, baja
0,26 - 0,56	Moderada
0,57 - 0,81	Fuerte, alta
0,82 - 1,00	Muy fuerte, muy alta

Fuente: Sagaro & Macias, (2005) citado por Guerra, (2016).

→ **Procesamiento de datos InfoStat**

Se calculó la varianza entre los datos de evapotranspiración en las fincas Santa Fe, comunidad Alto de Piedra; El Pantano, comunidad Pajonal y El Alto, comunidad El Gallo aplicando solo el uso de imágenes de METRIC EEFlux. Luego, se comparó los resultados de evapotranspiración entre las imágenes satelitales Landsat con la estación de Tempest solo para la finca El Pantano, Pajonal. En ambos casos, se realizó el análisis de varianza y la prueba de Tukey.

Según Bakieva et al. (2010), el análisis de varianza (ANOVA) es un factor que compara variables cuantitativas y es aplicable para comparar la igualdad de medias poblacionales con una distribución normal. Se evalúan las medias poblacionales a través del siguiente esquema de hipótesis:

H₀= Las medias poblacionales son iguales

H₁= Al menos dos medias poblacionales son distintas

Donde, P valor = 0.05:

P valor \geq 0.05 acepta la hipótesis planteada.

P valor \leq 0.05 se rechaza la hipótesis planteada.

El método o prueba de Tukey es utilizado en conjunto con el análisis de varianza (ANOVA) para calcular la diferencia entre las medias poblacionales y realizar comparaciones con el valor crítico (Bakieva et al. 2010). Los datos se interpretan según el nivel de significancia, por ello para esta investigación se utilizó el valor de significancia de 0.05, utilizado para estudios realizados en campo, de modo

que sí el valor de significancia es igual o menor a 0,05 hay diferencias significativas entre los grupos formados, pero si el valor de significancia es mayor a 0,05 no hay diferencias significativas entre los grupos evaluados. La prueba de Tukey agrupa las medias utilizando letras, sí dos medias comparten todas las letras entre sí, significa que sus medias son parecidas y no hay diferencia significativa, por otro lado, las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

3.2.4 Cálculo del balance hídrico mensual con la estación meteorológica de ETESA

El cálculo del balance hídrico mensual se realizó con la media de los datos históricos mensuales de precipitación y evapotranspiración de referencia (ET_o), procesados con el programa CROPWAT.

→ Procesamiento de datos CROPWAT

Se calculó la precipitación efectiva, fracción de la precipitación total aprovechada por las plantas, utilizando la siguiente ecuación con el programa CROPWAT FAO/AGLW.

Ecuación 10. Precipitación efectiva CROPWAT FAO/AGLW

$$P_{pte} = 0.6 * ppt - 10 \text{ para } P_{pt} \leq 70 \text{ mm}$$

$$P_{pte} = 0.8 * ppt - 24 \text{ para } P_{pt} > 70 \text{ mm}$$

Donde, P_{pte} es la precipitación efectiva en milímetros y P_{pt} es la precipitación en milímetros.

Luego de obtener los valores de precipitación efectiva y evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_0), se procedió a identificar la etapa de desarrollo del cultivo y se seleccionó el valor correspondiente al coeficiente de cultivo (K_c) por medio de tablas propuestas en el documento FAO 56 (Allen et al., 2006), como se muestra en el CUADRO IX.

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Resultados de la evapotranspiración

Los resultados se analizaron en dos pasos, el primero donde se comparó la evapotranspiración en las tres fincas. por medio de las imágenes satelitales Landsat y segundo, se comparó los resultados de la finca el Pantano, Pajonal entre las imágenes satelitales Landsat y la estación meteorológica de Tempest.

4.1.1 Análisis comparativo de la evapotranspiración en las fincas por medio de las imágenes satelitales Landsat en METRIC EEFlux

Los resultados de la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o) se muestran en el CUADRO XXVII, la fracción de la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_oF - estándar calibrado) en el CUADRO XXVIII y la evapotranspiración del cultivo de café (ET_c) en el

CUADRO **XXIX**. En los cuadros de datos se describe el estado de la imagen al obtener cada una. Es importante mencionar que, se tomó en consideración la disponibilidad de imágenes, cada una con un intervalo de 7 días, desde diciembre 2020 hasta abril 2021, estas hacen un total de 38 imágenes.

En primer lugar, se realizó un análisis comparativo de las tres fincas solo con los datos generados de ET_o y ET_c de las imágenes satelitales Landsat de METRIC EEFlux. Segundo, se comparó los datos de ET_o y ET_c con la finalidad de obtener valores de correlación de las tres fincas utilizando el valor del coeficiente de determinación R^2 , basados en los rangos de interpretación del CUADRO IV. Tercero, con fines estadísticos para analizar la diferencia de evapotranspiración

en cada zona, se aplicó la prueba ANOVA y la prueba de Tukey mediante el programa InfoStat.

→ Resultados de la comparación de ET_0 con imágenes satelitales Landsat

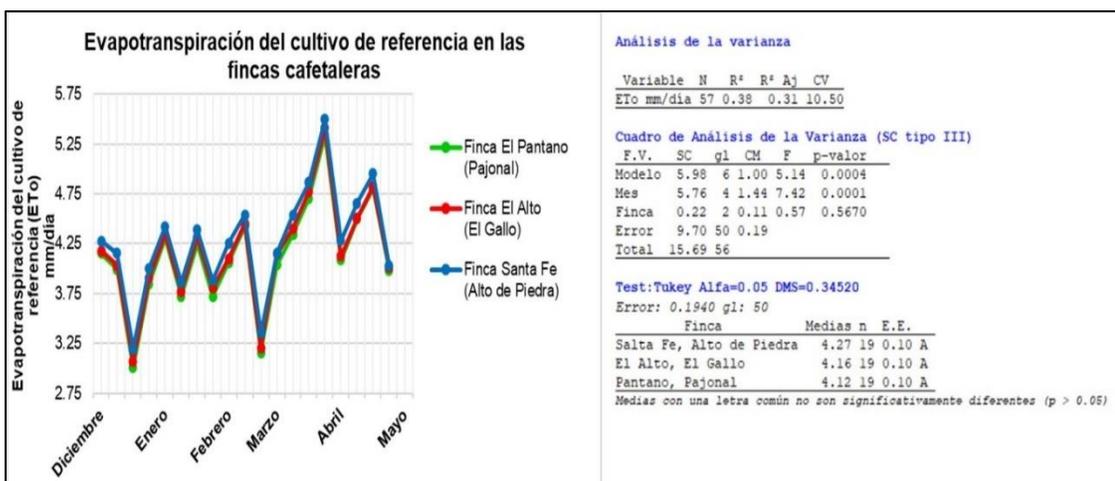


Figura 10. Gráfico de la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_0) en las tres fincas cafetaleras (izquierda), además los resultados del análisis de varianza de la prueba de ANOVA (derecha superior) y resultados de la prueba de Tukey (derecha inferior).

Según la información de la Figura 10, se evaluó la ET_0 con el método de Penman Monteith utilizando las imágenes satelitales en las tres fincas, en el análisis estadístico (ANOVA), el valor de p igual a 0.57, indica no hubo diferencia significativa en la ET_0 utilizando las imágenes satelitales Landsat.

La prueba de Tukey indicó que no hubo diferencias significativas en los valores de ET_0 para las tres fincas. La finca con mayor ET_0 fue Santa Fe, Alto de Piedra con una media de 4.27 mm día^{-1} ; seguido de El Alto, El Gallo con 4.16 mm día^{-1} y finalmente El Pantano, Pajonal con 4.12 mm día^{-1} .

→ Resultados de la comparación de ET_c con imágenes satelitales Landsat

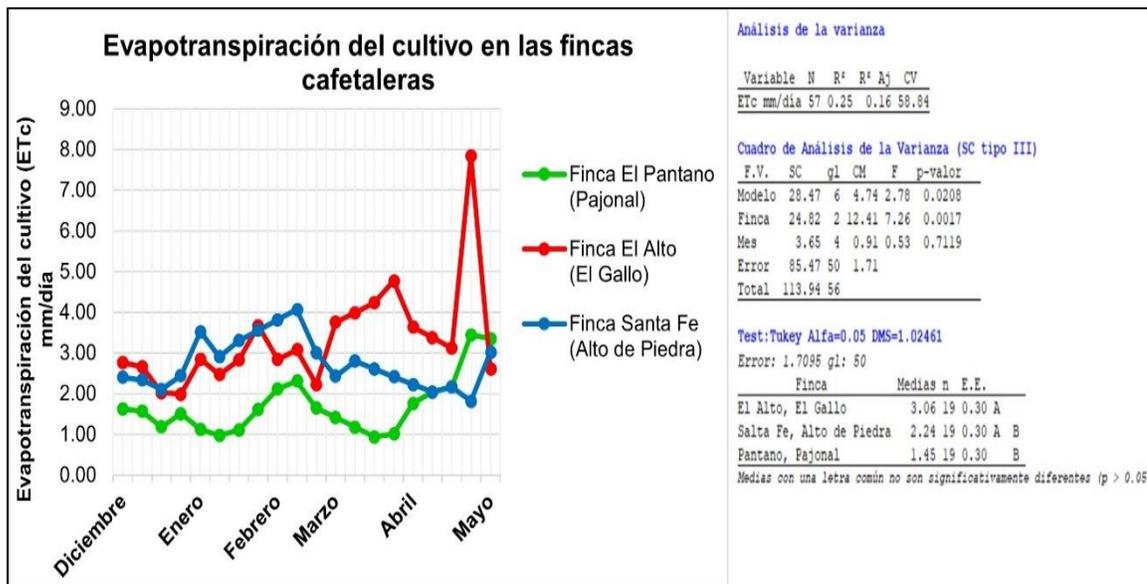


Figura 11. Gráfico de la evapotranspiración del cultivo (ET_c) en las tres fincas (izquierda), además los resultados del análisis de varianza de la prueba de ANOVA (derecha superior) y la prueba de Tukey (derecha inferior).

Según la información de la Figura 11, se evaluó la ET_c con el método de Penman Monteith utilizando las imágenes satelitales de las tres fincas, se encontró que el análisis estadístico, con un valor de p igual a 0.0017, indica que hubo diferencias altamente significativas entre los valores de ET_c .

Al mismo tiempo, la prueba de Tukey indicó que estadísticamente los valores de ET_c para las fincas El Alto, El Gallo y El Pantano, Pajonal fueron significativamente diferentes, más al comparar estas fincas con Santa Fe, Alto de piedra no se encontraron diferencias significativas. Los resultados numéricos mostraron que la finca con mayor ET_c es El Alto, El Gallo con una media de 3.06 mm día^{-1} ; seguido de Santa Fe, Alto de piedra con 2.24 mm día^{-1} y El Pantano, Pajonal con 1.45 mm día^{-1} .

4.1.1.1 Análisis comparativo entre las imágenes satelitales Landsat en METRIC EEFlux y la estación meteorológica Tempest

Se realizó un análisis comparativo de la finca El Pantano, Pajonal con los datos de las imágenes satelitales Landsat y la estación meteorológica de Tempest, tanto para la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o) presente en el CUADRO **XXX**, como para la evapotranspiración del cultivo (ET_c) señalada en el CUADRO **XXXI**. Los resultados del análisis estadístico fueron ejecutados de la misma manera que el caso anterior, en la que se calculó el valor del coeficiente de determinación R^2 , se aplicó la prueba de ANOVA y la prueba de Tukey mediante el programa InfoStat.

→ Resultados de la comparación de evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o) con imágenes satelitales Landsat y la estación meteorológica de Tempest

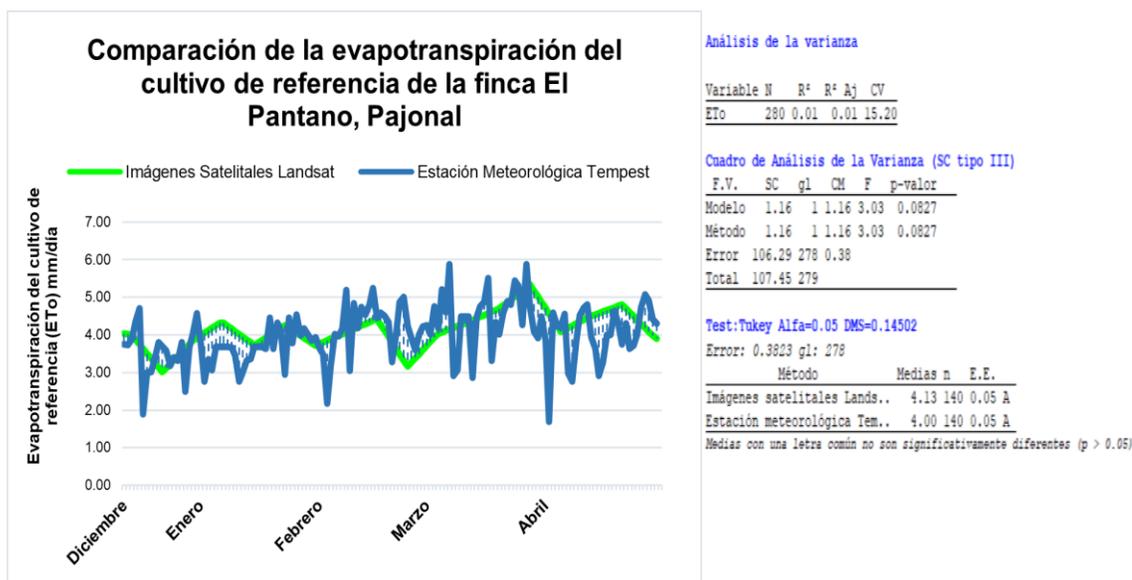


Figura 12. Gráfico de Comparación de la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o) en la finca El Pantano, Pajonal (izquierda), además los resultados del análisis de varianza de la prueba de ANOVA (derecha superior) y resultados de la prueba de Tukey (derecha inferior).

Según la información de la Figura 12, se evaluó la ET_o de la finca El Pantano, Pajonal con el método de Penman Monteith utilizando los datos de las imágenes satelitales Landsat y la estación meteorológica de Tempest. El análisis estadístico, con un valor de p igual a 0.08, indica que no hubo diferencias significativas en la determinación de la evapotranspiración de referencia (ET_o) utilizando las imágenes satelitales Landsat y los datos de la estación meteorológica de Tempest en la finca El Pantano, Pajonal.

Al mismo tiempo, la prueba de Tukey indicó que estadísticamente los valores de ET_0 para la finca El Pantano, Pajonal no fueron significativas utilizando ambas metodologías. La ET_0 utilizando las imágenes satelitales Landsat tuvo una media de 4.13 mm día^{-1} y 4.00 mm día^{-1} utilizando los datos de la estación meteorológica de Tempest.

→ Resultados de la comparación de evapotranspiración del cultivo de café (ET_c) con imágenes satelitales Landsat y la estación meteorológica Tempest

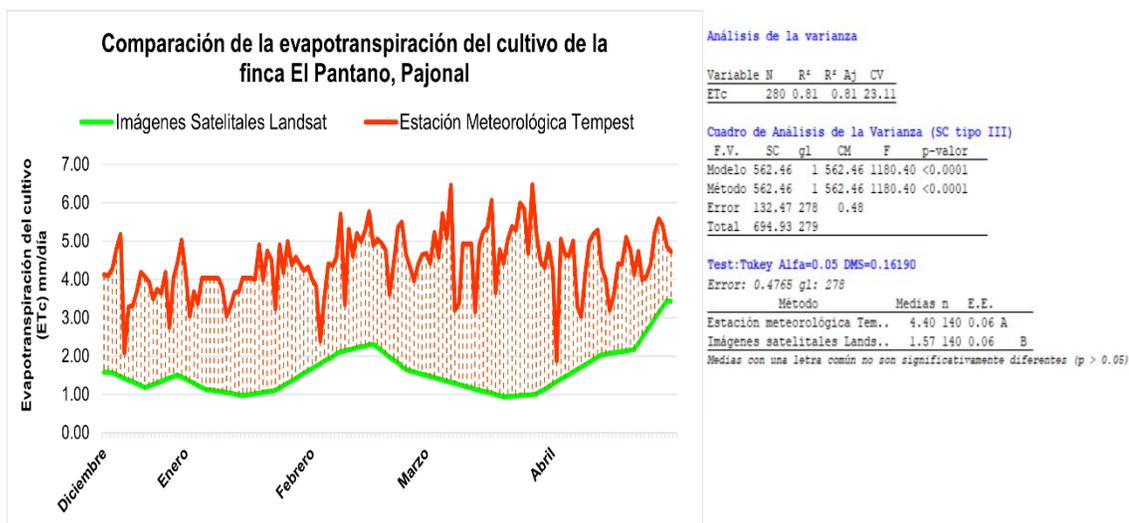


Figura 13. Gráfico de Comparación de la evapotranspiración del cultivo de café (ET_c) en la finca El Pantano, Pajonal (izquierda), además los resultados del análisis de varianza de la prueba de ANOVA (derecha superior) y resultados de la prueba de Tukey (derecha inferior).

Según la información de la Figura 13, se evaluó la evapotranspiración del cultivo (ET_c) de la finca El Pantano, Pajonal con el método de Penman Monteith utilizando los datos de las imágenes satelitales y la estación meteorológica de Tempest. El análisis estadístico, con un valor de p de 0.0001, indica que hubo diferencias altamente significativas al comparar la evapotranspiración del cultivo (ET_c)

utilizando los datos de la estación meteorológica de Tempest con los datos de las imágenes satelitales Landsat, en la finca El Pantano, Pajonal.

Al mismo tiempo, la prueba de Tukey indicó que estadísticamente los valores de ET_c para la finca El Pantano, Pajonal fueron distintos y hubo diferencias altamente significativas utilizando ambas metodologías. Mayor ET_c se obtuvo con la estación meteorológica de Tempest con 4.40 mm día^{-1} y 1.57 mm día^{-1} con las imágenes satelitales Landsat.

4.1.1.2 Resultado de los mapas generados en ArcGIS Pro.

En las siguientes figuras, se muestran los resultados generados de la evapotranspiración del cultivo de café para las tres fincas: Santa Fe, Alto de Piedra; El Pantano, Pajonal y El Alto, El Gallo desde diciembre del 2020 hasta abril 2021. (ver Figura 14, Figura 15, Figura 16, Figura 17, Figura 18 y **Figura 19**).

Análisis comparativo de la evapotranspiración en la parte alta de la cuenca del río Santa María

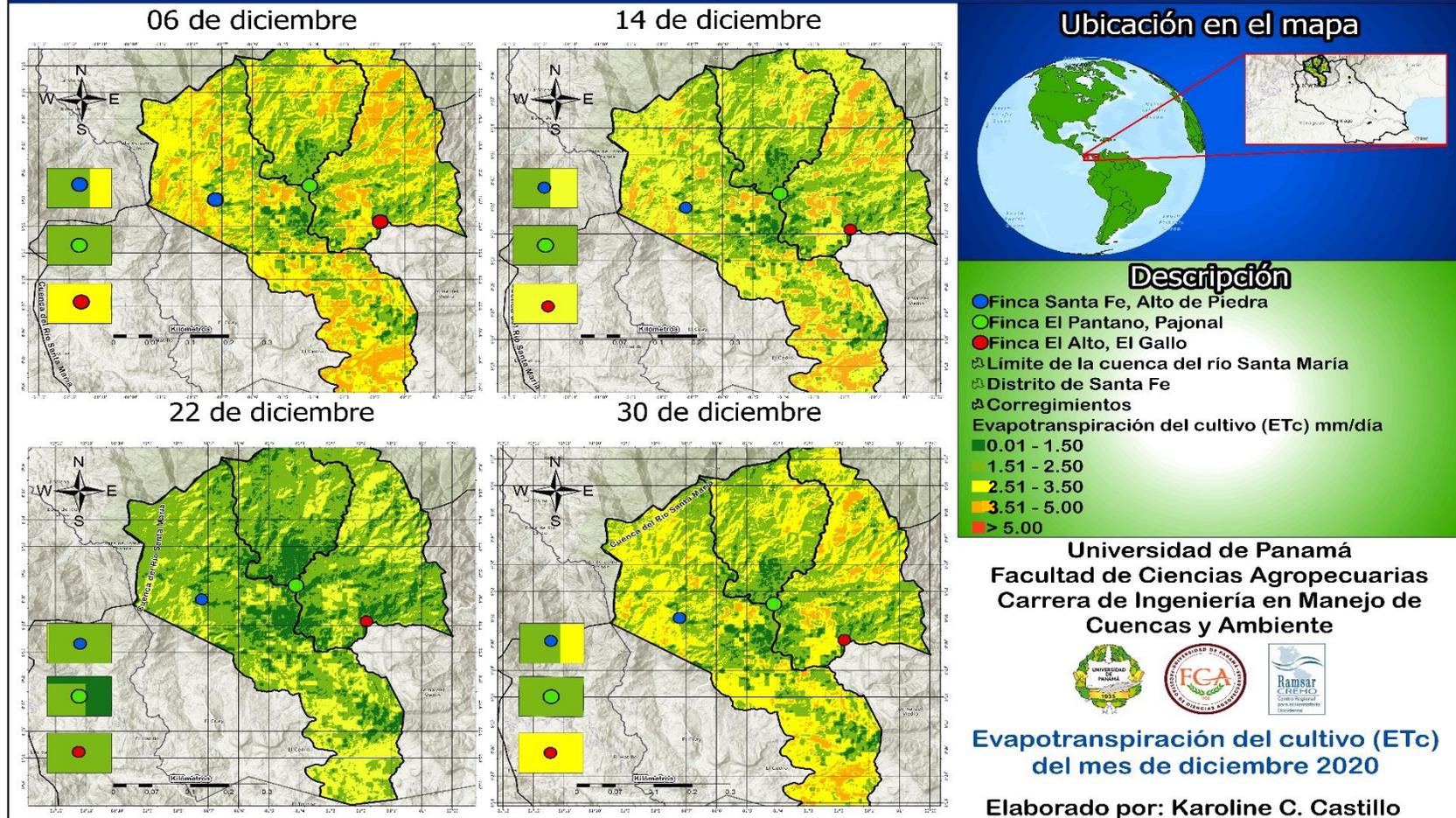


Figura 14. Mapa de la evapotranspiración del cultivo de café en el mes de diciembre con imágenes Landsat - METRIC EEFlux.

