Universidad Católica de Manizales

Facultad de Ingeniería y Arquitectura

Maestría en Teledetección

Modelamiento de la evapotranspiración de cultivo utilizando índices de vegetación obtenidos por sensores remotos Sentinel 2. Caso de estudio desarrollado en CENICAÑA 2019- 2020

Trabajo de Investigación Aplicada como requisito para optar por el título de:

Magíster en Teledetección

CATHERINE MONTEALEGRE GONZÁLEZ

Director:

Dr. OSCAR CARDONA MORALES

Manizales (Caldas)

2021

Modelamiento de la evapotranspiración de cultivo utilizando índices de vegetación obtenidos por sensores remotos Sentinel 2. Caso de estudio desarrollado en CENICAÑA 2019- 2020

CATHERINE MONTEALEGRE GONZÁLEZ

Trabajo de Investigación Aplicada como requisito para optar por el título de:
Magíster en Teledetección

Director:
Dr. OSCAR CARDONA MORALES

Universidad Católica de Manizales
Facultad de Ingeniería y Arquitectura
Maestría en Teledetección
Manizales (Caldas)
2021

Resumen

El amplio potencial productivo de Colombia al tener una buena oferta en sus recursos y disponer de climas tropicales, flora, fauna en amplias áreas disponibles para el desarrollo agrícola, nos colocan en una situación privilegiada. Sin embargo, las políticas internacionales, nacionales y regionales orientan a que este potencial este regulado con la prevención y conservación de todos los recursos y lograr una economía sostenible en pro del ambiente. En ese sentido, la evapotranspiración es un parámetro de gran importancia porque ayuda a conocer la pérdida de agua de la transpiración de los cultivos y la evaporación del suelo, mejorando de manera eficiente la gestión del recurso agua y la producción de cultivos.

Para este proyecto, se utilizan datos de CENICAÑA asociados a la región de la Rivera del Río Cauca (departamentos de Cauca y Valle del Cauca) durante el año 2019 y el primer semestre de 2020,se genera la evaluación de varios modelos para estimar la evapotranspiración de cultivo , teniendo en cuenta los modelos de evapotranspiración de referencia ampliamente implementados, como son los de Penman - Monteith, Hargreaves y Jensen y el coeficiente de cultivo que relaciona índices de vegetación de Sentinel 2, obteniendo resultados satisfactorios en los modelos. Por lo tanto, es posible afirmar la utilidad de la percepción remota en la determinación de la evapotranspiración de Cultivos de Caña y en generar su aplicabilidad en otros cultivos.

Se validan mejores modelos correlacionados con el coeficiente de correlación y se estima la evapotranspiración de los cultivos mediante la aplicación Sen-ET de la Agencia Espacial Europea -ESA que incorpora información de las misiones Sentinel 2 y Sentinel 3. Esta relación entre los modelos de evapotranspiración de cultivo es bastante concluyente y explicativa de las variables asociadas. Por tanto, es posible afirmar la utilidad de la teledetección para determinar la evapotranspiración de los cultivos de caña de azúcar y generar su aplicabilidad en otros cultivos.

Abstract

The wide productive potential in Colombia have a supply in its resources having tropical climates, flora, fauna in wide areas available for agricultural development, positioning ourselves in a convenient situation. However, international, national and regional policies guide that this potential is regulated with the prevention and conservation of all resources and achieve a sustainable economy in favor of the environment. In this sense, evapotranspiration is a parameter of great importance because it helps to know the loss of water from crop transpiration and soil evaporation, efficiently improving water resource management and crop production.