Análisis comparativo de la evapotranspiración en la parte alta de la cuenca del río Santa María

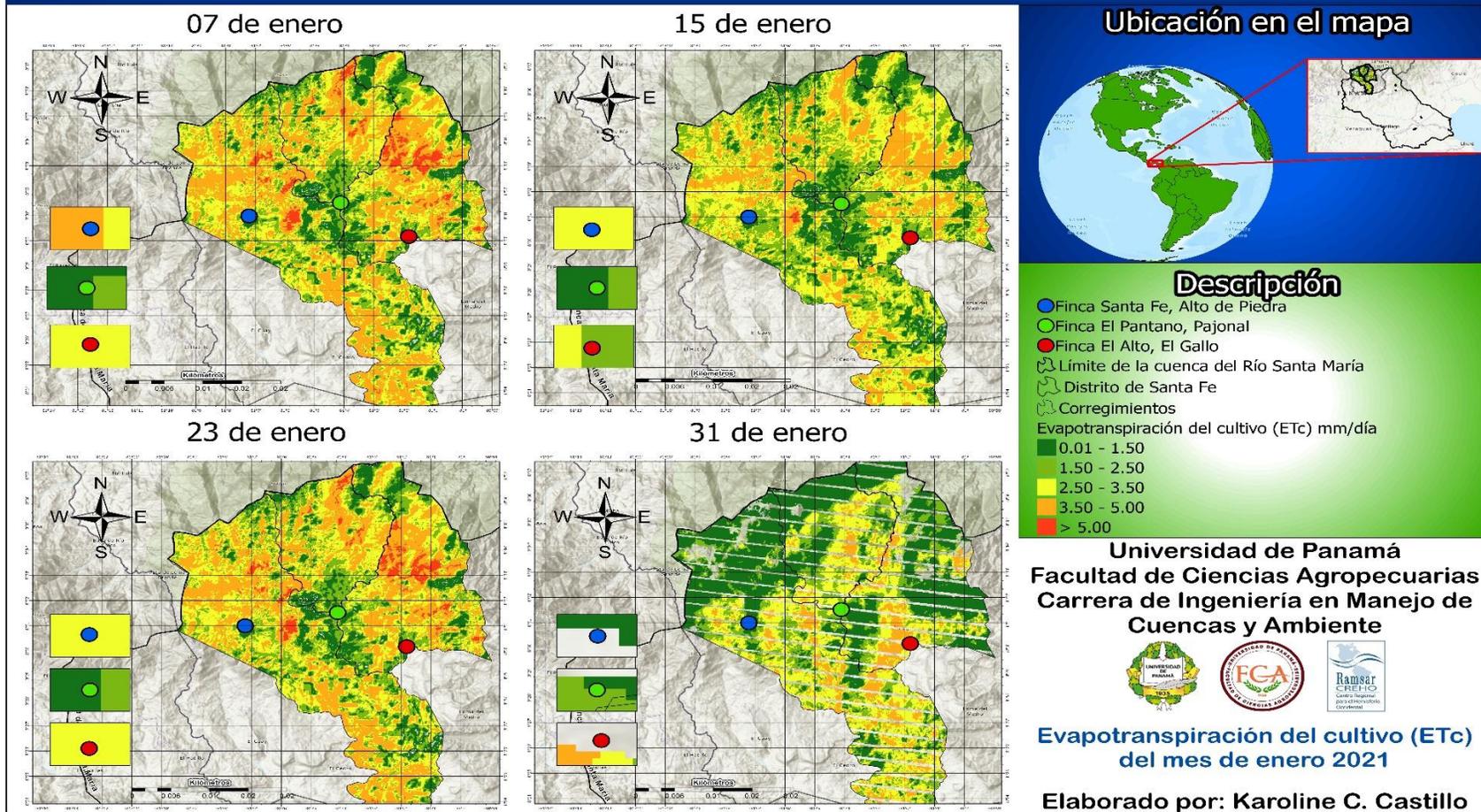


Figura 15. Mapa de la evapotranspiración del cultivo de café en el mes de enero con imágenes Landsat - METRIC EEFlux.

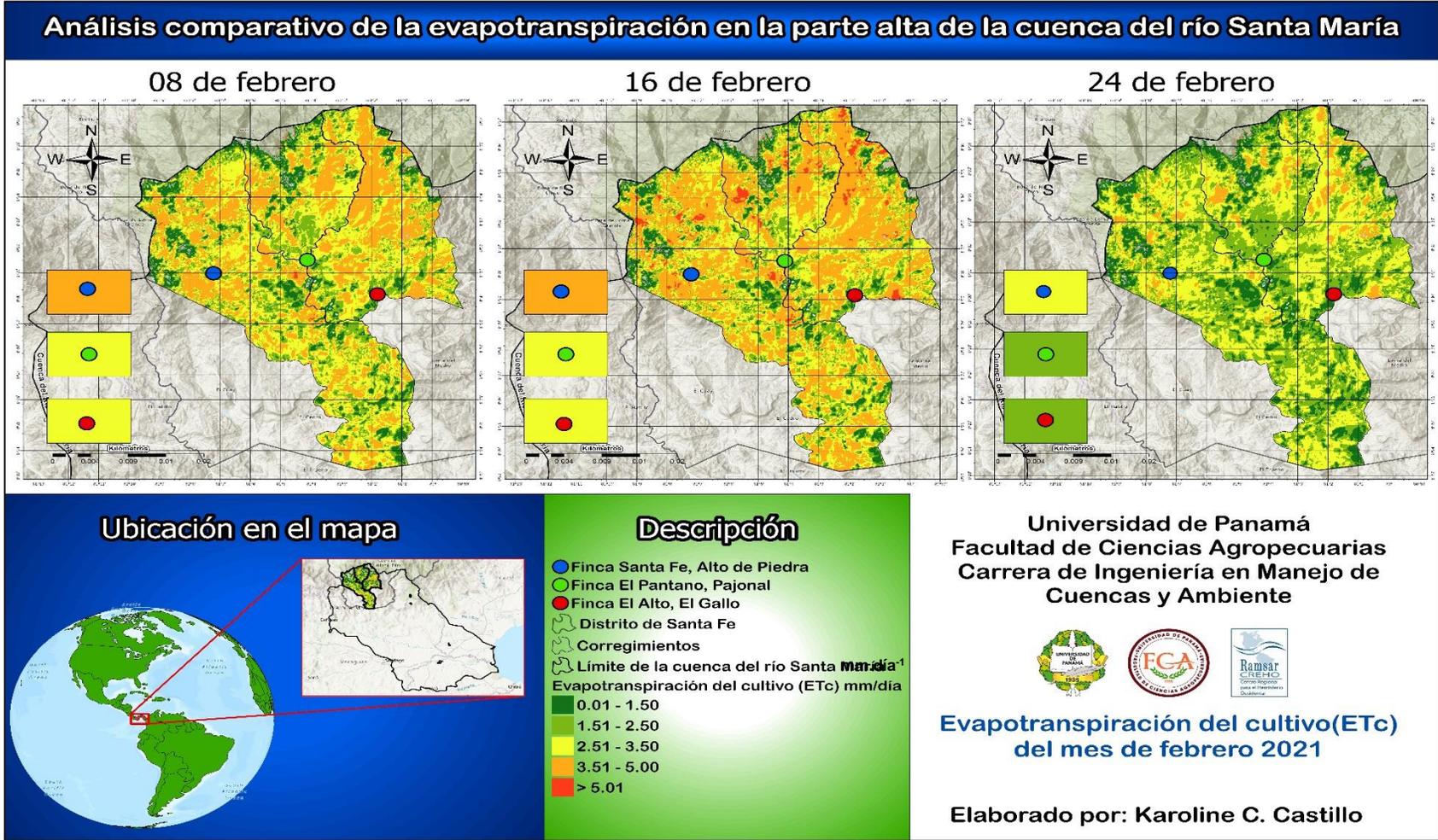


Figura 16. Mapa de la evapotranspiración del cultivo de café en el mes de febrero con imágenes Landsat - METRIC EEFlux.

Análisis comparativo de la evapotranspiración en la parte alta de la cuenca del río Santa María

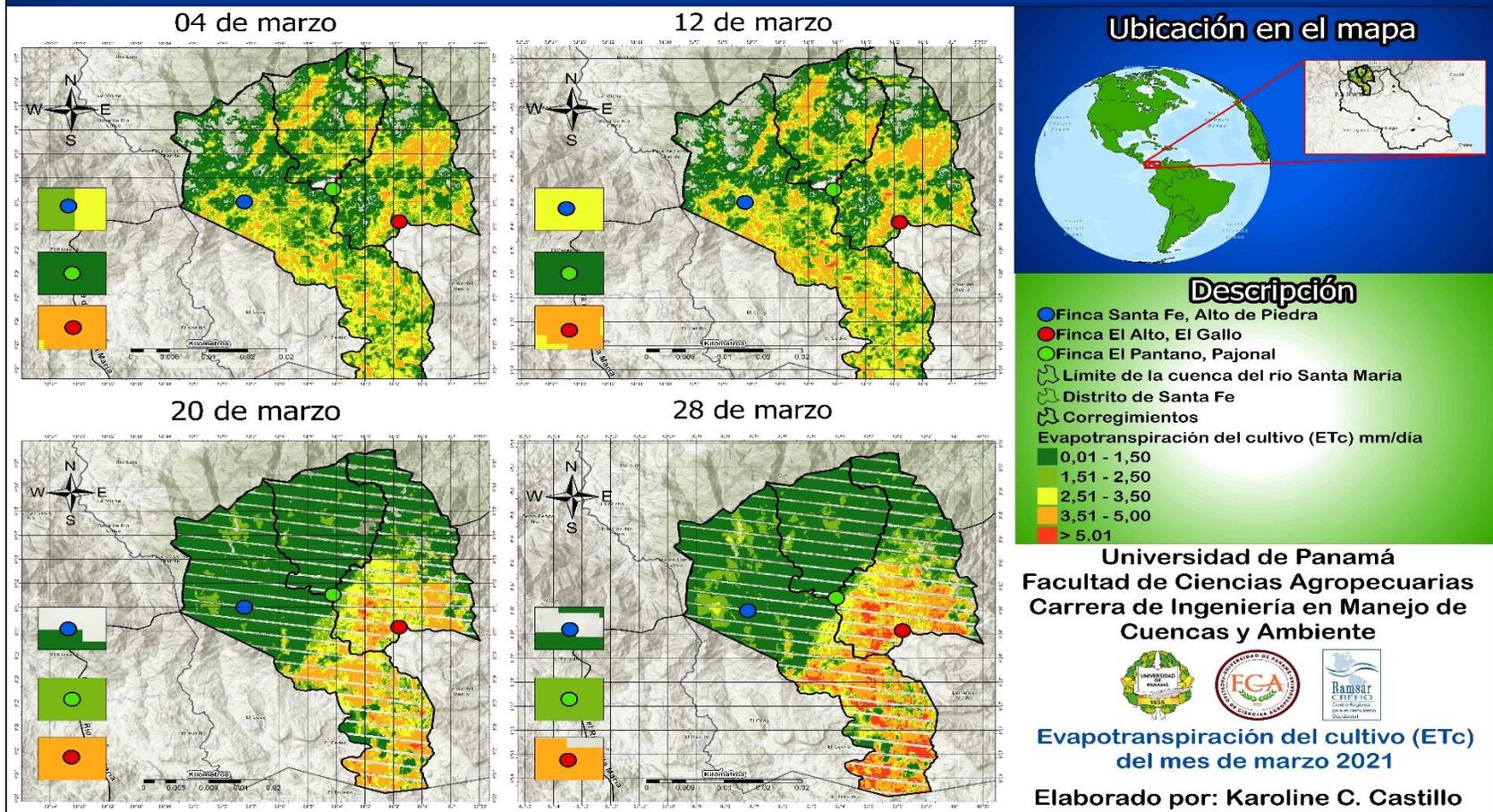


Figura 17. Mapa de la evapotranspiración del cultivo de café en el mes de marzo con imágenes Landsat - METRIC EEFlux.

Análisis comparativo de la evapotranspiración en la parte alta de la cuenca del río Santa María

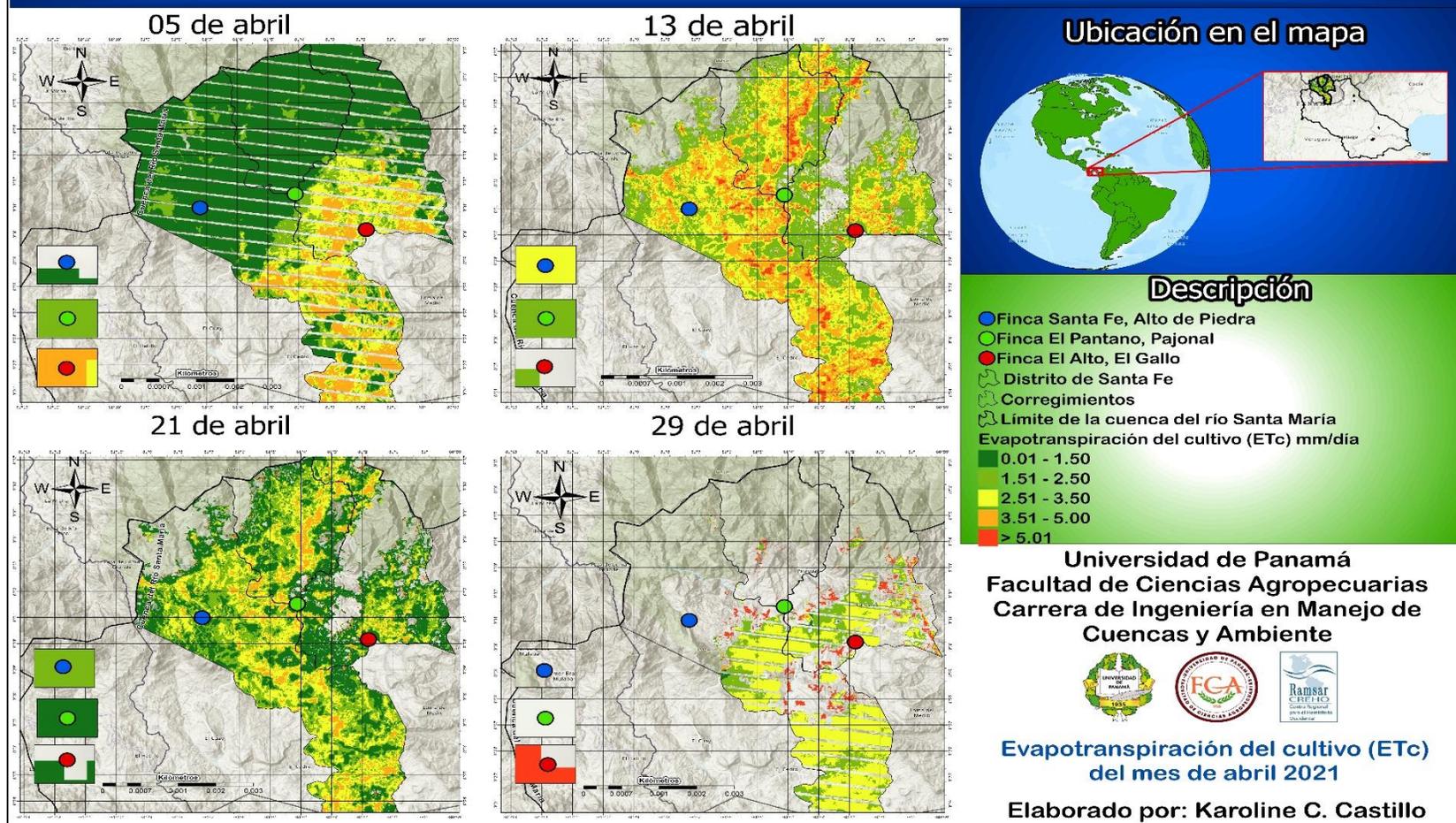


Figura 18. Mapa de la evapotranspiración del cultivo de café en el mes de abril con imágenes Landsat - METRIC EEFlux.

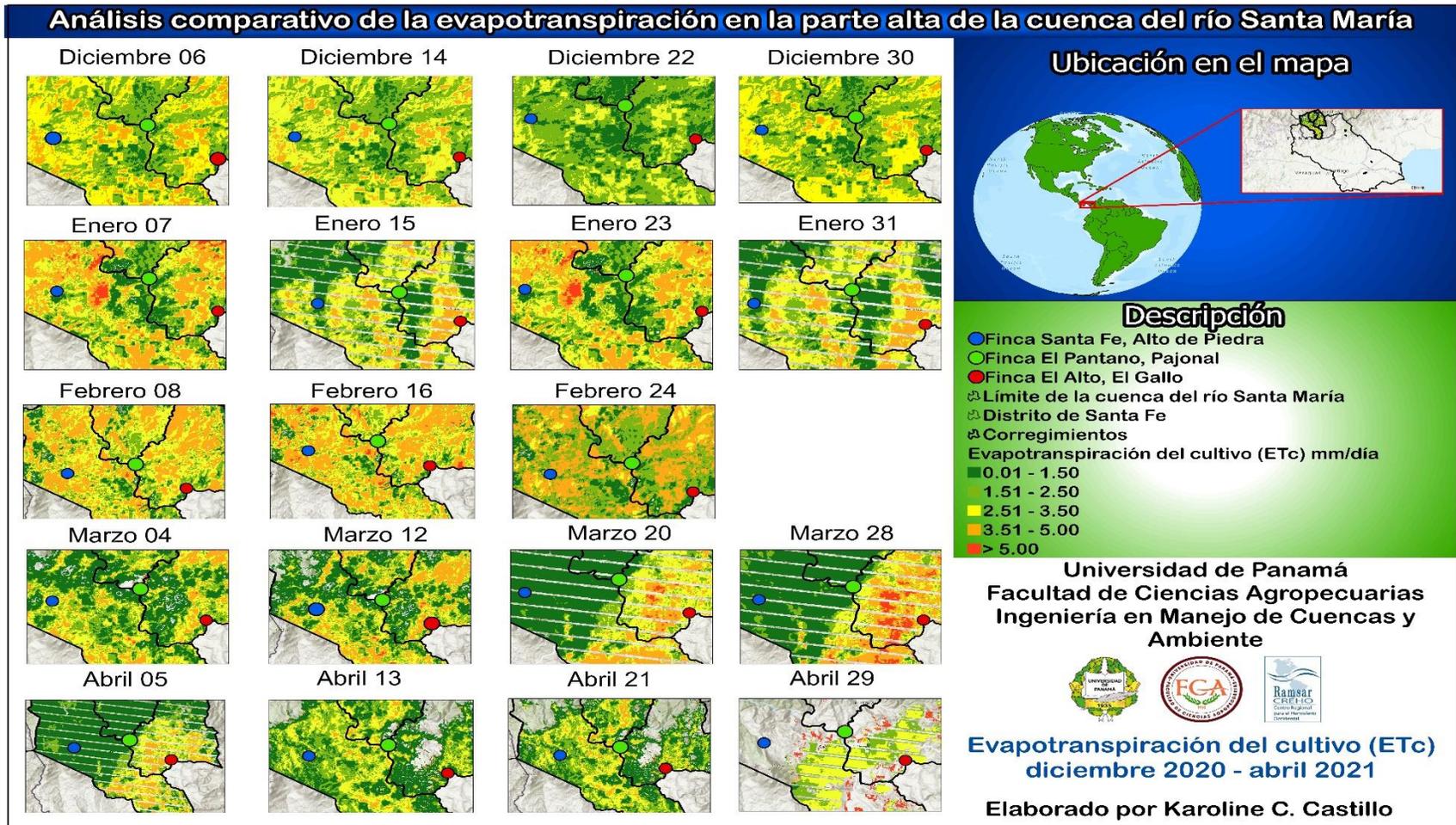


Figura 19. Mapa de la evapotranspiración del cultivo de café con imágenes Landsat – METRIC EEFlux.

4.1.1.3 Resultados de la evapotranspiración del cultivo de referencia

Los resultados de evapotranspiración del cultivo de referencia para determinar el balance hídrico se generaron a partir de los datos de la estación meteorológica de ETESA desde 1981 hasta 2013, periodo de 33 años de registro, señalados en el

ANEXO *D*. Posteriormente, se calculó la ET_o de la estación de ETESA con el método de Penman Monteith mediante CROPWAT y posterior a ello, se calculó la media de la ET_o , señalados en el CUADRO XXVI. Los resultados de la media de ET_o presentaron valores máximos de 4.25 mm día^{-1} en el mes de abril y valores mínimos de 3.16 mm día^{-1} en diciembre (ver CUADRO V).

CUADRO V. VALORES DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO DE REFERENCIA, ESTACIÓN METEOROLÓGICA DE ETESA.

Valores de la evapotranspiración del cultivo de referencia, estación meteorológica de ETESA		
Itm.	Mes	ET_o (mm día ⁻¹)
1	Enero	3.36
2	Febrero	3.79
3	Marzo	4.17
4	Abril	4.25
5	Mayo	3.94
6	Junio	3.74
7	Julio	3.72
8	Agosto	3.83
9	Septiembre	3.83
10	Octubre	3.48
11	Noviembre	3.20
12	Diciembre	3.16

Máx

Mín

4.1.1.4 Resultados de la precipitación y precipitación efectiva

Los datos de precipitación de la estación de ETESA señalados en el CUADRO **XXIV** fueron procesados con Microsoft Excel, donde se calculó la media de la precipitación, por otro lado, mediante el programa CROPWAT se obtuvo los resultados de la precipitación efectiva. Los resultados se muestran en CUADRO VI indican que la mayor precipitación se produce en el mes de octubre con valores de 343.19 mm día⁻¹ y los valores de precipitación más bajos presentan en febrero con valores de 29.19 mm día⁻¹. En cuanto a la precipitación efectiva, se aprecian valores más altos en el mes de octubre con 250.50 mm día⁻¹ y valores más bajos en febrero con 7.50 mm día⁻¹. Esta es la lluvia total disponible para satisfacer la necesidad del café, descontando la pérdida por infiltración y escorrentía.

CUADRO VI. PRECIPITACIÓN Y PRECIPITACIÓN EFECTIVA DE LA ESTACIÓN DE ETESA

Precipitación y Precipitación Efectiva de la estación de ETESA				
Itm.	Mes	Precipitación (mm)	Precipitación Efectiva (mm)	
1	Enero	45.99	17.60	
2	Febrero	29.19	7.50	Mín
3	Marzo	36.22	11.70	
4	Abril	71.17	32.90	
5	Mayo	231.86	161.40	
6	Junio	255.11	180.10	
7	Julio	212.46	145.9	
8	Agosto	283.86	203.00	
9	Septiembre	326.41	237.10	
10	Octubre	343.19	250.50	Máx
11	Noviembre	231.72	161.40	
12	Diciembre	123.71	75.00	

4.1.1.5 Resultados del balance hídrico mensual

Los resultados del balance hídrico mensual de Santa Fe se muestran en el CUADRO VII, donde se determinó los meses con déficit y exceso de agua al comparar la precipitación efectiva con la evapotranspiración del cultivo de referencia, como se observa la Figura 20. Los meses con déficit de humedad inician desde diciembre hasta abril, esta es causada por la mayor intensidad de evapotranspiración, donde el suelo agota el agua almacenada por el aumento en la radiación solar y se da principalmente en época seca, a diferencia de finales de abril hasta noviembre en el que la cantidad de agua almacenada en el suelo está en exceso a las necesidades hídricas del cultivo de café. En la Figura 20 se observa que, el área sombreada de color rojo representa el déficit por evapotranspiración del cultivo de referencia y el área color azul representa el exceso debido a la precipitación efectiva.

CUADRO VII. BALANCE HÍDRICO MENSUAL CON LA ESTACIÓN DE ETESA, SANTA FE (132-033).

Balance Hídrico Mensual con la estación de ETESA, Santa Fe													
Localidad: Santa Fe, Veraguas					Latitud: 8°30'30"N					Estación: Santa Fe (132-033)			
Periodo: 1981 - 2013					Longitud: 81°04'23"O								
Parámetros	Meses												Total
	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	
Evapotranspiración del cultivo de referencia (mm/día)	3.36	3.79	4.17	4.25	3.94	3.74	3.72	3.83	3.83	3.48	3.20	3.16	-
Evapotranspiración del cultivo de referencia (mm/mes)	104.16	106.01	129.29	127.42	122.25	112.32	115.25	118.83	115.00	107.87	96.13	97.99	1352.53
Precipitación mensual (mm/mes)	45.99	29.19	36.22	71.17	231.86	255.11	212.46	283.86	326.41	343.19	231.72	123.71	2190.88
Precipitación efectiva (mm/mes)	17.60	7.50	11.70	32.90	161.40	180.10	145.90	203.00	237.10	250.50	161.40	75.00	1484.10
Deficiencia (mm/mes)	86.56	98.51	117.59	94.52	-	-	-	-	-	-	-	22.99	420.18
Exceso (mm/mes)	-	-	-	-	39.15	67.78	30.65	84.17	122.10	142.63	65.27	-	551.75

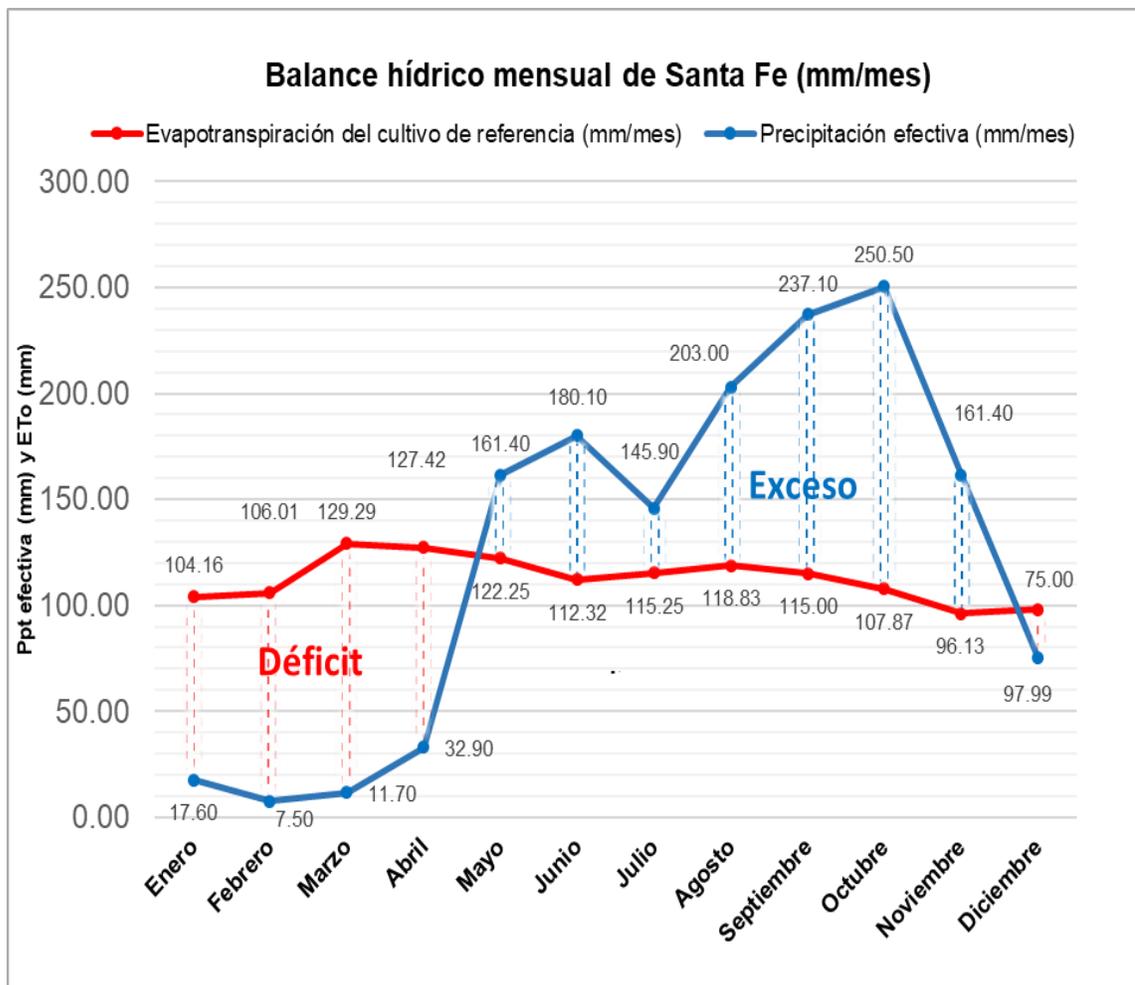


Figura 20. Gráfico de balance hídrico mensual de Santa Fe (132-033).

5 CONCLUSIONES

En esta investigación se realizó un análisis comparativo de la evapotranspiración durante estación seca, en la parte alta de la cuenca del río Santa María para tres fincas cafetaleras, utilizando datos de evapotranspiración de referencia (ET_o) y evapotranspiración del cultivo de café (ET_c) mediante imágenes satelitales Landsat de METRIC EEFlux y dos estaciones meteorológicas; una de ellas registrada por la red de datos meteorológica de ETESA en Santa Fe, Veraguas y la estación meteorológico Tempest instalado en la finca El Pantano, Pajonal.

Los valores de evapotranspiración de referencia (ET_o) y evapotranspiración del cultivo de café (ET_c) obtenidos del procesamiento de las imágenes satelitales Landsat de METRIC EEFlux con el método de Penman Monteith, muestran que la evapotranspiración de referencia (ET_o) de las tres fincas no son significativamente diferentes, sin embargo, al calcular la ET_c se presenta una diferencia significativa en la evapotranspiración del café para las tres fincas. La ET_c es más alta en la finca El Alto, el Gallo y los valores más bajos para la finca El Pantano, Pajonal con una diferencia promedio de 1.61 mm/día entre ambas fincas debido a la influencia del clima.

Por otro lado, al comparar los valores de evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o) y evapotranspiración del cultivo de café (ET_c) utilizando imágenes satelitales y la estación meteorológica de Tempest de la finca El Pantano, Pajonal, la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o) utilizando ambas metodologías son estadísticamente no significativas, sin embargo, al calcular la evapotranspiración del cultivo (ET_c) esta es más alta para la estación

meteorológica Tempest con 4.40 mm día^{-1} , seguido de las imágenes satelitales Landsat con una media de 1.57 mm día^{-1} . La comparación de ambos datos presentó un coeficiente de determinación (R^2) de 0.81 en un rango fuerte.

La evapotranspiración del cultivo de referencia para determinar el balance hídrico, donde se utilizó datos de la estación de ETESA, resultó con valores más bajos en diciembre (3.16 mm día^{-1}) y más altos en abril (4.25 mm día^{-1}).

6 RECOMENDACIONES

Basándonos en los resultados de esta investigación y aplicando la metodología descrita, se sugiere considerar los siguientes puntos:

1. Se recomienda dar seguimiento a este proyecto, ya que el periodo de estudio es muy corto para generar datos confiables, por lo tanto, se debe extender el registro de datos para comparar la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o) y la evapotranspiración del cultivo de café (ET_c), para obtener datos con mayor precisión y confiabilidad.
2. Incentivar a otros investigadores a realizar estudios que sirvan de base para los agricultores tomando en consideración otros cultivos agrícolas.
3. Las imágenes satelitales Landsat pueden ser utilizadas para el cálculo de la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o); pero no se deben utilizar los datos de imágenes satelitales en áreas muy nubosas, ya que puede influir en los resultados. Sin embargo, la necesidad de estimar a partir de este método se debe a la escasa disponibilidad de estaciones meteorológicas para estudios hidrológicos.
4. Realizar el análisis de comparación para un periodo de estudio más extenso, sobre todo si se instalan sistemas meteorológicos, se recomienda tener un periodo de medición de variables meteorológicas mayores a un año, es decir, series extensas de datos que incluyan comportamientos de variabilidad climática.

5. Establecer nuevas estaciones meteorológicas en la parte alta de la cuenca del río Santa María, con el objetivo de obtener más datos registrados para estudios futuros.

7 REFERENCIAS CITADAS

Allen, R; Pereira, L; Raes, D; Smith, M. 2006. Estudio FAO riego y drenaje 56: evapotranspiración del cultivo guías para la determinación del requerimiento de agua de los cultivos (en línea). Ed. Act. Roma, Italia, FAO. 324 p. Consultado 05 nov. 2020. Disponible en <https://goo.su/cNVLr>

Allen, R; Tasumi, M; Morse, A; Trezza, R; Wright, J; Bastiaanssen, W; Kramber, W; Lorite, I; Robison, CW. 2007. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC) – model (en línea). Journal of irrigation and drainage engineering. ASCE. p. 380-394. Consultado 10 ago. 2021. Disponible en <https://goo.su/AZwV>

Allen, R; Tasumi, M; Trezza, R. 2006. Benefits from tying satellite-based energy balance to reference evapotranspiration (en línea). *In* AIP Conference Proceedingsii 2006, Idaho, Estados Unidos, AIP Publishing LLC. p. 127-137. Consultado 20 nov. 2020. Disponible en <https://goo.su/S6EvJo>

ANAM (Autoridad Nacional del Ambiente, Panamá). 2011. Plan nacional de gestión integrada de recursos hídricos de la República de Panamá 2010-2030 (en línea). 1 ed. Argudo, P; Adames, M. (eds.). Panamá, Novo Art. 180 p. Consultado 06 sep. 2020. Disponible en <https://fliphtml5.com/eebm/wgzk/basic>

ANAM (Autoridad Nacional del Ambiente, Panamá); NATURA (Fundación para la Conservación de los Recursos Naturales, Panamá); PRODESO (Programa de Promoción y Desarrollo Social, Panamá); CATIE (Centro

Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, Costa Rica). 2009. Plan de Manejo Integral de la Parte Alta, Media y Baja de la Cuenca del Río Santa María (en línea). 1 ed. Panamá. 243 p. Consultado 14 oct. 2020. Disponible en <https://goo.su/aVrjhQZ>

ANAM (Autoridad Nacional del Ambiente, Panamá); CATHALAC (Centro del Agua del Trópico Húmedo para América Latina y el Caribe, Panamá); PNUD (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, Estados Unidos). 2004. Estudio hidrometeorológico de la cuenca del río Santa María. Panamá (en línea). p. 17-34. Consultado 19 sep. 2020. Disponible en <https://goo.su/HBmwW>

ANAM (Autoridad Nacional del Ambiente, Panamá); BID (Banco Interamericano de Desarrollo). 2010. Atlas ambiental de Panamá (en línea). 1 ed. Nota técnica. Panamá, Novo Art (ed.). p. 26-27. Consultado 18 abr. 2023. Disponible en <https://goo.su/zAwjyb>

Bakieva, M; Such, J; Jornet, J. 2010. SPSS: ANOVA de un factor (en línea). Universidad de Valencia: Grupo de Innovación Educativa. España. p. 1-7. Consultado 18 nov. 2020. Disponible en <https://goo.su/l3H9l>

BID (Banco Interamericano de Desarrollo). 2020. El agua en la economía de Panamá (en línea). Garcimartín, C; Astudillo, J; Garzonio, O (eds.). Nota técnica N° IDB-TN-1905. Panamá. p. 1-18. Consultado 02 abr. 2023. Disponible en <https://goo.su/WxBt5>

Bravo, NF. 2017. Geomática ambiental SRL: teledetección espacial Landsat, Sentinel-2, Aster L1T y Modis (en línea). 1 ed. Perú. 105 p. Consultado 06 oct. 2021. Disponible en <https://goo.su/qJ2AzkV>

Carr, MKV. 2001. The water relations and irrigation requirements of coffee (en línea). Inglarerra. Experimental agriculture 37(1):1-36. Consultado 18 sep. 2020. Disponible en <https://goo.su/jhgY>

Comité de Alto Nivel de Seguridad Hídrica. 2016. Plan Nacional de Seguridad Hídrica 2015-2050 Agua para todos (en línea). 1 ed. Panamá. 168 p. Consultado 21 sep. 2020. Disponible en <https://goo.su/Hpm0sC>

Copa, JD. 2018. Análisis comparativo entre la precipitación de datos del sensor TRMM y las estaciones meteorológicas en el altiplano central periodo 2000-2011 (en línea). Tesis M.Sc. La Paz, Bolivia, Universidad Mayor de San Andrés. 163 p. Consultado 29 oct. 2020. Disponible en <https://goo.su/h8UxgT9>

ETESA (Empresa de Transmisión Eléctrica, Panamá). 2013. Datos climáticos históricos (en línea). Consultado 26 abr. 2021. Disponible en <https://www.imhpa.gob.pa/es/>

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Italia). 1993. The state of food and agriculture: water policies and agriculture (en línea). Roma, Italia. 306 p. (FAO agricultura series, n°26). Consultado 22 nov. 2020. Disponible en <https://goo.su/qiW1Hg>

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Italia). 2009. Guía para la descripción de suelos (en línea). Vargas,

R (trad.). Roma, Italia. 111 p. Consultado 22 nov. 2020. Disponible en <https://www.fao.org/3/a0541s/a0541s.pdf>

Fernández, P., Villar, D., Checa, J., Porcel, P., García, M., & Sanz, P. 2011. Estudio piloto para la discriminación y seguimiento de las masas arbóreas de castaño afectadas por chancro mediante técnicas de teledetección (en línea, sitio web). Madrid, España. Consultado 12 nov. 2020. Disponible en <https://goo.su/yIM1OH>

Figueroa, E; Pérez, F; Godínez, L. 2012. La producción y el consumo del café (en línea). García-Miranda, M (ed). España, ECORFAN. 180 p. Consultado 11 oct. 2020. Disponible en https://www.ecorfan.org/spain/libros/LIBRO_CAFE.pdf

Frenken, K; Gillet, V. 2012. Irrigation water requirement and water withdrawal by country (en línea). Roma, Italia, FAO Aquastat reports. Consultado 18 sep. 2020. Disponible en <https://goo.su/kj8VO>

Guerra, F. 2016. Evaluación de diferentes métodos para calcular la evapotranspiración potencial, principales cultivos del Pacífico Central y Occidental de Panamá. Tesis Ing. Chiriquí, Panamá, Universidad de Panamá. 114 p.

Heredia, B. 2011. Guía técnica para el cultivo del café. 1a ed. Heredia, Costa Rica. 2011: ICAFE-CICAFE. 72 p. Consultado 22 oct. 2020. Disponible en <https://goo.su/UzUWe>

Ley General del Ambiente n°41. Gaceta Oficial. Panamá. 1 jul. 1998.

Ley Régimen administrativo espacial para el manejo, protección y conservación de las cuencas hidrográficas n°44. Gaceta Oficial. Panamá. 5 ago. 2002.

METRIC EEFlux (Earth Engine Evapotranspiration Flux). 2020. Vers. 0.20.4. EEFlux (en línea, sitio web). Actualización 0.20.17. Estados Unidos, Google, INEGI. Consultado 15 nov. 2020. Disponible en <https://eeflux-level1.appspot.com/>

MiAMBIENTE (Ministerio de Ambiente, Panamá). 2019. Estrategia Nacional de Cambio Climático, 2050 (en línea). Melillo, L (il). Panamá, v.166, 151 p. Consultado 19 sep. 2020. Disponible en <https://goo.su/zIVF2kZ>

MIDA (Ministerio de Desarrollo Agropecuario); ANBEC (Asociación Nacional de Beneficiadores y Exportadores de Café); SCAP (Asociación de Cafés Especiales de Panamá); IDIAP (Instituto de Innovación Agropecuaria de Panamá). 2018. Plan Estratégico de café para zonas productoras de 1,000 msnm en adelante 2007-2013 (en línea). Panamá. p. 1-39. Consultado 19 sep. 2020. Disponible en <https://goo.su/kkaiaa>

Mundo-Molina, M. 2009. Estandarización de las ecuaciones para estimar la evapotranspiración del cultivo de referencia (en línea). Chiapas, México.125-135 p. Consultado 10 oct. 2021. Disponible en <https://goo.su/8ZWw1o>

Municipio de Santa Fe; MEF (Ministerio de Economía y Finanzas); UDM (Unidad de Decentralización Municipal). 2018. Plan estratégico del distrito de Santa Fe 2018-2022. Veraguas, Panamá. 124 p.

Ortiz, E. 2017. Estudio de la oferta y la demanda de agua para riego y selección de prácticas de conservación de suelos en la región de las Nubes y Alto Bambito

en la cuenca alta del río Chiriquí Viejo. Tesis Ing. Chiriquí, Panamá, Universidad de Panamá. 184 p.