For this project, data were obtained from CENICAÑA near the Cauca River (Cauca and Valle del Cauca) during 2019 and the first semester of 2020, the evaluation of several models is generated to estimate crop evapotranspiration, taking into account the widely implemented reference evapotranspiration models, such as those of Penman-Monteith, Hargreaves and Jensen and the crop coefficient that relates Sentinel 2 vegetation index, obtaining satisfactory results in the models

The models best correlated with the correlation coefficient are validated and crop evapotranspiration is estimated using the Sen-ET application of the European space Agency -ESA that incorporates information from the Sentinel 2 and Sentinel 3 missions. This relationship between crops evapotranspiration models are fairly conclusive and explanatory for the variables. Therefore, it is possible to affirm the usefulness of remote sensing in determining the evapotranspiration of sugarcane crops and generating its applicability in other crops.

Tabla de Contenido

Resumen....3

1. Introducción....13

1.1. Problema....15

1.2. Justificación....18

2. Objetivos....21

2.1. Objetivo General....21

2.2. Objetivos Específicos....21

3. Marco Teórico....22

3.1. Antecedentes....22

3.2. Imagen Satelital....27

3.3. Sensores remotos utilizados....31

3.4. Evapotranspiración (ET)....34

3.5. Métodos utilizados para el cálculo de la Evapotranspiración de Referencia (ETo)....38

3.6. Índices de Vegetación....41

4. Metodología....48

4.1. Área de estudio....48

4.2. Marco Experimental....55

5. Resultados....59

5.1. Análisis de firmas espectrales e índices de vegetación....59

5.2. Correlación de índices de vegetación y evaporación de estaciones 62

5.3. Cálculo de las evapotranspiraciones de referencia ETo 68

5.4. Cálculo del índice de cultivo Kc y evapotranspiración real o de cultivo ETc 69

5.5. Cálculo de la evapotranspiración diaria a partir del método METRIC 77

6. Conclusiones 81

Recomendaciones y Trabajo Futuro 83

Bibliografía 84

Índice de Figuras

Figura 1. Espectro Electromagnético, Fuente: (Díaz Freddy et al, 2014).....28

Figura 2. MSI Bandas espectrales y resolución espacial Sentinel 2, Fuente: (Thales Alenia Space France, 2018) Copernicus Sentinel-2 Products Specification Document.....33

Figura 3. Temperatura en superficie LST para Colombia del 01 de enero de 2019 producto del sensor Sentinel-3 LST-Level 2 en grados Kelvin (°K) . Fuente: Elaboración Propia. 34

Figura 4. Esquema del proceso de la ET, Sistema Suelo – Vegetación - Atmósfera. Fuente: Carrilero Villodre 2019 36

Figura 5. Formula de balance de energía basado en la temperatura para estimar la ET, Rn es Radiación neta, H es flujo de calor, G es la conducción de calor al suelo, ET es la cantidad de agua líquida en vapor. Fuente: (Rickallenidaho, 2015) 41

Figura 6. Características espectrales de los sensores Sentinel 2 y Landsat 8. Fuente: Martínez M., L. J. 2017 42

Figura 7. Reflectancia de algunos tipos de cultivo, la caña de azúcar en línea negra continúa. Fuente: Martínez M., L. J. 2017.....42

Figura 8. Área de Estudio, Fuente: Elaboración propia, 2020 49

Figura 9. Datos de la anomalía de la temperatura superficial del mar en la zona Niño 3.4 (Oceanic Niño, ONI) de acuerdo a los datos semanales publicados por BM Australia 2019, Fuente: CENICAÑA 2019 50

Figura 10. Anomalía de la precipitación mensual media del valle del río Cauca con respecto al promedio histórico mensual. Calculado con base en los datos de la Red Meteorológica Automatizada (RMA) de la agroindustria de la caña. 2019. Fuente: CENICAÑA 2019 50

Figura 11. Imagen Sentinel 2 en color natural RGB 432 con ubicación de estaciones de CENICAÑA. Fuente Elaboración Propia. 53