Pacheco, S. 2019. Evaluación del modelo Metric para determinar la evapotranspiración en la cuenca Pampa del Tamarugal, región del Tarapacá. Chile (en línea). Tesis MSc. Alcalá de Henares, España. 56 p. Consultado 10 oct. 2021. Disponible en <https://goo.su/078sV8>

Porras, L. 2000. Análisis de regresión investigador (en línea). España, Universidad de Granada. p. 47-57. Consultado 06 nov. 2020. Disponible en <https://goo.su/OmnzGB>

Ramírez-Builes, VH; Jaramillo-Robledo, Á; Arcila-Pulgarín, J. 2010. Índices para evaluar el estado hídrico en los cafetales (en línea). Caldas, Colombia, Cenicafé p. 55-66. Consultado 22 sep. 2020. Disponible en <https://goo.su/Su0u8z8>

Ramírez Builes, VH; Jaramillo Robledo, Á; Arcila Pulgarín, J. 2010. Rangos adecuados de lluvia para el cultivo de café en Colombia (en línea). Manizales, Colombia CENICAFE, 2010. 8 p. (Avances Técnicos No. 395). Consultado 23 sep. 2020. Disponible en <https://www.cenicafe.org/es/publications/avt0395.pdf>

Ramos, CL. 2014. Metodología de cálculo de ETP aplicando teledetección caso Valle de Chíncha (en línea). Lima, Perú. p. 64 – 72. Consultado 06 nov. 2020. Disponible en <https://goo.su/UR2m3X>

Sabet-Rasekh, D; Saavedra, C. 2016. Gestión de recursos hídricos para la adaptación al cambio climático: Municipio de Santa Fe, cuenca del río Santa María

(en línea). Panamá, Revista de Iniciación Científica. p. 61-73. Consultado 22 oct. 2020. Disponible en <https://goo.su/6s6cslu>

Salgado, R; Mateos, L. 2019. Evaluación de Métodos para el Cálculo de la Evapotranspiración de los cultivos con vistas a la evaluación del desempeño de distritos (en línea). XXXVII Congreso Nacional de Riegos, España. 10 p. Consultado 25 oct. 2020. Disponible en <https://goo.su/cfzzz>

Sánchez, Y. 2020. Una iniciativa para preservar el recurso hídrico de la bahía de Parita. Panamá, La Estrella De Panamá. Consultado 14 nov. 2020, Disponible en <https://goo.su/fJu9pU>

SEGEMAR (Servicio Geológico Minero Argentino). (s.f.). Sensores remotos (en línea, sitio web). Argentina. Consultado 16 nov. 2020. Disponible en <http://www.segemar.gov.ar/igrm/sensores-remotos/>

SIC (Satellite Imaging Corporation). (s.f.). Agricultura (en línea, sitio web). Consultado 29 nov. 2020. Disponible en <https://goo.su/x1K8Zze>

Simposio de riego de ASABE / IA. (2015). Tecnologías emergentes para el riego sostenible: un tributo a la carrera de Terry Howell (en línea, sitio web). Actas de la conferencia. Michigan, Estados Unidos, Sociedad estadounidense de ingenieros agrícolas y biológicos. Consultado 17 nov. 2020. Disponible en <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=46446>

SWAT (Global weather data for SWAT). 1981. CFSR datos meteorológicos globales SWAT 1979-2014 (en línea, sitio web). Consultado 20 mar. 2021. Disponible en <https://globalweather.tamu.edu/>

Tuchman, N. C., & Schuck, M. J. (s.f.). Sanando la tierra (en línea, sitio web). Chicago, Estados Unidos. Consultado 27 nov. 2020. Disponible en <https://healingearth.ijep.net/es/agua/la-distribucion-de-la-precipitacion>

Villodre, J. 2019. Estimación de la evapotranspiración y el estrés hídrico en la dehesa a alta resolución temporal y espacial mediante teledetección. Tesis Doc. Albacete, España, Universidad de Castilla-La Mancha. 233 p.

WeatherFlowSHOP. 2020. Tempest weather system (en línea, sitio web). Estados Unidos. Consultado 29 sep. 2020. Disponible en <https://goo.su/3uBCCq>

World Bank Group. (2016). Climate change knowledge portal Panamá (en línea, sitio web). Consultado 4 nov. 2020. Disponible en <https://goo.su/ypw7>

Zaror, JTY. 2018. Estimación de la distribución espacial de evapotranspiración usando imágenes satelitales de temperatura de suelo. Validación en la cuenca alta del río Elqui. Tesis Ing. Chile, Universidad de Chile. 87 p. Consultado 23 sep. 2020. Disponible en <https://goo.su/U48pITU>

8 ANEXOS

ANEXO A. PARÁMETROS PARA LA EVAPOTRANSPIRACIÓN

CUADRO VIII. RANGO DE VALORES DE ET_0 PARA LAS REGIONES AGROCLIMÁTICAS

Regiones	Rango de valores mm/día		
	Temperatura promedio durante el día (°C)		
	Templada ~10°C	Moderada 20°C	Caliente >30°C
Trópicos y subtrópicos			
Húmedas y subhúmedas	2 - 3	3 - 5	5 - 7
Áridas y semiáridas	2 - 4	4 - 6	6 - 8
Regiones templadas			
Húmedas y subhúmedas	1 - 2	2 - 4	4 - 7
Áridas y semiáridas	1 - 3	4 - 7	6 - 9

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

CUADRO IX. VALORES DEL COEFICIENTE DE CULTIVO Y ALTURA DE LAS PLANTAS PARA CULTIVOS EN CONDICIONES ÓPTIMAS PARA LA FÓRMULA DE ET_0 DE LA FAO PENMAN-MONTEITH

Cultivo		Kc inicial	Kc medio	Kc final	Altura máxima del cultivo (m)
Frutas tropicales y árboles					
Banana	* 1er año	0,50	1,10	1,00	3
	* 2do año	1,00	1,20	1,10	4
Cacao		1,00	1,05	1,05	3
Café	* suelo sin cobertura	0,90	0,95	0,95	2 a 3
	* con malezas	1,05	1,10	1,10	2 a 3
Palma datilera		0,90	0,95	0,95	8
Palma		0,95	1,00	1,00	8
Piña	* suelo sin cobertura	0,50	0,30	0,30	0,6 a 1,2
	* con cobertura de gramíneas	0,50	0,50	0,50	0,6 a 1,2
Árbol del caucho		0,95	1,00	1,00	10
Té	* no sombreado	0,95	1,00	1,00	1,5
	* sombreado	1,10	1,15	1,15	2

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

CUADRO X. INSOLACIÓN MÁXIMA DIARIA PARA DIFERENTES LATITUDES PARA EL DÍA 15VO DEL MES

Hemisferio norte												
Latitud grados	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
12	11,4	11,6	11,9	12,3	12,6	12,7	12,6	12,4	12,1	11,7	11,4	11,3
10	11,5	11,7	11,9	12,2	12,5	12,6	12,5	12,3	12,1	11,8	11,5	11,4
8	11,6	11,7	11,9	12,2	12,4	12,5	12,4	12,3	12,0	11,8	11,6	11,5
6	11,7	11,8	12,0	12,1	12,3	12,4	12,3	12,2	12,0	11,9	11,7	11,7
4	11,8	11,9	12,0	12,1	12,2	12,2	12,2	12,1	12,0	11,9	11,8	11,8
2	11,9	11,9	12,0	12,0	12,1	12,1	12,1	12,1	12,0	12,0	11,9	11,9
0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0

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

CUADRO XI. RADIACIÓN EXTRATERRESTRE DIARIA PARA DIFERENTES LATITUDES PARA EL DÍA 15VO DEL MES

Hemisferio norte												
Latitud grados	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
12	30,9	33,8	36,5	38,0	38,0	37,6	37,6	37,8	36,9	34,5	31,5	30,0
10	31,9	34,5	36,9	37,9	37,6	37,0	37,1	37,5	37,1	35,1	32,4	31,0
8	32,8	35,2	37,2	37,8	37,1	36,3	36,5	37,2	37,2	35,6	33,3	32,0
6	33,7	35,8	37,4	37,6	36,6	35,7	35,9	36,9	37,3	36,1	34,1	32,9
4	34,6	36,4	37,6	37,4	36,0	35,0	35,3	36,5	37,3	36,6	34,9	33,9
2	35,4	37,0	37,8	37,1	35,4	34,2	34,6	36,1	37,3	37,0	35,6	34,8
0	36,2	37,5	37,9	36,8	34,8	33,4	33,9	35,7	37,2	37,4	36,3	35,6

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

ANEXO B. PARÁMETROS DE SUELO

CUADRO XII. CLASES DE GRADIENTE DE LA PENDIENTE DEL SUELO

Pendiente del suelo		
Clase	Descripción	Porcentaje (%)
1	Plano	0 - 0,2
2	Nivel	0,2 - 0,5
3	Cercano al nivel	0,5 - 1,0
4	Muy ligeramente inclinado	1 - 2
5	Ligeramente Inclinado	2 - 5
6	Inclinado	5 - 10
7	Fuertemente Inclinado	10 - 15
8	Moderadamente escarpado	15 - 30
9	Escarpado	30 - 60
10	Muy escarpado	> 60

Fuente: Tomado de FAO, (2009).

ANEXO C. ESTACIÓN METEOROLÓGICA DE TEMPEST



Figura 22. Instalación de estación meteorológica Tempest con el equipo de CREHO y la Cooperativa la Esperanza de los Campesinos.



Figura 21. Kit completo de estación meteorológica de Tempest.

Fuente: Tomado de WeatherFLOWSHOP, (2020).



Figura 23. Aplicación Tempest Weather para celular.

Fuente: Tomado de WeatherFLOWSHOP, (2020).

CUADRO XIII. DATOS CLIMÁTICOS DIARIOS DEL MES DE DICIEMBRE DE LA ESTACIÓN DE TEMPEST

Datos Climáticos Diarios Estación de Tempest								
Diciembre 2020								
Estación: Corregimiento El Pantano, comunidad Pajonal.						Provincia: Veraguas.		
Altitud: 297 m.			Latitud: 8°31'35" N			Longitud: 81°04'40" O		
Fecha	T Min °C	T Max °C	Humedad Relativa %	Velocidad del Viento m s⁻¹	Insolación h	Radiación Solar MJ m⁻²	ET_o mm día⁻¹	ET_c mm día⁻¹
12/12/20	24.4	28.3	75	4.7	2.0	10.7	3.75	4.13
13/12/20	18.5	29.1	85	4.3	7.0	17.6	3.73	4.10
14/12/20	19.6	30.2	85	4.7	7.0	17.6	3.90	4.29
15/12/20	18.2	31.4	85	5.0	8.5	19.6	4.35	4.79
16/12/20	17.5	32.1	83	4.7	9.2	20.6	4.70	5.17
17/12/20	23.2	25.8	93	6.1	0.6	8.7	1.90	2.09
18/12/20	21.0	28.4	90	5.0	4.9	14.7	2.99	3.29
19/12/20	21.2	29.4	92	6.2	5.4	15.4	3.02	3.32
20/12/20	21.4	29.6	88	4.8	5.4	15.4	3.35	3.69
21/12/20	21.6	29.0	82	5.9	4.9	14.7	3.80	4.18
22/12/20	22.1	30.0	84	5.1	5.2	15.1	3.70	4.07
23/12/20	21.9	29.6	85	5.3	5.1	15.0	3.58	3.94
24/12/20	20.0	28.7	90	5.6	5.8	15.9	3.18	3.50
25/12/20	19.2	28.4	88	6.6	6.1	16.3	3.40	3.74
26/12/20	18.1	27.2	87	5.8	6.0	16.2	3.31	3.64
27/12/20	18.0	30.1	89	5.4	7.9	18.8	3.80	4.18
28/12/20	20.9	26.7	92	5.1	3.7	13.1	2.50	2.75
29/12/20	19.7	29.8	87	4.8	6.7	17.2	3.67	4.04
30/12/20	18.9	30.8	86	4.6	7.7	18.6	4.03	4.43
31/12/20	18.6	31.6	82	4.8	8.4	19.6	4.57	5.03
Promedio	20.2	29.3	86.4	5.2	5.9	16.0	3.56	3.92

CUADRO XIV. DATOS CLIMÁTICOS DIARIOS DEL MES DE ENERO DE LA ESTACIÓN DE TEMPEST

Datos Climáticos Diarios Estación de Tempest								
Enero 2021								
Estación: Corregimiento El Pantano, comunidad Pajonal.						Provincia: Veraguas.		
Altitud: 297 m.			Latitud: 8°31'35" N			Longitud: 81°04'40" O		
Fecha	T Min °C	T Max °C	Humedad Relativa %	Velocidad del Viento m s ⁻¹	Insolación h	Radiación Solar MJ m ⁻²	ET _o mm día ⁻¹	ET _c mm día ⁻¹
1/1/21	21.4	29.5	84	5.5	5.4	15.4	3.73	4.10
2/1/21	21.3	27.8	91	5.4	4.2	13.8	2.77	3.05
3/1/21	21.9	29.4	86	3.7	5.0	14.9	3.35	3.69
4/1/21	21.9	29.4	91	6.1	5.0	14.9	3.06	3.37
5/1/21	21.4	28.5	83.7	6.1	4.7	14.9	3.7	4.04
6/1/21	21.4	28.5	83.7	6.1	4.7	14.9	3.7	4.04
7/1/21	21.4	28.5	83.7	6.1	4.7	14.9	3.7	4.04
8/1/21	21.4	28.5	83.7	6.1	4.7	14.9	3.7	4.04
9/1/21	20.6	28.3	83	5.6	5.1	15.2	3.66	4.03
10/1/21	20.5	28.9	87	5.1	5.6	15.9	3.44	3.78
11/1/21	22.2	27.9	90	4.3	3.6	13.1	2.77	3.05
12/1/21	21.7	28.9	91	4.9	4.8	14.8	2.99	3.29
13/1/21	22.0	28.9	86	4.6	4.5	14.4	3.32	3.65
14/1/21	21.8	27.8	83.0	4.8	3.8	13.5	3.36	3.70
15/1/21	21.4	28.5	83.7	6.1	4.7	14.9	3.7	4.04
16/1/21	21.4	28.5	83.7	6.1	4.7	14.9	3.7	4.04
17/1/21	21.4	28.5	83.7	6.1	4.7	14.9	3.7	4.04
18/1/21	22.2	26.6	79	6.6	2.5	11.7	3.64	4.00
19/1/21	20.4	29.2	79	7.1	5.9	16.6	4.46	4.91
20/1/21	22.3	28.4	84	7.8	3.9	14.8	3.63	3.99
21/1/21	22.1	30.1	80	6.2	5.3	15.8	4.31	4.74
22/1/21	19.7	29.6	84	6.5	6.6	17.7	4.10	4.51
23/1/21	19.1	25.6	88	7.5	4.3	14.4	2.94	3.23
24/1/21	21.0	29.1	78	6.7	5.4	16.0	4.46	4.91
25/1/21	21.9	28.7	82	5.7	4.5	14.8	3.79	4.17
26/1/21	22.6	29.6	78	7.5	4.6	14.9	4.54	4.99
27/1/21	21.5	28.5	80	5.9	4.6	15.0	3.99	4.39
28/1/21	22.4	29.3	82	8.5	4.6	15.0	4.16	4.58
29/1/21	22.0	27.6	80	8.2	3.5	13.4	4.00	4.40
30/1/21	21.1	27.7	81	6.6	4.3	14.6	3.85	4.24
31/1/21	20.5	28.1	82	6.7	5.1	15.8	3.93	4.32
Promedio	21.4	28.5	83.7	6.1	4.7	14.9	3.68	4.04

CUADRO XV. DATOS CLIMÁTICOS DIARIOS DEL MES DE FEBRERO DE LA ESTACIÓN DE TEMPEST

Datos Climáticos Diarios Estación de Tempest								
Febrero 2021								
Estación: Corregimiento El Pantano, comunidad Pajonal.						Provincia: Veraguas.		
Altitud: 297 m.			Latitud: 8°31'35" N			Longitud: 81°04'40" O		
Fecha	T Min °C	T Max °C	Humedad Relativa %	Velocidad del Viento m s⁻¹	Insolación h	Radiación Solar MJ m⁻²	ET_o mm día⁻¹	ET_c mm día⁻¹
1/2/21	22.8	28.5	82	5.4	3.6	13.7	3.64	4.00
2/2/21	22.9	27.4	84	9.0	2.6	12.3	3.48	3.83
3/2/21	22.0	24.9	91	6.9	0.9	9.8	2.18	2.40
4/2/21	21.9	27.5	87	6.6	3.6	13.8	3.17	3.49
5/2/21	19.9	29.1	83	5.0	6.2	17.6	4.01	4.41
6/2/21	19.2	29.9	87	4.9	7.1	19.0	3.96	4.36
7/2/21	20.3	29.9	84	5.9	6.5	18.1	4.17	4.59
8/2/21	20.8	30.4	75	6.7	6.5	18.2	5.19	5.71
9/2/21	21.0	26.7	87	4.8	3.6	13.9	3.04	3.34
10/2/21	19.6	29.3	77	6.7	6.5	18.2	4.83	5.31
11/2/21	19.1	29.0	83	5.9	6.7	18.6	4.19	4.61
12/2/21	18.4	30.2	79	4.7	7.8	20.3	4.73	5.20
13/2/21	17.9	30.7	84	4.4	8.4	21.2	4.54	4.99
14/2/21	19.6	31.9	83	5.1	8.1	20.8	4.81	5.29
15/2/21	17.7	32.3	80	4.3	9.4	22.8	5.24	5.76
16/2/21	17.1	31.3	86	5.4	9.2	22.5	4.45	4.90
17/2/21	19.9	30.1	82	6.8	6.9	19.1	4.59	5.05
18/2/21	20.4	30.1	81	5.4	6.6	18.7	4.50	4.95
19/2/21	20.4	30.2	83	5.1	6.6	18.8	4.33	4.76
20/2/21	21.3	27.3	86	4.8	3.9	14.7	3.28	3.61
21/2/21	21.5	27.6	81	7.8	4.0	14.9	4.01	4.41
22/2/21	20.6	29.3	78	8.0	5.9	17.8	4.87	5.36
23/2/21	19.7	29.2	79	9.9	6.5	18.8	5.00	5.50
24/2/21	19.4	27.4	79	6.2	5.4	17.1	4.23	4.65
25/2/21	23.0	28.6	82	7.0	3.6	14.4	3.94	4.33
26/2/21	22.3	28.0	84	5.9	3.7	14.6	3.60	3.96
27/2/21	22.4	28.7	82	6.6	4.2	15.4	4.01	4.41
28/2/21	20.3	27.0	79	7.7	4.5	15.9	4.22	4.64
Promedio	20.4	29.0	82.4	6.2	5.7	17.2	4.15	4.57

CUADRO XVI. DATOS CLIMÁTICOS DIARIOS DEL MES DE MARZO DE LA ESTACIÓN DE TEMPEST

Datos Climáticos Diarios Estación de Tempest								
Marzo								
Estación: Corregimiento El Pantano, comunidad Pajonal.						Provincia: Veraguas.		
Altitud: 297 m.			Latitud: 8°31'35" N			Longitud: 81°04'40" O		
Fecha	T Min °C	T Max °C	Humedad Relativa %	Velocidad del Viento m s ⁻¹	Insolación h	Radiación Solar MJ m ⁻²	ET _o mm día ⁻¹	ET _c mm día ⁻¹
1/3/21	21.2	29.1	82	6.6	5.4	17.3	4.25	4.68
2/3/21	20.2	29.6	81	6.7	6.4	18.8	4.02	4.42
3/3/21	19.7	29.2	79	6.7	6.5	19.0	4.75	5.23
4/3/21	18.6	27.6	82	6.4	6.2	18.6	4.16	4.58
5/3/21	18.8	29.1	76	7.5	7.0	19.9	5.20	5.72
6/3/21	17.4	28.8	82	6.6	7.7	21.0	4.61	5.07
7/3/21	18.4	29.1	69	7.1	7.3	20.4	5.87	6.46
8/3/21	20.5	24.9	87	7.3	2.5	13.0	2.91	3.20
9/3/21	21.5	27.4	90	5.9	3.9	15.2	3.06	3.37
10/3/21	20.3	29.3	81.1	6.7	6.1	18.8	4.5	4.93
11/3/21	20.3	29.3	81.1	6.7	6.1	18.8	4.5	4.93
12/3/21	20.3	29.3	81.1	6.7	6.1	18.8	4.5	4.93
13/3/21	22.1	25.3	83	3.6	1.3	11.3	2.87	3.16
14/3/21	19.3	28.0	80	7.1	6.0	18.6	4.47	4.92
15/3/21	19.2	28.9	79	6.5	6.7	19.7	4.76	5.24
16/3/21	19.4	29.4	79	6.5	6.9	20.0	4.87	5.36
17/3/21	18.4	32.0	80	5.7	9.0	23.3	5.51	6.06
18/3/21	19.2	33.4	84	3.9	9.4	23.9	3.32	3.65
19/3/21	21.5	30.4	85	6.4	6.2	19.0	4.34	4.77
20/3/21	21.3	28.7	85	8.6	5.1	17.3	4.02	4.42
21/3/21	20.0	29.5	82	6.6	6.6	19.6	4.58	5.04
22/3/21	19.6	30.2	81	6.4	7.3	20.7	4.89	5.38
23/3/21	17.8	30.2	84	6.1	8.4	22.5	4.81	5.29
24/3/21	18.1	31.5	81	6.6	8.9	23.2	5.44	5.98
25/3/21	20.5	30.9	78	6.7	7.2	20.6	5.31	5.84
26/3/21	21.9	29.3	82	5.9	5.1	17.3	4.26	4.69
27/3/21	23.1	29.7	70	8.5	4.5	16.4	5.88	6.47
28/3/21	21.4	29.4	80	8.1	5.6	18.1	4.75	5.23
29/3/21	22.0	28.7	82	5.6	4.6	16.6	4.08	4.49
30/3/21	22.5	29.2	85	6.4	4.6	16.6	3.92	4.31
31/3/21	23.4	30.6	82	6.4	5.0	17.2	4.48	4.93
Promedio	20.3	29.3	81.1	6.5	6.1	18.8	4.48	4.93

CUADRO XVII. DATOS CLIMÁTICOS DIARIOS DEL MES DE ABRIL DE LA ESTACIÓN DE TEMPEST

Datos Climáticos Diarios Estación de Tempest								
Abril								
Estación: Corregimiento El Pantano, comunidad Pajonal.						Provincia: Veraguas.		
Altitud: 297 m.			Latitud: 8°31'35" N			Longitud: 81°04'40" O		
Fecha	T Min °C	T Max °C	Humedad Relativa %	Velocidad del Viento m s⁻¹	Insolación h	Radiación Solar MJ m⁻²	ET_o mm día⁻¹	ET_c mm día⁻¹
1/4/21	22.5	29.1	86	8.0	4.5	16.5	3.9	4.25
2/4/21	22.0	23.9	96	5.2	0.0	9.4	1.7	1.87
3/4/21	22.0	28.8	78	6.6	4.7	16.8	4.59	5.05
4/4/21	21.4	28.6	82	6.8	5.0	17.2	4.23	4.65
5/4/21	21.5	28.4	82	7.1	4.8	16.9	4.20	4.62
6/4/21	22.1	29.5	79	5.6	5.2	17.6	4.55	5.01
7/4/21	22.4	26.7	88	5.2	2.5	13.3	2.98	3.28
8/4/21	22.2	26.8	92	2.9	2.8	13.8	2.76	3.04
9/4/21	20.2	29.9	92	4.2	6.6	20.0	3.81	4.19
10/4/21	20.3	31.6	88	4.4	7.8	21.6	4.52	4.97
11/4/21	20.2	32.8	90	4.1	8.6	22.8	4.72	5.19
12/4/21	20.8	32.3	86	4.8	7.9	21.7	4.80	5.28
13/4/21	22.7	29.9	86	5.3	5.0	17.2	3.93	4.32
14/4/21	22.9	29.6	88	4.6	4.6	16.6	3.63	3.99
15/4/21	22.3	28.1	94	4.1	3.9	15.5	2.91	3.20
16/4/21	21.7	29.2	93	6.4	5.3	17.7	3.27	3.60
17/4/21	21.2	29.5	86.4	5.2	5.7	18.2	4.0	4.41
18/4/21	21.2	29.5	86.4	5.2	5.7	18.2	4.0	4.41
19/4/21	19.1	31.5	87	3.0	8.5	22.6	4.64	5.10
20/4/21	22.3	32.2	89	4.5	7.0	20.3	4.34	4.77
21/4/21	21.8	29.8	89	4.2	5.6	18.1	3.75	4.13
22/4/21	22.3	29.6	83	7.1	5.1	17.3	4.30	4.73
23/4/21	21.3	28.3	87	5.2	4.9	17.0	3.63	3.99
24/4/21	20.4	27.7	86	6.1	5.1	17.3	3.71	4.08
25/4/21	20.2	29.2	87	5.5	6.4	19.2	4.00	4.40
26/4/21	19.6	30.0	82	5.9	7.3	20.7	4.73	5.20
27/4/21	20.0	30.2	79	6.5	7.2	20.5	5.07	5.58
28/4/21	18.7	30.6	81	4.4	8.3	22.1	4.92	5.41
29/4/21	21.3	30.4	83	4.4	6.5	19.4	4.42	4.86
30/4/21	20.1	30.3	86	4.0	7.2	20.4	4.30	4.73
Promedio	21.2	29.5	86.4	5.2	5.7	18.2	4.01	4.41

ANEXO D. ESTACIÓN METEOROLÓGICA DE ETESA

Figura 24. Estado de la estación meteorológica de ETESA en Santa Fe.

CUADRO XVIII. DATOS HISTÓRICOS DE TEMPERATURA MÍNIMA DE LA ESTACIÓN DE ETESA

Datos de temperatura mínima expresada en °C de la estación de ETESA													
Periodo 1981-2013													
Estación: Santa Fe (132-033).							Provincia: Veraguas.						
Altitud: 463 m.				Latitud: 8°30'30" N				Longitud: 80°04'23" O					
Año	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Promedio Anual
1981	20.2	21.0	21.2	21.5	21.3	21.2	20.9	20.7	20.3	20.5	21.2	21.1	20.9
1982	20.9	21.2	21.0	21.5	21.2	21.4	21.7	22.0	21.0	20.5	21.2	21.1	21.2
1983	21.4	21.4	22.3	22.2	22.6	21.8	22.0	21.4	20.8	20.5	20.8	20.8	21.6
1984	20.2	20.8	21.0	20.9	20.9	20.7	20.0	20.3	19.8	20.5	20.2	20.7	20.5
1985	19.7	20.7	20.6	21.0	21.4	21.1	20.6	20.4	20.3	20.3	20.7	20.8	20.6
1986	20.7	19.8	20.5	22.0	21.7	21.4	21.7	21.4	20.8	20.5	21.3	20.9	21.1
1987	21.1	21.6	21.5	22.3	21.8	21.8	21.7	21.8	21.3	21.0	21.6	21.7	21.6
1988	21.3	21.3	21.5	21.5	21.7	20.7	20.9	20.2	20.5	20.7	20.4	20.4	21.0
1989	20.6	20.1	19.6	21.4	20.5	20.5	20.2	20.1	20.4	19.9	20.0	20.2	20.3
1990	20.1	20.0	20.0	20.1	20.8	20.5	20.7	20.8	20.1	19.9	20.4	20.3	20.3
1991	20.4	20.3	20.5	19.8	20.2	21.5	20.4	20.1	20.3	19.9	19.7	20.1	20.3
1992	20.2	20.0	20.5	20.0	19.9	19.9	19.7	20.0	20.0	19.9	19.9	19.8	20.0
1993	19.5	19.5	19.9	20.1	20.0	19.9	20.6	19.9	20.1	20.3	20.1	20.1	20.0
1994	19.9	20.0	20.5	20.4	20.4	20.3	20.3	20.3	20.1	19.8	20.5	20.4	20.2
1995	19.9	20.2	20.1	20.0	19.9	20.0	20.0	19.9	20.4	20.5	20.5	20.5	20.1
1996	18.9	19.5	19.0	19.6	18.9	19.2	18.7	18.8	18.8	19.0	18.9	19.5	19.0
1997	18.6	19.6	19.1	19.3	19.6	19.7	19.1	19.3	20.0	21.5	20.4	20.0	19.7
1998	20.0	20.6	20.8	20.7	20.9	20.7	20.5	20.4	20.3	20.5	20.3	19.8	20.5
1999	19.4	19.3	19.2	19.9	19.3	18.9	20.0	19.0	19.1	19.9	19.4	19.0	19.4
2000	18.7	18.2	20.3	20.4	20.2	20.1	20.5	20.4	19.7	20.3	19.9	19.4	19.9
2001	19.1	19.6	19.6	20.4	20.3	20.3	19.9	20.3	20.1	20.3	20.5	20.3	20.0
2002	20.2	20.3	20.6	20.3	20.8	20.0	20.1	20.7	20.1	19.9	20.0	20.1	20.3
2003	19.9	20.0	20.7	20.7	20.7	20.0	20.1	20.3	20.5	20.1	20.2	19.5	20.3
2004	18.9	19.6	20.4	19.8	19.5	20.2	20.3	21.5	20.2	19.7	19.8	19.1	20.0
2005	19.2	19.0	19.9	20.3	19.8	20.6	19.3	19.3	19.8	20.0	19.5	19.5	19.7
2006	20.5	19.7	20.5	20.3	20.8	20.9	20.7	20.5	20.7	20.7	20.0	20.8	20.5
2007	20.6	20.5	21.3	20.8	20.8	20.4	21.1	20.3	20.9	20.8	21.4	21.0	20.8
2008	21.3	20.9	21.1	21.7	21.4	21.5	21.2	20.6	20.9	20.9	20.7	21.0	21.1
2009	20.9	20.9	20.9	21.6	21.7	21.2	22.0	21.7	21.5	20.9	21.3	21.8	21.3
2010	21.6	22.4	22.3	22.3	22.3	21.6	20.6	20.9	20.6	20.5	20.3	20.0	21.4
2011	21.0	21.1	20.8	21.1	21.3	21.6	21.4	20.7	20.7	20.3	20.6	21.0	21.0
2012	20.7	21.0	21.2	21.0	21.5	21.2	22.1	21.0	20.8	21.0	21.6	21.5	21.2
2013	21.6	20.8	21.2	22.0	21.4	21.1	21.4	21.0	20.7	20.7	20.6	20.9	21.1
Promedio Mensual	20.2	20.3	20.6	20.8	20.8	20.7	20.6	20.5	20.4	20.4	20.4	20.4	

Fuente: Elaborado con base en ETESA, (2013).

CUADRO XIX. DATOS HISTÓRICOS DE TEMPERATURA MÁXIMA DE LA ESTACIÓN DE ETESA

Datos de temperatura máxima expresada en °C de la estación de ETESA													
Periodo 1981-2013													
Estación: Santa Fe (132-033).							Provincia: Veraguas.						
Altitud: 463 m.				Latitud: 8°30'30" N				Longitud: 80°04'23" O					
Año	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Promedio Anual
1981	26.5	27.4	29.4	28.3	29.0	28.5	28.5	28.8	29.3	28.3	27.9	27.3	28.3
1982	27.5	28.7	28.8	29.5	29.4	29.5	28.1	28.7	28.9	28.2	28.0	28.1	28.6
1983	28.6	29.7	30.7	30.8	29.5	30.5	29.2	29.0	29.1	28.4	28.7	27.2	29.3
1984	27.1	28.0	29.2	29.8	29.6	28.7	28.9	28.5	28.3	28.3	27.6	26.7	28.4
1985	26.3	27.4	27.8	28.5	28.9	28.9	28.4	28.2	28.6	28.3	27.5	27.2	28.0
1986	25.8	27.8	28.3	28.5	30.3	28.5	28.0	28.4	28.7	28.3	28.1	27.9	28.2
1987	27.5	28.8	30.8	27.8	29.5	29.9	30.0	29.4	29.5	28.4	28.5	28.3	29.0
1988	28.0	27.9	28.9	30.3	29.7	29.3	28.4	28.8	28.7	28.2	28.1	26.8	28.6
1989	26.8	26.8	27.8	28.9	29.0	28.2	28.6	28.8	29.2	29.1	29.1	28.0	28.4
1990	27.3	27.8	28.2	30.6	29.6	29.0	28.9	29.2	29.3	28.1	28.7	27.1	28.6
1991	27.6	27.7	29.5	29.6	29.2	29.3	28.9	29.1	28.7	29.2	27.9	27.2	28.7
1992	27.6	28.9	29.4	30.2	29.0	30.1	28.6	28.7	28.4	28.6	28.7	27.6	28.8
1993	27.5	27.7	28.4	29.5	29.8	29.3	28.6	29.4	29.0	29.3	28.6	27.3	28.7
1994	27.7	27.9	29.5	29.8	29.0	28.4	28.4	29.2	29.0	29.3	28.0	27.6	28.6
1995	27.8	28.6	30.2	30.2	29.7	29.2	29.5	28.7	28.9	28.8	28.2	28.3	29.0
1996	27.3	27.5	28.0	29.2	29.6	28.7	28.4	29.0	29.6	28.3	27.1	26.9	28.3
1997	27.8	27.4	28.7	30.0	28.9	29.4	29.0	29.6	30.4	29.3	29.1	28.6	29.0
1998	28.9	30.4	30.1	30.6	30.6	29.7	28.9	29.2	29.9	28.5	29.0	28.4	29.5
1999	27.1	27.3	27.7	28.8	29.2	28.5	28.7	29.0	28.8	28.2	27.5	26.5	28.1
2000	26.7	27.0	28.7	28.7	29.1	29.1	28.2	28.9	29.1	28.6	28.9	27.5	28.4
2001	27.0	27.5	29.0	28.2	30.0	28.8	28.6	29.2	28.9	29.0	27.2	27.8	28.4
2002	27.4	27.9	28.8	28.2	29.3	29.4	28.8	29.5	30.2	29.5	28.5	28.0	28.8
2003	27.6	29.1	30.3	30.5	29.9	29.9	29.1	29.5	29.6	29.7	29.1	27.7	29.3
2004	27.8	29.0	28.8	29.5	29.0	29.1	28.8	29.3	30.0	29.8	29.2	28.0	29.0
2005	27.1	27.7	30.3	30.3	30.3	30.0	30.1	29.6	29.3	28.4	28.2	28.4	29.2
2006	27.8	27.7	28.4	29.7	29.6	29.6	29.2	29.4	29.9	29.1	27.8	28.9	28.9
2007	27.8	29.0	29.0	30.1	29.9	29.5	29.6	28.8	29.8	27.9	27.9	28.0	28.9
2008	27.2	27.2	28.6	29.8	29.3	28.7	28.5	28.9	29.4	28.3	27.4	27.8	28.4
2009	27.1	26.8	27.4	28.6	29.5	29.8	28.6	28.9	30.1	28.9	28.0	29.1	28.6
2010	28.2	29.5	29.4	30.4	29.2	29.2	29.0	29.4	28.1	28.5	27.3	25.9	28.7
2011	27.1	28.4	27.9	29.4	29.5	29.4	29.2	29.7	29.7	27.9	27.8	26.6	28.5
2012	27.3	28.2	28.1	29.4	29.8	30.0	29.1	29.5	29.9	28.8	27.6	28.2	28.8
2013	27.7	28.4	29.0	30.2	29.9	29.4	29.0	29.0	29.8	29.3	29.3	28.2	29.1
Promedio Mensual	27.4	28.1	28.9	29.5	29.5	29.3	28.8	29.1	29.3	28.7	28.2	27.7	

Fuente: Elaborado con base en ETESA, (2013).

CUADRO XX. DATOS HISTÓRICOS DE LA HUMEDAD RELATIVA DE LA ESTACIÓN DE ETESA

Datos de la humedad relativa expresado en % de la estación de ETESA													
Periodo 1981-2013													
Estación: Santa Fe (132-033).							Provincia: Veraguas.						
Altitud: 463 m.				Latitud: 8°30'30" N				Longitud: 80°04'23" O					
Año	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Promedio Anual
1977	83.2	74.4	76.6	79.8	82.7	87.1	82.5	87.8	89.7	89.9	90.2	84.0	84.0
1978	81.6	82.4	77.7	75.3	85.3	86.7	85.0	83.5	88.8	90.3	86.4	85.4	84.0
1979	80.7	79.1	76.9	84.3	83.8	87.6	84.1	88.3	89.8	89.5	88.2	84.5	84.7
1980	80.9	81.4	76.9	74.3	84.2	84.7	83.7	85.5	86.8	87.2	86.5	83.0	82.9
1981	77.0	77.8	76.6	81.7	85.6	89.0	83.8	86.6	85.6	88.2	87.1	84.9	83.7
1982	81.1	75.5	76.0	76.0	82.0	83.6	80.8	81.0	83.6	84.1	80.8	79.7	80.3
1983	77.3	74.1	74.8	73.8	79.3	81.0	80.8	79.3	83.2	86.1	85.3	81.1	79.7
1984	78.6	77.3	76.7	75.4	79.2	84.4	82.5	83.2	86.8	84.1	83.6	79.5	81.0
1985	79.8	75.8	74.7	75.0	83.4	82.9	82.4	84.5	84.9	85.7	82.2	80.2	80.9
1986	80.2	74.7	74.1	75.9	77.0	84.1	82.3	82.5	86.0	86.8	83.6	79.7	80.6
1987	76.7	75.0	73.1	78.2	80.0	82.3	83.2	83.9	84.1	90.0	84.8	80.6	81.0
1988	78.5	78.7	74.0	73.4	81.3	87.5	86.3	89.2	88.5	89.7	86.0	82.3	82.9
1989	81.5	79.1	76.0	74.3	79.1	84.4	82.5	83.7	85.4	89.1	86.9	85.8	82.3
1990	85.1	84.3	82.7	85.6	87.3	85.5	85.5	85.9	88.2	89.4	88.2	85.2	86.1
1991	85.1	84.3	82.7	85.6	87.3	85.5	85.5	85.9	88.2	89.4	88.2	85.2	86.1
1992	82.9	79.7	77.5	78.6	81.3	81.9	83.7	83.3	86.3	84.8	84.6	82.8	82.3
1993	77.3	74.1	74.8	73.8	79.3	81.0	80.8	79.3	83.2	86.1	85.3	81.1	79.7
1994	81.8	80.1	75.3	78.9	84.0	86.5	85.0	84.6	86.5	88.1	87.0	83.4	83.4
1995	80.7	79.4	78.2	81.0	84.1	88.8	85.4	87.6	85.8	85.5	86.0	84.5	83.9
1996	85.9	84.3	83.7	82.3	87.0	89.1	87.5	87.9	87.3	90.0	88.4	85.6	86.6
1997	83.5	82.6	78.9	82.3	81.9	83.9	83.4	82.0	81.4	84.0	86.0	80.2	82.5
1998	78.6	78.3	76.8	76.6	81.0	85.8	86.2	86.9	88.4	88.9	85.9	86.6	83.3
1999	82.3	80.9	81.5	80.2	83.2	84.0	82.3	85.4	86.4	88.1	86.7	85.7	83.9
2000	81.0	81.2	78.5	78.4	81.9	84.7	84.4	83.7	85.5	86.2	83.5	83.1	82.7
2001	82.8	77.5	77.8	79.4	79.9	82.4	84.2	85.2	87.4	88.7	85.4	84.1	82.9
2002	82.3	79.5	78.8	79.7	84.7	88.4	85.7	85.3	87.3	88.6	85.1	82.5	84.0
2003	80.7	80.5	80.4	78.2	85.6	87.1	86.0	84.0	88.7	90.4	86.9	84.9	84.4
2004	83.1	81.7	81.0	81.0	86.3	85.7	87.2	85.7	88.0	88.0	85.6	84.0	84.8
2005	85.5	79.3	79.8	81.8	85.6	87.5	86.7	85.6	87.8	89.4	85.5	81.4	84.7
2006	83.2	79.8	79.6	78.6	83.2	85.4	85.3	85.7	85.6	86.1	88.6	83.0	83.7
2007	80.1	79.9	77.5	80.6	85.7	87.0	84.8	87.5	85.4	89.5	86.7	82.7	83.9
2008	80.9	80.6	77.7	77.9	82.9	85.6	87.3	86.8	87.6	89.0	86.8	82.0	83.8
2009	81.5	80.0	79.4	77.8	84.4	85.4	85.3	84.6	84.7	86.8	88.1	82.1	83.3
2010	79.3	81.6	80.3	80.6	85.7	88.1	88.6	88.0	89.4	88.0	88.4	85.8	85.3
2011	83.6	79.9	79.8	78.3	84.0	86.6	86.8	86.4	86.3	89.2	87.7	85.8	84.5
2012	82.6	80.8	80.6	83.3	85.3	86.6	83.5	86.2	85.5	87.3	85.7	83.5	84.2
2013	81.6	81.1	79.1	79.7	83.5	85.6	84.3	84.3	86.8	86.1	84.8	84.4	83.4
Promedio Mensual	81.3	79.4	78.0	78.9	83.2	85.5	84.5	85.1	86.5	87.8	86.1	83.2	

Fuente: Elaborado con base en ETESA, (2013).

CUADRO XXI. VELOCIDAD DEL VIENTO DE DATOS METEOROLÓGICOS GLOBALES DE SWAT

Velocidad del viento expresada en m s⁻¹ de Datos Meteorológicos globales de SWAT													
Periodo 1981-2013													
Estación: Santa Fe							Provincia: Veraguas.						
Altitud: 854 m.				Latitud: 8°35'10" N				Longitud: 80°56'15" O					
Año	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Promedio Anual
1981	3.2	3.0	2.5	2.6	1.2	1.2	1.3	1.4	1.3	1.2	1.8	2.4	1.9
1982	2.6	3.0	3.1	2.6	1.7	1.3	1.9	2.3	1.6	1.4	2.4	2.7	2.2
1983	3.5	2.9	2.8	2.5	1.9	1.2	1.6	1.7	1.3	1.3	1.3	2.2	2.0
1984	2.6	2.7	2.7	2.1	1.7	1.3	1.3	1.4	1.3	1.4	1.8	3.0	1.9
1985	3.3	3.4	3.2	2.6	1.4	1.3	1.5	1.3	1.2	1.3	2.0	2.5	2.1
1986	3.5	2.8	3.2	2.7	2.0	1.3	1.9	1.8	1.4	1.4	1.7	2.7	2.2
1987	3.4	3.3	2.5	2.8	1.5	1.3	1.2	1.4	1.3	1.4	1.9	2.4	2.0
1988	3.3	3.2	3.1	2.4	1.8	1.3	1.5	1.1	1.4	1.4	1.7	2.7	2.1
1989	3.3	3.9	3.1	3.1	2.0	1.5	1.8	1.4	1.1	1.7	1.6	2.5	2.3
1990	2.9	3.7	2.6	2.5	1.6	1.6	1.9	1.8	1.5	1.3	2.1	2.8	2.2
1991	2.9	3.7	2.6	2.5	1.6	1.6	1.9	1.8	1.5	1.3	2.1	2.8	2.2
1992	3.4	3.1	3.7	2.8	2.1	1.3	1.6	1.8	1.5	1.7	1.8	2.7	2.3
1993	2.8	3.4	2.9	2.2	1.5	1.4	1.8	1.6	1.5	1.3	1.9	2.7	2.1
1994	3.2	3.2	2.9	2.7	1.8	1.6	1.8	1.8	1.5	1.1	1.8	2.6	2.2
1995	3.2	3.3	2.4	1.7	1.2	1.2	1.4	1.2	1.2	1.4	1.9	2.1	1.9
1996	2.7	3.0	2.9	2.5	1.4	1.5	1.5	1.4	1.1	1.7	2.1	2.7	2.1
1997	2.6	3.0	3.6	2.4	2.3	1.2	2.0	2.1	1.5	1.4	1.2	2.8	2.2
1998	3.3	2.5	3.2	2.5	1.7	1.3	1.4	1.3	1.4	1.8	1.6	2.1	2.0
1999	2.7	3.1	3.1	2.5	1.3	1.2	1.7	1.3	1.1	1.3	1.7	2.3	1.9
2000	3.1	3.6	3.1	2.9	1.7	1.5	1.8	1.5	1.3	1.6	1.8	2.6	2.2
2001	3.2	4.0	3.0	3.3	1.9	1.8	1.7	1.6	1.3	1.5	2.1	2.3	2.3
2002	3.2	3.7	3.7	3.2	2.2	1.4	1.9	1.9	1.2	1.4	2.2	2.9	2.4
2003	3.9	3.4	2.8	2.6	1.6	1.2	1.6	1.6	1.2	1.1	1.5	2.5	2.1
2004	3.1	3.3	3.8	2.7	1.8	1.7	1.6	1.8	1.2	1.2	2.0	2.8	2.3
2005	3.3	3.7	2.3	2.5	1.5	1.1	1.4	1.5	1.4	1.6	1.8	2.3	2.0
2006	2.9	3.6	3.4	2.6	1.8	1.5	1.6	1.5	1.5	1.5	1.8	2.3	2.2
2007	3.6	3.4	3.4	2.1	1.5	1.4	1.6	1.3	1.3	1.4	2.1	2.4	2.1
2008	3.3	3.1	3.1	2.7	1.9	1.4	1.5	1.4	1.3	1.5	1.9	2.7	2.1
2009	3.1	3.7	3.4	3.0	1.8	1.3	1.9	1.8	1.7	1.4	1.9	2.4	2.3
2010	3.5	2.9	3.0	2.3	1.8	1.3	1.0	1.1	1.4	1.5	2.0	3.1	2.1
2011	2.6	2.7	2.6	2.2	1.3	1.0	1.2	1.2	1.0	1.1	1.7	2.4	1.7
2012	3.0	3.0	3.2	1.8	1.2	1.2	1.8	1.2	1.3	1.3	2.2	2.5	2.0
2013	3.1	3.0	3.0	2.4	1.6	1.2	1.4	1.2	0.9	1.0	1.6	2.4	1.9
Promedio Mensual	3.1	3.3	3.0	2.5	1.7	1.3	1.6	1.5	1.3	1.4	1.8	2.6	

Fuente: Elaborado con base en SWAT, (1981).

CUADRO XXII. DATOS HISTÓRICOS DE INSOLACIÓN DE LA ESTACIÓN DE ETESA

Datos de insolación expresado en horas de la estación de ETESA													
Periodo 1981-2013													
Estación: Santa Fe (132-033).							Provincia: Veraguas.						
Altitud: 463 m.				Latitud: 8°30'30" N					Longitud: 80°04'23" O				
Año	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Promedio Anual
1981	4.1	4.2	5.6	4.7	5.5	5.2	5.5	5.8	6.3	5.4	4.4	4.0	5.1
1982	4.2	5.0	5.3	5.6	5.9	5.8	4.5	4.7	5.5	5.3	4.5	4.6	5.1
1983	4.7	5.6	5.7	6.0	4.8	6.3	5.1	5.4	5.8	5.4	5.4	4.1	5.4
1984	4.6	4.8	5.6	6.2	6.3	5.7	6.4	5.9	6.0	5.3	4.9	3.9	5.5
1985	4.3	4.4	4.9	5.2	5.8	5.7	5.6	5.6	5.8	5.5	4.5	4.1	5.1
1986	3.1	5.4	5.3	4.4	6.1	5.0	4.3	5.0	5.6	5.3	4.4	4.6	4.9
1987	4.2	4.8	6.3	3.6	5.5	5.9	5.9	5.4	5.8	5.0	4.6	4.3	5.1
1988	4.3	4.4	5.0	6.1	5.7	6.2	5.4	6.2	5.8	5.1	5.2	4.1	5.3
1989	3.9	4.4	5.6	5.2	6.0	5.5	6.1	6.2	6.2	6.3	6.1	5.2	5.6
1990	4.7	5.2	5.6	7.3	6.3	6.1	5.9	6.0	6.4	5.7	5.6	4.4	5.8
1991	4.7	4.9	6.2	6.8	6.4	5.7	6.2	6.4	5.9	6.4	5.5	4.7	5.8
1992	4.8	6.0	6.1	7.0	6.5	7.3	6.5	6.3	5.9	6.0	5.9	5.2	6.1
1993	5.3	5.5	5.9	6.5	7.0	6.8	5.8	6.8	6.2	6.2	5.7	4.7	6.0
1994	5.2	5.3	6.1	6.5	6.1	5.8	5.9	6.3	6.3	6.5	5.1	4.7	5.8
1995	5.3	5.7	6.9	7.1	7.0	6.6	6.9	6.3	6.3	5.7	5.2	4.7	6.1
1996	5.6	5.3	6.1	6.8	7.6	6.9	7.1	7.3	7.5	6.4	5.6	4.9	6.4
1997	6.1	5.2	6.6	7.4	6.6	6.9	7.1	7.4	7.3	5.3	5.9	5.7	6.5
1998	5.9	6.5	6.4	6.9	7.0	6.5	6.1	6.3	6.7	5.6	5.9	5.8	6.3
1999	5.1	5.4	5.8	6.3	7.0	6.9	6.3	7.1	6.9	5.7	5.4	4.9	6.1
2000	5.3	5.9	5.7	5.8	6.3	6.6	5.5	6.1	6.6	5.7	6.0	5.4	5.9
2001	5.3	5.3	6.4	5.4	6.9	6.1	6.3	6.4	6.2	5.9	4.4	5.0	5.8
2002	4.8	5.1	5.6	5.5	6.0	6.8	6.3	6.3	7.1	6.6	5.7	5.3	5.9
2003	5.1	6.1	6.6	6.8	6.5	7.1	6.5	6.6	6.4	6.6	6.0	5.4	6.3
2004	5.9	6.3	5.7	6.8	6.8	6.4	6.1	5.6	6.9	6.9	6.3	5.9	6.3
2005	5.2	5.9	7.0	6.9	7.5	6.8	7.8	7.3	6.7	5.8	5.9	5.9	6.6
2006	4.9	5.4	5.4	6.6	6.3	6.3	6.2	6.3	6.5	5.8	5.3	5.4	5.9
2007	4.8	5.7	5.2	6.5	6.5	6.6	6.1	6.0	6.2	4.9	4.3	4.6	5.6
2008	3.8	4.2	5.1	5.6	5.6	5.1	5.2	5.9	6.0	5.1	4.4	4.5	5.0
2009	3.9	3.8	4.4	4.8	5.6	6.2	4.7	5.1	6.1	5.5	4.4	4.8	4.9
2010	4.3	4.7	4.8	5.7	4.9	5.5	6.1	6.1	5.2	5.4	4.6	3.7	5.1
2011	3.9	4.8	4.8	5.8	5.8	5.6	5.7	6.4	6.3	5.2	4.8	3.5	5.2
2012	4.3	4.8	4.6	5.9	5.9	6.4	5.0	6.1	6.4	5.3	3.9	4.3	5.2
2013	3.9	5.1	5.4	5.7	6.1	6.0	5.5	5.7	6.4	5.9	5.8	4.8	5.5
Promedio Mensual	4.7	5.2	5.7	6.0	6.2	6.2	5.9	6.1	6.3	5.7	5.2	4.8	

Fuente: Elaborado con base en ETESA, (2013).

CUADRO XXIII. DATOS HISTÓRICOS DE RADIACIÓN SOLAR DE LA ESTACIÓN DE ETESA

Datos de radiación solar expresado en MJ m⁻² de la estación de ETESA													
Periodo 1981-2013													
Estación: Santa Fe (132-033).							Provincia: Veraguas.						
Altitud: 463 m.				Latitud: 8°30'30" N				Longitud: 80°04'23" O					
Año	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Promedio Anual
1981	13.9	14.9	17.9	16.7	17.5	16.8	17.3	18.1	19	16.8	14.5	13.4	16.40
1982	14	16.1	17.5	18.2	18.1	17.7	15.9	16.5	17.8	16.7	14.6	14.2	16.44
1983	14.7	17	18.1	18.7	16.6	18.4	16.8	17.5	18.2	16.9	15.8	13.6	16.86
1984	14.5	15.8	17.9	19.1	18.7	17.6	18.6	18.3	18.4	16.8	15.2	13.2	17.01
1985	14.2	15.3	16.8	17.6	18	17.5	17.5	17.8	18.2	17	14.6	13.6	16.51
1986	12.5	16.7	17.4	16.3	18.5	16.6	15.6	16.9	17.8	16.8	14.5	14.2	16.15
1987	14	15.8	19	15	17.5	17.7	18	17.5	18.2	16.3	14.8	13.8	16.47
1988	14.2	15.2	17	19	17.9	18.2	17.1	18.7	18.2	16.5	15.6	13.6	16.77
1989	13.6	15.3	17.9	17.5	18.4	17.2	18.2	18.8	18.7	18.2	16.9	15	17.14
1990	14.7	16.4	18	20.7	18.8	18.1	17.9	18.5	19.2	17.3	16.1	14	17.48
1991	14.7	16	18.8	20	18.9	17.5	18.3	19.1	18.3	18.4	16	14.4	17.53
1992	14.9	17.6	18.6	20.3	19.1	19.9	18.7	18.8	18.4	17.8	16.6	15	17.98
1993	15.6	16.9	18.3	19.6	19.8	19.2	17.7	19.6	18.8	18	16.3	14.4	17.85
1994	15.4	16.6	18.7	19.6	18.5	17.7	17.9	19	18.9	18.6	15.4	14.4	17.56
1995	15.6	17.1	19.9	20.5	19.8	18.9	19.3	18.9	18.9	17.4	15.6	14.4	18.03
1996	16	16.6	18.8	19.9	20.7	19.2	19.6	20.4	20.8	18.3	16.1	14.6	18.42
1997	16.7	16.5	19.4	20.8	19.3	19.3	19.7	20.5	20.5	16.8	16.5	15.8	18.48
1998	16.4	18.4	19.1	20.1	19.8	18.6	18.2	18.9	19.6	17.1	16.5	15.8	18.21
1999	15.3	16.7	18.2	19.2	19.9	19.3	18.5	20.1	19.8	17.4	15.9	14.6	17.91
2000	15.6	17.5	18.1	18.5	18.8	18.8	17.3	18.6	19.4	17.4	16.8	15.2	17.67
2001	15.6	16.6	19.2	17.8	19.7	18.1	18.5	19.1	18.8	17.7	14.5	14.7	17.53
2002	14.8	16.2	18	18	18.3	19.1	18.5	19	20.1	18.7	16.3	15.1	17.68
2003	15.3	17.8	19.4	20	19.1	19.6	18.8	19.3	19.1	18.6	16.6	15.4	18.25
2004	16.4	18.1	18.1	20	19.5	18.6	18.3	17.8	19.8	19.1	17.2	16	18.24
2005	15.4	17.4	20.1	20.2	20.5	19.1	20.7	20.4	19.6	17.5	16.5	16	18.62
2006	15	16.6	17.5	19.7	18.8	18.3	18.3	19	19.2	17.5	15.7	15.3	17.58
2007	14.9	17.2	17.3	19.5	19.1	18.8	18.2	18.5	18.9	16.1	14.3	14.2	17.25
2008	13.4	14.9	17.2	18.2	17.8	16.7	17	18.3	18.4	16.4	14.4	14.1	16.40
2009	13.7	14.3	16	17	17.7	18.2	16.1	17.2	18.6	17	14.5	14.5	16.23
2010	14.2	15.7	16.6	18.2	16.6	17.2	18.2	18.6	17.3	16.9	14.8	13	16.44
2011	13.6	15.9	16.7	18.4	18.1	17.4	17.6	19.1	18.9	16.6	15.1	12.7	16.68
2012	14.1	15.8	16.4	18.6	18.2	18.5	16.5	18.5	19.1	16.8	13.7	13.8	16.67
2013	13.7	16.3	17.6	18.3	18.5	17.9	17.3	18	19.1	17.6	16.5	14.4	17.10
Promedio Mensual	14.7	16.4	18.0	18.8	18.7	18.2	17.9	18.6	18.9	17.4	15.6	14.4	

Fuente: Elaborado con base en ETESA, (2013).

CUADRO XXIV. DATOS HISTÓRICOS DE PRECIPITACIÓN DE LA ESTACIÓN DE ETESA

Datos de precipitación expresado en mm mes ⁻¹ de la estación de ETESA													
Periodo 1981-2013													
Estación: Santa Fe	Provincia: Veracruz.			Altitud: 854 m.			Latitud: 8°35'10" N			Longitud: 80°56'15" O			
Año	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Ppt total Anual
1981	49.3	43.1	24.5	103.8	395.9	343.8	141.2	321.4	192.8	439.7	278.2	220.0	2553.7
1982	47.5	10.3	10.0	94.7	351.6	230.9	184.5	117.6	356.6	280.9	159.9	20.1	1864.6
1983	25.2	27.6	40.0	62.2	117.3	259.6	169.7	177.1	326.3	280.6	229.0	79.5	1794.1
1984	21.2	63.9	46.8	30.9	188.4	440.1	502.8	417.3	471.6	276.5	167.9	45.6	2673.0
1985	47.8	12.1	9.1	46.2	124.1	288.6	227.4	401.9	263.5	274.8	158.7	100.5	1954.7
1986	101.6	4.4	36.2	15.8	222.0	282.0	61.4	254.8	250.6	427.4	84.5	69.6	1810.3
1987	18.3	7.3	56.3	97.0	148.8	61.6	228.9	193.1	258.8	537.6	62.2	51.1	1721.0
1988	25.8	19.8	36.1	21.6	258.8	311.2	382.4	548.0	453.7	542.0	321.1	55.1	2975.6
1989	34.7	67.2	20.2	26.4	175.0	211.2	224.3	329.4	224.3	252.2	207.1	182.7	1954.7
1990	104.8	13.7	9.5	2.8	180.2	78.5	172.7	175.5	234.8	351.4	252.5	218.4	1794.8
1991	2.7	1.9	50.4	26.9	242.2	256.8	58.9	145.7	396.5	248.4	92.1	46.3	1568.8
1992	4.1	6.0	2.2	203.3	196.9	183.9	205.8	231.4	417.3	258.1	110.5	84.8	1904.3
1993	45.5	9.5	166.9	76.6	230.3	219.0	78.3	185.5	418.8	383.1	227.4	210.2	2251.1
1994	45.5	4.3	4.3	74.2	449.9	161.5	149.6	195.2	261.5	331.5	229.1	44.2	1950.7
1995	45.5	1.9	85.3	97.9	180.5	329.6	304.7	252.8	405.6	238.2	118.8	62.7	2123.5
1996	166.2	75.8	30.8	25.4	36.8	186.4	195.5	324.4	307.2	288.1	315.1	103.2	2054.9
1997	46.6	37.1	3.7	109.9	53.3	218.1	131.1	48.6	279.7	130.3	190.5	26.4	1275.3
1998	3.6	27.4	13.0	43.3	181.2	263.9	214.0	271.7	412.2	238.7	174.2	271.6	2114.8
1999	77.4	16.4	67.0	82.1	382.3	249.4	148.5	448.4	512.4	511.7	191.9	401.1	3088.6
2000	132.6	32.2	10.4	40.8	307.7	247.6	183.4	222.8	429.0	164.6	316.3	113.2	2200.6
2001	9.7	1.5	7.8	39.4	212.0	122.0	238.3	241.7	236.0	269.6	143.0	115.2	1636.2
2002	64.6	22.2	14.3	212.8	406.1	278.3	268.2	343.0	367.4	322.9	367.7	45.7	2713.2
2003	14.0	18.5	51.8	47.0	264.1	413.5	272.1	229.4	276.5	504.4	278.4	351.4	2721.1
2004	20.1	2.7	14.4	32.2	368.3	233.8	215.0	261.5	487.3	293.5	276.7	79.0	2284.5
2005	158.1	6.6	71.5	113.2	170.9	362.3	224.2	263.7	275.3	423.3	160.0	68.7	2297.8
2006	77.1	15.1	30.7	78.0	129.3	293.3	202.3	277.1	131.3	380.7	383.1	200.2	2198.2
2007	16.0	5.4	28.2	111.0	304.0	344.6	150.0	352.3	378.3	669.0	216.3	131.3	2706.4
2008	19.9	40.9	7.9	39.8	351.8	148.9	389.0	313.3	329.4	322.8	503.3	27.9	2494.9
2009	27.0	245.0	61.1	18.2	129.5	359.0	93.1	239.9	169.3	362.4	414.7	29.8	2149.0
2010	14.9	32.3	48.2	106.7	132.7	365.5	438.3	482.9	404.0	322.5	345.4	308.6	3002.0
2011	13.4	67.2	14.8	90.0	330.5	236.1	304.9	435.2	304.7	415.2	347.3	188.4	2747.7
2012	29.8	15.6	77.0	175.5	265.4	158.0	97.9	343.4	224.3	300.5	148.0	93.9	1929.3
2013	7.2	8.5	44.8	2.9	163.5	279.7	152.8	321.4	314.4	282.6	176.0	35.9	1789.7
Media	45.9	29.2	36.2	71.2	231.9	255.1	212.5	283.9	326.4	343.2	231.7	123.7	2190.9
Desviación estándar	43.27	44.03	33.20	53.01	105.17	89.20	103.83	108.58	96.78	115.61	104.03	100.27	451.40
Coefficiente de variación	0.94	1.51	0.92	0.74	0.45	0.35	0.49	0.38	0.30	0.34	0.45	0.81	0.21

Fuente: Elaborado con base en ETESA, (2013).

CUADRO XXV. DATOS DE EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO DE REFERENCIA MENSUAL EN CROPWAT

Datos de Evapotranspiración del cultivo de referencia expresados en mm mes ⁻¹ de la estación de ETESA analizados en CROPWAT													
Periodo 1981-2013													
Estación: Santa Fe	Provincia: Veraguas.			Altitud: 854 m.		Latitud: 8°35'10" N			Longitud: 80°56'15" O				
Año	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Promedio Anual
1981	105.8	99.7	128.8	111.9	112.2	102.2	110.9	113.9	115.3	103.9	90.0	90.4	1284.8
1982	99.5	111.6	131.2	129.3	120.5	111.7	109.6	116.1	112.3	106.0	99.2	103.7	1350.6
1983	115.5	118.1	139.0	137.8	118.3	118.0	114.8	119.6	113.4	105.5	96.8	94.1	1390.9
1984	103.4	103.6	129.8	130.7	126.3	108.8	118.6	116.0	109.7	108.2	99.0	98.5	1352.5
1985	102.1	106.6	127.6	124.3	118.4	110.3	113.5	112.6	110.7	106.5	94.9	97.6	1325.0
1986	96.2	110.5	132.0	119.2	131.9	104.7	106.3	112.6	109.4	104.6	93.1	103.9	1324.3
1987	111.2	113.3	143.0	111.1	118.3	113.5	118.1	115.8	114.2	101.2	94.8	100.6	1354.8
1988	109.0	103.1	132.5	136.3	122.0	111.0	109.0	115.0	109.0	101.5	95.5	94.3	1338.0
1989	99.1	102.7	127.9	130.3	125.1	106.6	117.3	118.9	113.9	111.6	101.9	97.0	1352.4
1990	97.0	99.1	118.1	129.1	119.3	111.6	114.7	118.5	115.3	104.6	97.5	93.0	1317.6
1991	97.7	97.6	125.7	123.8	117.8	109.7	117.2	120.4	109.7	112.2	95.0	94.0	1321.0
1992	103.3	111.4	137.8	137.3	125.3	123.0	118.7	120.3	110.6	112.3	102.0	100.2	1402.1
1993	111.3	114.9	132.5	133.0	129.5	118.8	117.7	127.9	116.1	113.0	101.1	100.6	1416.1
1994	106.6	104.7	137.4	132.2	119.6	107.4	113.3	121.1	114.5	113.7	93.6	97.3	1361.4
1995	109.3	109.9	136.9	130.0	125.1	112.3	121.7	116.3	114.5	108.2	96.0	95.9	1375.8
1996	99.6	97.3	119.8	125.9	126.8	112.4	118.0	122.9	122.6	109.2	92.9	93.0	1340.4
1997	106.9	98.8	134.6	131.8	125.8	117.3	124.6	131.6	127.6	109.7	100.3	111.0	1420.1
1998	119.0	116.8	140.6	138.9	132.2	115.3	114.6	118.1	118.4	105.9	100.7	99.0	1419.5
1999	101.2	102.1	120.5	124.3	124.6	114.3	118.6	123.2	116.4	106.2	94.4	91.2	1337.0
2000	105.1	104.1	127.7	125.8	122.1	114.8	111.4	119.0	116.7	109.0	104.1	101.1	1360.8
2001	103.7	111.6	134.1	122.2	131.3	114.6	117.3	120.7	112.6	109.6	90.5	97.2	1365.3
2002	103.0	106.7	131.0	121.9	119.6	114.5	116.6	121.5	121.8	115.1	101.5	103.8	1376.7
2003	110.3	112.2	134.5	136.8	122.8	118.3	118.2	123.4	114.9	113.9	100.9	98.9	1405.1
2004	107.6	110.9	127.8	129.8	121.1	113.3	113.8	115.4	119.4	117.6	105.8	104.3	1386.9
2005	99.5	109.2	134.9	131.7	129.6	116.3	128.6	126.9	116.8	106.3	99.6	106.7	1406.2
2006	102.8	106.9	124.8	131.2	122.9	113.8	117.4	120.3	118.6	111.4	92.6	103.1	1365.8
2007	110.1	111.0	130.4	127.8	122.5	114.4	118.6	115.0	116.5	99.2	90.0	97.9	1353.3
2008	100.9	96.7	126.0	127.9	118.9	104.7	107.8	115.0	112.4	102.3	88.8	99.0	1300.5
2009	99.8	97.3	116.7	120.9	116.8	113.6	107.1	113.0	118.4	107.9	88.8	102.9	1303.1
2010	108.5	103.2	122.4	125.1	111.4	106.7	113.0	116.8	103.4	105.5	89.2	85.5	1290.8
2011	93.1	102.4	116.7	123.6	117.1	107.7	112.0	120.9	116.1	101.8	91.0	84.9	1287.1
2012	98.8	101.5	117.8	117.5	117.4	114.5	111.7	117.9	117.9	106.0	88.7	96.5	1306.1
2013	100.8	103.1	125.8	125.8	122.2	110.8	112.7	115.0	116.0	110.3	102.3	97.0	1341.7
Promedio Mensual	104.16	106.01	129.29	127.42	122.25	112.32	115.25	118.83	115.00	107.87	96.13	97.99	

CUADRO XXVI. DATOS DE EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO DE REFERENCIA DIARIA EN CROPWAT

Datos de Evapotranspiración del cultivo de referencia expresados en mm día⁻¹ de la estación de ETESA													
Periodo 1981-2006													
Estación: Santa Fe (132-033).							Provincia: Veraguas.						
Altitud: 463 m.				Latitud: 8°30'30" N				Longitud: 80°04'23" O					
Año	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Promedio Anual
1981	3.4	3.6	4.2	3.7	3.6	3.4	3.6	3.7	3.8	3.4	3.0	2.9	3.5
1982	3.2	4.0	4.2	4.3	3.9	3.7	3.5	3.8	3.7	3.4	3.3	3.3	3.7
1983	3.7	4.2	4.5	4.6	3.8	3.9	3.7	3.9	3.8	3.4	3.2	3.0	3.8
1984	3.3	3.7	4.2	4.4	4.1	3.6	3.8	3.7	3.7	3.5	3.3	3.2	3.7
1985	3.3	3.8	4.1	4.1	3.8	3.7	3.7	3.6	3.7	3.4	3.2	3.2	3.6
1986	3.1	4.0	4.3	4.0	4.3	3.5	3.4	3.6	3.7	3.4	3.1	3.4	3.6
1987	3.6	4.1	4.6	3.7	3.8	3.8	3.8	3.7	3.8	3.3	3.2	3.2	3.7
1988	3.5	3.7	4.3	4.5	3.9	3.7	3.5	3.7	3.6	3.3	3.2	3.0	3.7
1989	3.2	3.7	4.1	4.3	4.0	3.6	3.8	3.8	3.8	3.6	3.4	3.1	3.7
1990	3.1	3.5	3.8	4.3	3.9	3.7	3.7	3.8	3.8	3.4	3.3	3.0	3.6
1991	3.2	3.5	4.1	4.1	3.8	3.7	3.8	3.9	3.7	3.6	3.2	3.0	3.6
1992	3.3	4.0	4.5	4.6	4.0	4.1	3.8	3.9	3.7	3.6	3.4	3.2	3.8
1993	3.6	4.1	4.3	4.4	4.2	4.0	3.8	4.1	3.9	3.6	3.4	3.2	3.9
1994	3.4	3.7	4.4	4.4	3.9	3.6	3.7	3.9	3.8	3.7	3.1	3.1	3.7
1995	3.5	3.9	4.4	4.3	4.0	3.7	3.9	3.8	3.8	3.5	3.2	3.1	3.8
1996	3.2	3.5	3.9	4.2	4.1	3.8	3.8	4.0	4.1	3.5	3.1	3.0	3.7
1997	3.5	3.5	4.3	4.4	4.1	3.9	4.0	4.3	4.3	3.5	3.3	3.6	3.9
1998	3.8	4.2	4.5	4.6	4.3	3.8	3.7	3.8	4.0	3.4	3.4	3.2	3.9
1999	3.3	3.7	3.9	4.1	4.0	3.8	3.8	4.0	3.9	3.4	3.2	2.9	3.7
2000	3.4	3.7	4.1	4.2	3.9	3.8	3.6	3.8	3.9	3.5	3.5	3.3	3.7
2001	3.4	4.0	4.3	4.1	4.2	3.8	3.8	3.9	3.8	3.5	3.0	3.1	3.7
2002	3.3	3.8	4.2	4.1	3.9	3.8	3.8	3.9	4.1	3.7	3.4	3.4	3.8
2003	3.6	4.0	4.3	4.6	4.0	3.9	3.8	4.0	3.8	3.7	3.4	3.2	3.9
2004	3.5	4.0	4.1	4.3	3.9	3.8	3.7	3.7	4.0	3.8	3.5	3.4	3.8
2005	3.2	3.9	4.4	4.4	4.2	3.9	4.2	4.1	3.9	3.4	3.3	3.4	3.9
2006	3.3	3.8	4.0	4.4	4.0	3.8	3.8	3.9	4.0	3.6	3.1	3.3	3.7
2007	3.6	4.0	4.2	4.3	4.0	3.8	3.8	3.7	3.9	3.2	3.0	3.2	3.7
2008	3.3	3.5	4.1	4.3	3.8	3.5	3.5	3.7	3.8	3.3	3.0	3.2	3.6
2009	3.2	3.5	3.8	4.0	3.8	3.8	3.5	3.7	4.0	3.5	3.0	3.3	3.6
2010	3.5	3.7	4.0	4.2	3.6	3.6	3.7	3.8	3.5	3.4	3.0	2.8	3.5
2011	3.0	3.7	3.8	4.1	3.8	3.6	3.6	3.9	3.9	3.3	3.0	2.7	3.5
2012	3.2	3.6	3.8	3.9	3.8	3.8	3.6	3.8	3.9	3.4	3.0	3.1	3.6
2013	3.3	3.7	4.1	4.2	3.9	3.7	3.6	3.7	3.9	3.6	3.4	3.1	3.7
Promedio Mensual	3.4	3.8	4.2	4.2	3.9	3.7	3.7	3.8	3.8	3.5	3.2	3.2	

ANEXO E. IMÁGENES SATELITALES LANDSAT

CUADRO XXVII. RESULTADO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA PARA LAS IMÁGENES SATELITALES LANDSAT

Datos de evapotranspiración del cultivo de referencia (ET _o) de las imágenes satelitales Landsat					
	Fecha	Pantano (Pajonal) mm día ⁻¹	El Alto (El Gallo) mm día ⁻¹	Santa Fe (Alto de Piedra) mm día ⁻¹	Estado de la Imagen
Diciembre	06/12/2020	4.15	4.18	4.27	Buen estado
	14/12/2020	3.99	4.03	4.15	Buen estado
	22/12/2020	3.01	3.06	3.20	Buen estado
	30/12/2020	3.85	3.91	4.00	Buen estado
Enero	07/01/2021	4.31	4.35	4.42	Buen estado
	15/01/2021	3.72	3.77	3.87	Buen estado
	23/01/2021	4.25	4.32	4.39	Buen estado
	31/01/2021	3.72	3.80	3.88	Buen estado
Febrero	08/02/2021	4.06	4.10	4.26	Buen estado
	16/02/2021	4.43	4.45	4.54	Buen estado
	24/02/2021	3.16	3.21	3.36	Buen estado
Marzo	04/03/2021	4.04	4.14	4.15	Buen estado
	12/03/2021	4.34	4.40	4.54	Buen estado
	20/03/2021	4.70	4.77	4.86	Buen estado
	28/03/2021	5.33	5.41	5.49	Buen estado
Abril	05/04/2021	4.09	4.12	4.28	Buen estado
	13/04/2021	4.50	4.50	4.65	Buen estado
	21/04/2021	4.80	4.83	4.95	Buen estado
	29/04/2021	3.99	4.01	4.03	Buen estado

CUADRO XXVIII. RESULTADO DE LA FRACCIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO DE REFERENCIA PARA LAS IMÁGENES SATELITALES LANDSAT

Datos de imágenes Landsat de la fracción de la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_oF)					
	Fecha	Pantano (Pajonal) mm día⁻¹	El Alto (El Gallo) mm día⁻¹	Santa Fe (Alto de Piedra) mm día⁻¹	Estado de la Imagen
Diciembre	06/12/2020	0.48	0.73	0.56	Buen estado
	14/12/2020	0.48	0.73	0.56	Buen estado
	22/12/2020	0.48	0.73	0.56	Buen estado
	30/12/2020	0.48	0.50	0.63	Buen estado
Enero	07/01/2021	0.29	0.75	0.80	Buen estado
	15/01/2021	0.29	0.75	0.80	Buen estado
	23/01/2021	0.75	0.75	0.29	Buen estado
	31/01/2021	0.24	0.97	0.20	Fragmentada y con pocas nubes.
Febrero	08/02/2021	0.53	0.77	0.83	Buen estado pocas nubes
	16/02/2021	0.53	0.77	0.83	Buen estado pocas nubes
	24/02/2021	0.53	0.77	0.83	Buen estado pocas nubes
Marzo	04/03/2021	0.08	0.95	0.59	Pocas nubes
	12/03/2021	0.24	0.97	0.20	Pocas nubes
	20/03/2021	0.16	0.90	0.01	Fragmentada, con pocas nubes
	28/03/2021	0.19	0.90	0.01	Fragmentada, pero sin nubes que afecten la data.
Abril	05/04/2021	0.19	0.90	0.01	Fragmentada, pero sin nubes que afecten la data.
	13/04/2021	0.29	0.01	0.41	Nubes
	21/04/2021	0.29	0.01	0.41	Nubes
	29/04/2021	1.05	1.96	0.15	Fragmentada y con nubes.
Descripción					
		Nubes			
		Espacio fragmentado			
		Datos de fincas vecinas			

CUADRO XXIX. RESULTADO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO DE CAFÉ PARA LAS IMÁGENES SATELITALES LANDSAT

Datos de imágenes Landsat de evapotranspiración del cultivo (ETc)					
	Fecha	Pantano (Pajonal) mm día ⁻¹	El Alto (El Gallo) mm día ⁻¹	Santa Fe (Alto de Piedra) mm día ⁻¹	Estado de la Imagen
Diciembre	06/12/2020	1.63	2.76	2.40	Buen estado
	14/12/2020	1.57	2.66	2.34	Buen estado
	22/12/2020	1.18	2.02	2.10	Buen estado
	30/12/2020	1.51	1.99	2.44	Buen estado
Enero	07/01/2021	1.12	2.85	3.53	Buen estado
	15/01/2021	0.97	2.47	2.91	Buen estado
	23/01/2021	1.11	2.83	3.30	Buen estado
	31/01/2021	0.76	3.67	0.77	Fragmentada y con pocas nubes.
Febrero	08/02/2021	2.12	2.84	3.81	Buen estado pocas nubes
	16/02/2021	2.31	3.08	4.07	Buen estado pocas nubes
	24/02/2021	1.65	2.22	3.01	Buen estado pocas nubes
Marzo	04/03/2021	0.32	3.76	2.43	Pocas nubes
	12/03/2021	0.34	3.99	2.80	Pocas nubes
	20/03/2021	0.94	4.23	0.01	Fragmentada, con pocas nubes
	28/03/2021	1.01	4.77	0.04	Fragmentada, pero sin nubes que afecten la data.
Abril	05/04/2021	0.78	3.64	0.01	Fragmentada, pero sin nubes que afecten la data.
	13/04/2021	2.04	0.03	2.04	Nubes
	21/04/2021	2.17	0.03	2.17	Nubes
	29/04/2021	3.45	7.85	1.81	Fragmentada y con nubes.
Descripción					
		Nubes			
		Espacio fragmentado			
		Datos de fincas vecinas			

CUADRO XXX. COMPARACIÓN DE DATOS DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO DE REFERENCIA EN LA FINCA EL PANTANO, PAJONAL

Comparación de la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET _o) de la finca El Pantano, Pajonal											
	Fecha	Imagen Landsat	Estación Tempest		Fecha	Imagen Landsat	Estación Tempest		Fecha	Imagen Landsat	Estación Tempest
Diciembre	12/12/20	4.03	3.75	Enero	28/1/21	3.92	4.16	Marzo	16/3/21	4.52	4.87
	13/12/20	4.01	3.73		29/1/21	3.85	4.00		17/3/21	4.57	5.51
	14/12/20	3.99	3.90		30/1/21	3.79	3.85		18/3/21	4.61	3.32
	15/12/20	3.87	4.35		31/1/21	3.72	3.93		19/3/21	4.66	4.34
	16/12/20	3.75	4.70		1/2/21	3.77	3.64		20/3/21	4.70	4.02
	17/12/20	3.62	1.90		2/2/21	3.81	3.48		21/3/21	4.78	4.58
	18/12/20	3.50	2.99		3/2/21	3.85	2.18		22/3/21	4.86	4.89
	19/12/20	3.38	3.02		4/2/21	3.89	3.17		23/3/21	4.94	4.81
	20/12/20	3.25	3.35		5/2/21	3.93	4.01		24/3/21	5.02	5.44
	21/12/20	3.13	3.80		6/2/21	3.98	3.96		25/3/21	5.10	5.31
	22/12/20	3.01	3.70		7/2/21	4.02	4.17		26/3/21	5.18	4.26
	23/12/20	3.11	3.58		8/2/21	4.06	5.19		27/3/21	5.25	5.88
	24/12/20	3.22	3.18		9/2/21	4.11	3.04		28/3/21	5.33	4.75
	25/12/20	3.32	3.40		10/2/21	4.15	4.83		29/3/21	5.18	4.08
	26/12/20	3.43	3.31		11/2/21	4.20	4.19		30/3/21	5.02	3.92
	27/12/20	3.53	3.80		12/2/21	4.24	4.73		31/3/21	4.87	4.48
	28/12/20	3.64	2.50		13/2/21	4.29	4.54		1/4/21	4.71	3.86
	29/12/20	3.74	3.67		14/2/21	4.33	4.81		2/4/21	4.56	1.70
	30/12/20	3.85	4.03		15/2/21	4.38	5.24		3/4/21	4.40	4.59
31/12/20	3.91	4.57	16/2/21	4.43	4.45	4/4/21	4.24	4.23			
Enero	1/1/21	3.98	3.73	Febrero	17/2/21	4.27	4.59	5/4/21	4.09	4.20	
	2/1/21	4.05	2.77		18/2/21	4.11	4.50	6/4/21	4.14	4.55	
	3/1/21	4.11	3.35		19/2/21	3.95	4.33	7/4/21	4.19	2.98	
	4/1/21	4.18	3.06		20/2/21	3.79	3.28	8/4/21	4.24	2.76	
	5/1/21	4.24	3.68		21/2/21	3.63	4.01	9/4/21	4.29	3.81	
	6/1/21	4.31	3.68		22/2/21	3.48	4.87	10/4/21	4.34	4.52	
	7/1/21	4.31	3.68		23/2/21	3.32	5.00	11/4/21	4.39	4.72	
	8/1/21	4.24	3.68		24/2/21	3.16	4.23	12/4/21	4.45	4.80	
	9/1/21	4.16	3.66		25/2/21	3.27	3.94	13/4/21	4.50	3.93	
	10/1/21	4.09	3.44		26/2/21	3.38	3.60	14/4/21	4.53	3.63	
	11/1/21	4.02	2.77		27/2/21	3.49	4.01	15/4/21	4.57	2.91	
	12/1/21	3.94	2.99		28/2/21	3.60	4.22	16/4/21	4.61	3.27	
	13/1/21	3.87	3.32		1/3/21	3.71	4.25	17/4/21	4.65	4.00	
	14/1/21	3.80	3.36		2/3/21	3.82	4.02	18/4/21	4.69	4.00	
	15/1/21	3.72	3.68		3/3/21	3.93	4.75	19/4/21	4.72	4.64	
	16/1/21	3.79	3.68		4/3/21	4.04	4.16	20/4/21	4.76	4.34	
	17/1/21	3.86	3.68		5/3/21	4.08	5.20	21/4/21	4.80	3.75	
	18/1/21	3.92	3.64		6/3/21	4.11	4.61	22/4/21	4.70	4.30	
	19/1/21	3.99	4.46		7/3/21	4.15	5.87	23/4/21	4.60	3.63	
	20/1/21	4.05	3.63		8/3/21	4.19	2.91	24/4/21	4.49	3.71	
21/1/21	4.12	4.31	9/3/21	4.23	3.06	25/4/21	4.39	4.00			
22/1/21	4.18	4.10	10/3/21	4.27	4.48	26/4/21	4.29	4.73			
23/1/21	4.25	2.94	11/3/21	4.31	4.48	27/4/21	4.19	5.07			
24/1/21	4.18	4.46	12/3/21	4.34	4.48	28/4/21	4.09	4.92			
25/1/21	4.12	3.79	13/3/21	4.39	2.87	29/4/21	3.99	4.42			
26/1/21	4.05	4.54	14/3/21	4.43	4.47	30/4/21	3.91	4.30			
27/1/21	3.99	3.99	15/3/21	4.48	4.76						

CUADRO XXXI. COMPARACIÓN DE DATOS DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO EN LA FINCA EL PANTANO, PAJONAL

Comparación de la evapotranspiración del cultivo (ETc) de la finca El Pantano, Pajonal											
	Fecha	Imagen Landsat	Estación Tempest		Fecha	Imagen Landsat	Estación Tempest		Fecha	Imagen Landsat	Estación Tempest
Diciembre	12/12/20	1.58	4.13	Enero	28/1/21	1.42	4.58	Marzo	16/3/21	1.06	5.36
	13/12/20	1.58	4.10		29/1/21	1.49	4.40		17/3/21	1.03	6.06
	14/12/20	1.57	4.29		30/1/21	1.55	4.24		18/3/21	1.00	3.65
	15/12/20	1.52	4.79		31/1/21	1.61	4.32		19/3/21	0.97	4.77
	16/12/20	1.47	5.17		1/2/21	1.68	4.00		20/3/21	0.94	4.42
	17/12/20	1.42	2.09		2/2/21	1.74	3.83		21/3/21	0.95	5.04
	18/12/20	1.37	3.29		3/2/21	1.80	2.40		22/3/21	0.96	5.38
	19/12/20	1.33	3.32		4/2/21	1.87	3.49		23/3/21	0.96	5.29
	20/12/20	1.28	3.69		5/2/21	1.93	4.41		24/3/21	0.97	5.98
	21/12/20	1.23	4.18		6/2/21	1.99	4.36		25/3/21	0.98	5.84
	22/12/20	1.18	4.07		7/2/21	2.06	4.59		26/3/21	0.99	4.69
	23/12/20	1.22	3.94		8/2/21	2.12	5.71		27/3/21	1.00	6.47
	24/12/20	1.26	3.50		9/2/21	2.14	3.34		28/3/21	1.01	5.23
	25/12/20	1.30	3.74		10/2/21	2.17	5.31		29/3/21	1.08	4.49
	26/12/20	1.35	3.64		11/2/21	2.19	4.61		30/3/21	1.14	4.31
	27/12/20	1.39	4.18		12/2/21	2.22	5.20		31/3/21	1.20	4.93
	28/12/20	1.43	2.75		13/2/21	2.24	4.99		1/4/21	1.27	4.25
	29/12/20	1.47	4.04		14/2/21	2.26	5.29		2/4/21	1.33	1.87
	30/12/20	1.51	4.43		15/2/21	2.29	5.76		3/4/21	1.40	5.05
31/12/20	1.46	5.03	16/2/21	2.31	4.90	4/4/21	1.46	4.65			
Enero	1/1/21	1.40	4.10	Febrero	17/2/21	2.23	5.05	5/4/21	1.52	4.62	
	2/1/21	1.34	3.05		18/2/21	2.15	4.95	6/4/21	1.59	5.01	
	3/1/21	1.29	3.69		19/2/21	2.06	4.76	7/4/21	1.65	3.28	
	4/1/21	1.23	3.37		20/2/21	1.98	3.61	8/4/21	1.72	3.04	
	5/1/21	1.18	4.04		21/2/21	1.90	4.41	9/4/21	1.78	4.19	
	6/1/21	1.12	4.04		22/2/21	1.82	5.36	10/4/21	1.84	4.97	
	7/1/21	1.12	4.04		23/2/21	1.73	5.50	11/4/21	1.91	5.19	
	8/1/21	1.10	4.04		24/2/21	1.65	4.65	12/4/21	1.97	5.28	
	9/1/21	1.08	4.03		25/2/21	1.62	4.33	13/4/21	2.04	4.32	
	10/1/21	1.07	3.78		26/2/21	1.59	3.96	14/4/21	2.05	3.99	
	11/1/21	1.05	3.05		27/2/21	1.56	4.41	15/4/21	2.07	3.20	
	12/1/21	1.03	3.29		28/2/21	1.53	4.64	16/4/21	2.09	3.60	
	13/1/21	1.01	3.65		1/3/21	1.50	4.68	17/4/21	2.11	4.41	
	14/1/21	0.99	3.70		2/3/21	1.47	4.42	18/4/21	2.12	4.41	
	15/1/21	0.97	4.04		3/3/21	1.44	5.23	19/4/21	2.14	5.10	
	16/1/21	0.99	4.04		4/3/21	1.41	4.58	20/4/21	2.16	4.77	
	17/1/21	1.00	4.04		5/3/21	1.38	5.72	21/4/21	2.17	4.13	
	18/1/21	1.02	4.00		6/3/21	1.35	5.07	22/4/21	2.33	4.73	
	19/1/21	1.04	4.91		7/3/21	1.32	6.46	23/4/21	2.49	3.99	
	20/1/21	1.06	3.99		8/3/21	1.29	3.20	24/4/21	2.65	4.08	
	21/1/21	1.07	4.74		9/3/21	1.26	3.37	25/4/21	2.81	4.40	
	22/1/21	1.09	4.51		10/3/21	1.23	4.93	26/4/21	2.97	5.20	
	23/1/21	1.11	3.23		11/3/21	1.20	4.93	27/4/21	3.13	5.58	
	24/1/21	1.17	4.91		12/3/21	1.17	4.93	28/4/21	3.29	5.41	
	25/1/21	1.23	4.17		13/3/21	1.14	3.16	29/4/21	3.45	4.86	
	26/1/21	1.30	4.99		14/3/21	1.11	4.92	30/4/21	3.43	4.73	
	27/1/21	1.36	4.39		15/3/21	1.08	5.24				

ANEXO F. FINCAS DE CAFÉ.

Figura 25. Vista en la finca ubicada en el corregimiento de Santa Fe, comunidad Alto de Piedra, se visualiza la distribución del café sin sombra.



Figura 26. Vista en la finca ubicada en el corregimiento de Santa Fe, comunidad Alto de Piedra, se visualiza la distribución del café bajo condiciones de sombra en forma no ordenada.



Figura 27. Vista en la finca ubicada en el corregimiento El Alto, comunidad El Gallo, se visualiza la distribución del café bajo condiciones de sombra en forma no ordenada.

ANEXO G. PROCEDIMIENTO PARA LA ADQUISICIÓN DE IMÁGENES SATELITALES EN METRIC EEFLUX

- A. Acceder a la aplicación web: <https://eeflux-level1.appspot.com/>
- B. Mover el pin en el mapa Google al área de interés.
- C. Especificar la fecha de inicio y finalización (ver Figura 28).
- D. Seleccionar Búsqueda de imágenes
- E. Seleccionar la imagen Landsat (ver Figura 29).
- F. Seleccionar y descargar la imagen de ET_o y ET_oF – estándar calib. para cada día de paso del satélite hasta completar el periodo de estudio (ver Figura 30) y finalmente procesar las imágenes descargadas en el software ArcGIS Pro.

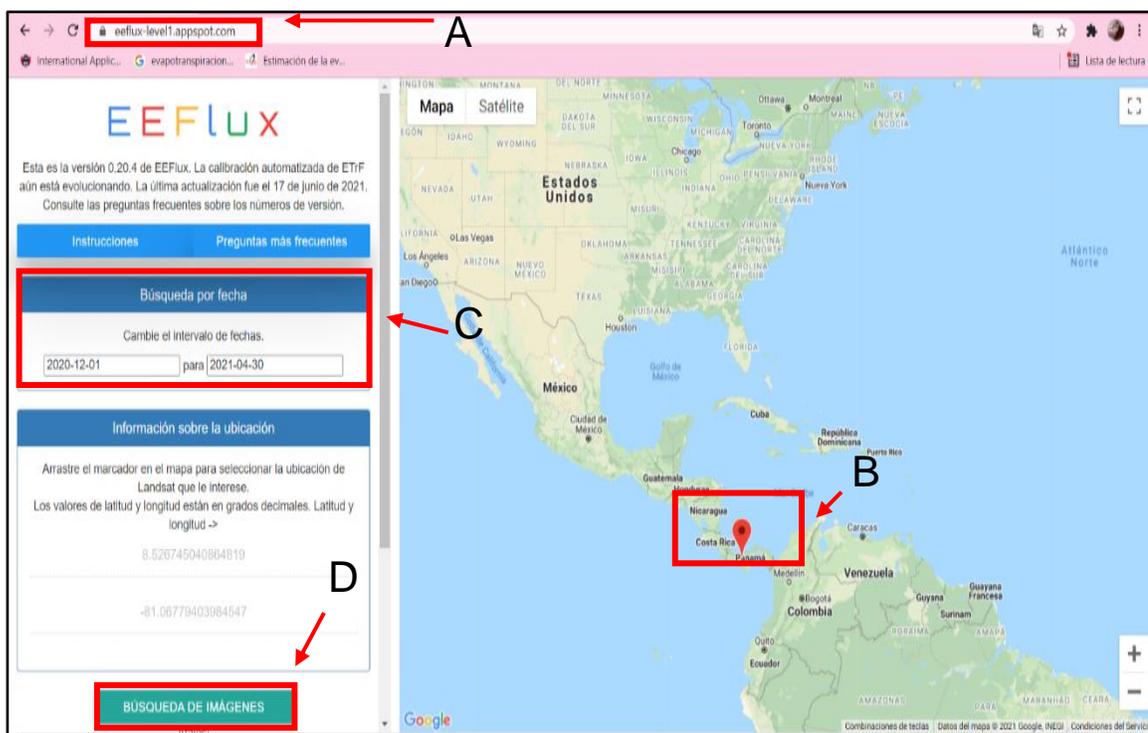


Figura 28. Procedimiento para acceder a EEFlux, seleccionar el periodo y ubicar del área de interés.

Fuente: Tomado de METRIC EEFLUX, (2020).

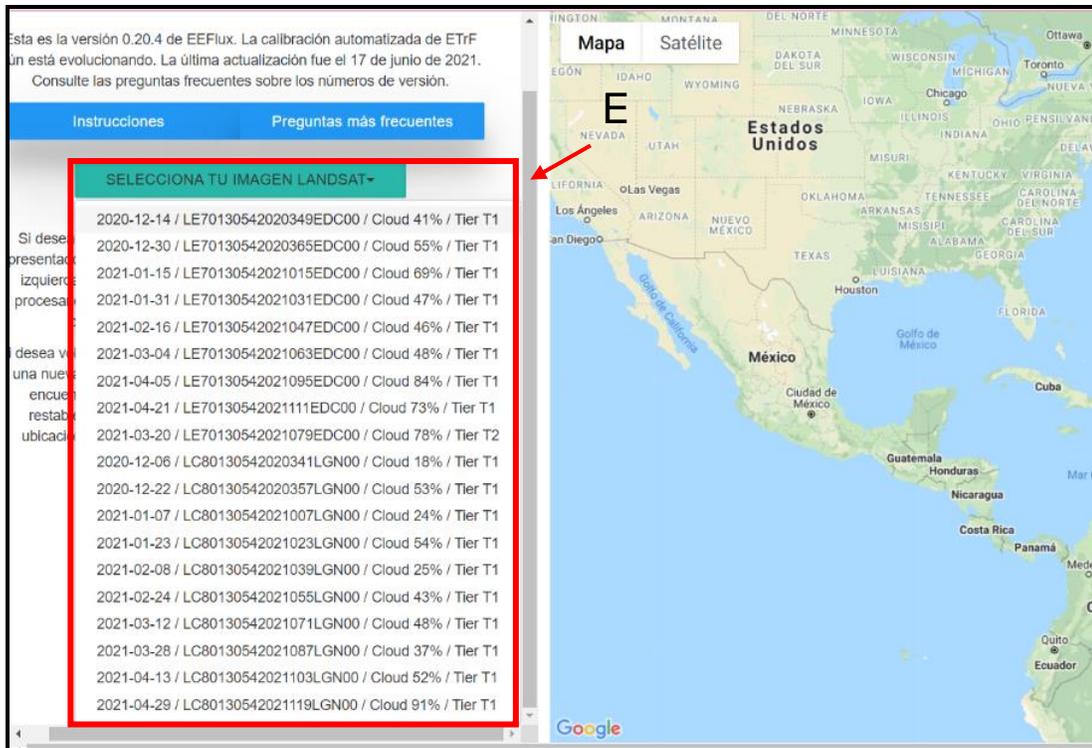


Figura 29. Selección de imágenes de Landsat.

Fuente: Tomado de METRIC EEFLUX, (2020).

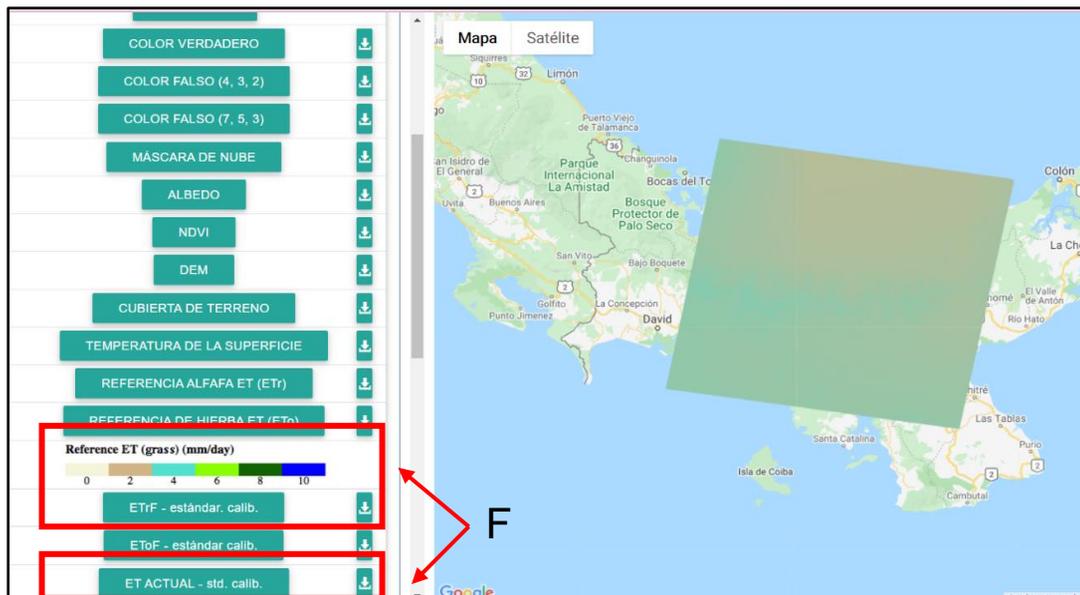


Figura 30. Seleccionar y descargar la ETo y EToF – estándar calibrado.

Fuente: Tomado de METRIC EEFLUX, (2020).

ANEXO H. PROCEDIMIENTO DE DETERMINACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA DEL CULTIVO UTILIZANDO EL PROGRAMA DE CROPWAT

- A. Configurar los datos de evapotranspiración Penman Monteith, ya sean diarios o mensuales. Luego, ingresar a Clima/ET_o y pegar los datos climáticos de las estaciones meteorológicas (ver Figura 31).
- B. Al contar con datos climáticos faltantes, completarlos presionando en el botón “Estimación F6” e inmediatamente se calculará la evapotranspiración de referencia (ver Figura 32).

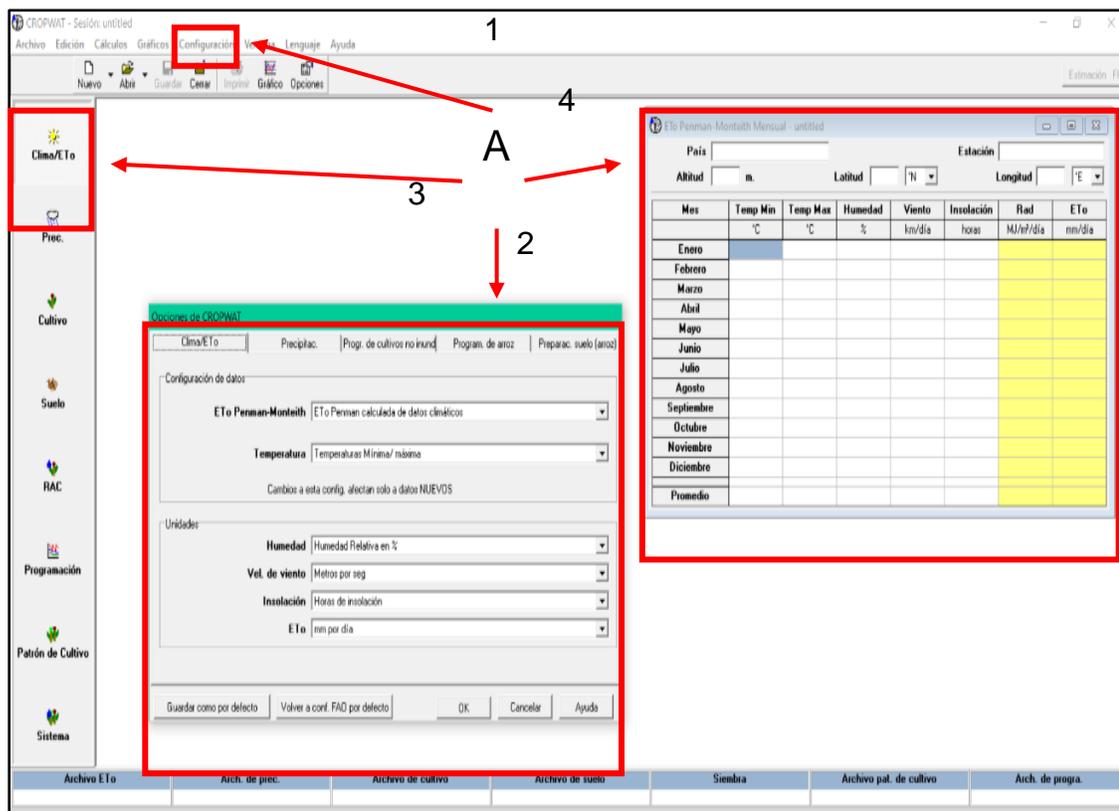


Figura 31. Configurar los datos en el programa CROPWAT e ingresar los datos climáticos.

Fuente: Tomado de CROPWAT citado por Allen et al., (2006).

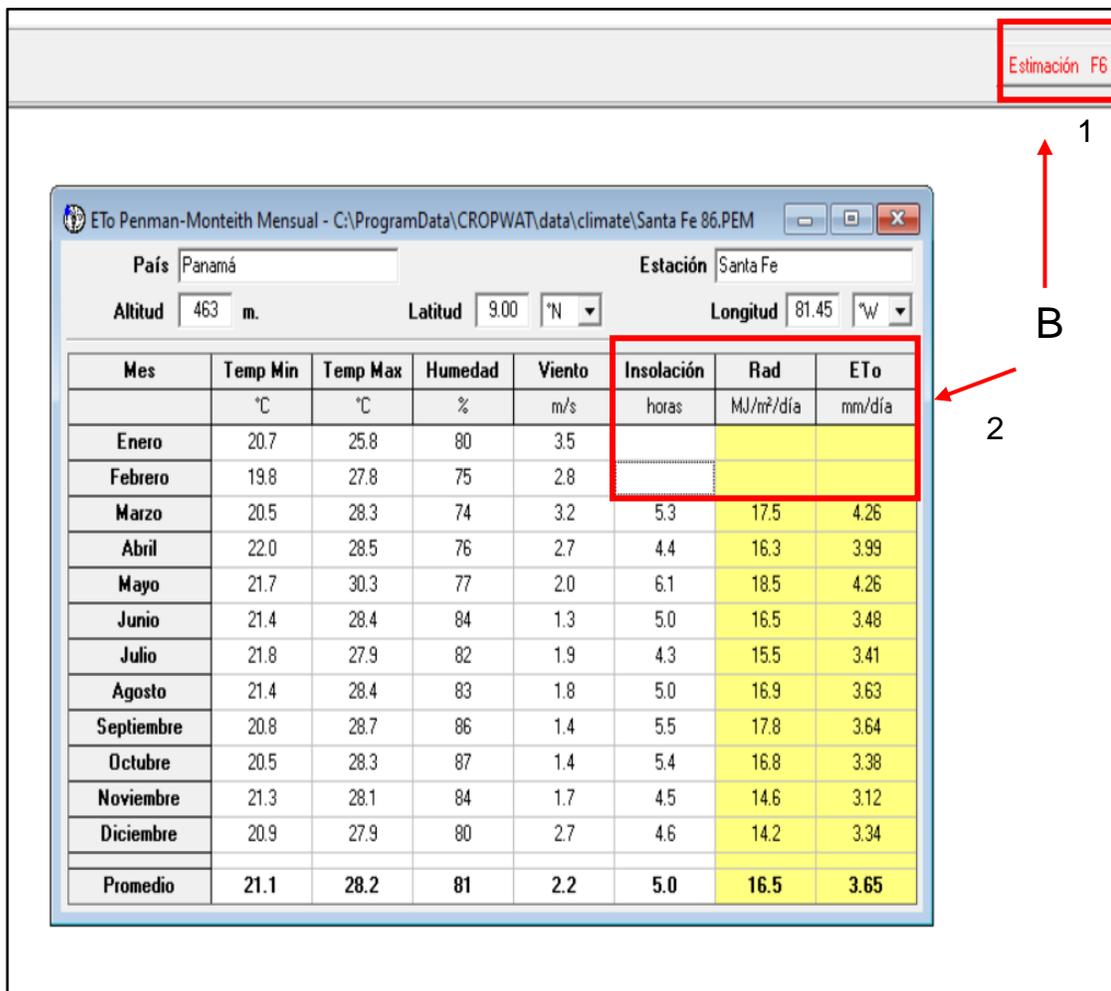


Figura 32. Estimación de datos faltantes y cálculo de la evapotranspiración de referencia.

Fuente: Tomado de CROPWAT citado por Allen et al., (2006).

ANEXO I. LISTA DE ACRÓNIMOS

AcD	Alianza para la Conservación y el Desarrollo.
AGLW	Water Resources, Development and Management Service/ Servicio de Gestión, Desarrollo y Recursos Hídricos.
ANAM	Autoridad Nacional del Ambiente.
ARAP	Autoridad de los Recursos Acuáticos.
ASCE	American Society of Civil Engineers.
BC	Estación tipo B convencional.
BID	Banco Interamericano de Desarrollo.
CENICAFÉ	Centro Nacional de Investigación de Café.
CFSR	Climate Forecast System Reanalysis / Reanálisis del sistema de pronóstico del clima
CFSv2	Climate Forecast System Version 2 / Versión 2 del sistema de pronóstico climático.
CREHO	Centro Regional Ramsar para la Capacitación e
RAMSAR	Investigación sobre Humedales para el Hemisferio Occidental.
EEFLUX	Earth Engine Evapotranspiration Flux / Flujo de evapotranspiración del motor terrestre.
ETESA	Empresa de transmisión eléctrica S.A.
FAO	Food and Agriculture Organization / Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

GRIDMET	Gridded Meteorological Data / Datos Meteorológicos Cuadrículados.
HEC-RAS	Hydrologic Engineering Center's River Analysis System / Sistema de análisis de ríos del Centro de Ingeniería Hidrológica.
MEF	Ministerio de Economía y Finanzas.
METRIC	Mapping ET at high Resolution with Internalized Calibration / Mapeo de evapotranspiración de alta resolución con calibración internalizada.
MiAMBIENTE	Ministerio de Ambiente.
MIDA	Ministerio de Desarrollo Agropecuario.
NLDAS	North American Land Data Assimilation System / Sistema de asimilación de datos terrestres de América del Norte.
PNGIRH	Plan Nacional de Gestión Integrada de Recursos Hídricos de la República de Panamá.
SEBAL	Surface Energy Balance Algorithms for Land / Algoritmos de balance de energía superficial para tierra.
SENACYT	Secretaría de Ciencia, Tecnología e Innovación.
SWAT	Soil and Water Assessment Tool / Herramienta de evaluación de suelo y agua.
UDM	Unidad de Descentralización Municipal.

ANEXO J. LISTA DE SÍMBOLOS

λ	calor latente de vaporización ($\text{MJ}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$) y (J kg^{-1})
%	por ciento
Δ	pendiente curva de presión de vapor ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$)
$^{\circ}\text{C}$	grados centígrados
C_p	calor específico del aire a presión constante ($\text{MJ kg}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$)
e_a	presión de vapor actual o real de 1.5 a 2.5 m sobre el suelo (kPa)
e_s	presión de saturación (kPa)
$e_s - e_a$	déficit de presión de vapor de saturación (kPa)
e_{sa}	presión de vapor a saturación de 1.5 a 2.5 m sobre el suelo (kPa)
ET	evapotranspiración
ET_a	evapotranspiración actual (mm día^{-1})
ET_c	evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (mm/día)
ET_{ins}	evapotranspiración de la superficie instantánea (mm h^{-1})
ET_o	evapotranspiración del cultivo de referencia (mm día^{-1})
ET_oF – est. cal.	fracción de evapotranspiración de referencia del pasto – estándar calibrado
G	densidad de flujo de calor del suelo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$)
g	constante psicrométrica ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$)
H	flujo de calor sensible
h	hora

ha	hectárea
H_a	hipótesis alternativa
H_0	hipótesis nula
$J\ kg^{-1}$	joule por kilogramo
k_1	constante para la conversión de unidades (86400 S día ⁻¹)
K_c	coeficiente del cultivo
$kg\ ha^{-1}$	kilogramo por hectárea
$kg\ m^{-3}$	kilogramo por metro cúbico
km	kilómetro
kPa	kilopascal
$kPa\ ^\circ C^{-1}$	kilopascal por grados centígrados
$l\ s^{-1}$	litro por segundo
LE	flujo de calor latente de vaporización ($W\ m^{-2}$)
m	metro
$m\ s^{-1}$	metro por segundo
mg / L	miligramo por litro
$MJ\ kg^{-1}\ ^\circ C^{-1}$	megajoule por kilogramos por grados centígrados
$MJ\ m^{-2}\ día^{-1}$	megajoules por metro cuadrado por día
$MJ^{-1}\ ^\circ C^{-1}$	megajoules por grados centígrados
mm	milímetro
$mm\ día^{-1}$	milímetro por día
$mm\ h^{-1}$	milímetro por hora

msnm	metros sobre el nivel del mar
r	coeficiente de correlación lineal
R ²	coeficiente de determinación
r _a	resistencia aerodinámica al calor sensible (S m ⁻¹)
r _c	resistencia superficial a la transferencia de vapor (S m ⁻¹),
R _n	radiación neta en la superficie del cultivo (MJ m ⁻² día ⁻¹),
S d ⁻¹	siemens por día
S m ⁻¹	siemens por metro
T	temperatura del aire a 2 m altura (°C)
T _{máx}	temperatura máxima del aire a 2 m altura(°C)
T _{mín}	temperatura mínima del aire a 2 m altura(°C)
T _s	temperatura de la superficie
u ₂	velocidad del viento a 2 m de altura (m s ⁻¹)
W m ⁻²	vattios por metro cuadrado
ρ	densidad del aire a presión constante (kPa)