Figura 12. Metodología para el modelamiento de la Evapotranspiración de Cultivo. Fuente: Propia 55
Figura 13. Respuesta espectral de tres lotes con caña de azúcar en la zona del proyecto, consulta sobre imagen Sentinel 2 de abril 2019, alta precipitación. Fuente: Elaboración Propia 60
Figura 14. Respuesta espectral de tres lotes con caña de azúcar en la zona del proyecto, consulta sobre imagen Sentinel 2 de agosto 2019, baja precipitación. Fuente: Elaboración Propia 60
Figura 15. Salida grafica de los IV: NDVI, IPVI y SAVI para junio 2019 en la zona del proyecto. Fuente: Elaboración Propia 62
Figura 16. Regresiones Lineales entre la evaporación de las estaciones y los índices de vegetación IV basado en las imágenes Sentinel 2. El nombre del IV es mostrado sobre cada gráfico. Los puntos representan el promedio de IV para la máscara de cada estación. Cada modelo muestra la ecuación y el R^2, Fuente: Elaboracion propia 63
Figura 17. Muestra del área de análisis 21 piexeles, para la estación Para, para la relación de los IV 64
Figura 18. Gráficas del cálculo de la ETo (mm/día), Radiación Solar (mm/día) y Temperatura (°C) desde enero 2019 hasta junio de 2020, Fuente: Elaboracion propia 69
Figura 19. Serie mensual para el cálculo de la ETc (mm/dia) de los métodos investigados y las estaciones de CENICAÑA, Fuente: Elaboración Propia 70
Figura 20. Regresión lineal del ETc Kc_IV de los diferentes métodos analizados, el nombre de la ETc y el Kc basado en el Índice de Vegetación esta sobre cada gráfica, Fuente: Elaboración Propia 71
Figura 21. Calculo ETc basado en NDVI para junio 2019 (arriba) y marzo2020 (abajo). Fuente: Elaboración Propia. 74

Figura 22. Calculo ETc basado en IPVI para junio 2019 (arriba) y marzo2020 (abajo). Fuente: Elaboración Propia. 75
Figura 23. Calculo ETc basado en SAVI para junio 2019 (arriba) y marzo2020 (abajo). Fuente: Elaboración Propia. 76
Figura 24. Relación entre el Modelo ETc Penman,-NDVI y ETc METRIC (mm/día), Fuente: Elaboración propia 78
Figura 25. Comparación Calculo ETc basado en Sen-ET (arriba) y ETc NDVI Penman (abajo), para enero 2019. Fuente: Elaboración Propia. 79
Figura 26. Comparación Calculo ETc basado en Sen-ET (arriba) y ETc NDVI Penman (abajo), para agosto 2019. Fuente: Elaboración Propia. 80

Índice de Tablas

Tabla 1. Índices de vegetación y su aplicación usando imágenes Sentinel 2. Fuente: O. Rozenstein et al. 2018. 44

Tabla 2. Frecuencia Temporal y descripción de las imágenes satelitales utilizadas en el proyecto. Fuente: Elaboración propia. 52

Tabla 3. Estaciones CENICAÑA analizadas en la relación IV y evaporación. Fuente: Elaboración propia. 52

Tabla 4. Frecuencia Temporal y descripción de las imágenes satelitales utilizadas en el proyecto, para comparación del método de ETc METRIC. Fuente: Elaboración Propia 54

Tabla 5. Relaciones IV, Kc (x, y) ordenado por R2 y su Ecuación respectiva. Fuente: Elaboración Propia 67

Tabla 6. Relaciones IV ETc, (x,y) seleccionados para el proyecto y su Ecuación respectiva. Fuente: Elaboración Propia 71

Listado de acrónimos y símbolos

Acrónimos

FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación
CENICAÑA	Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia
ET	Evapotranspiración
ETo	Evapotranspiración de Referencia
ETc	Evapotranspiración Real o de Cultivo
ETr	Evaporación Real o de Cultivo
ETp	Evapotranspiración Potencial
NDVI	Índice de Vegetación de diferencia Normalizada
NDI45	Índice de Vegetación de diferencia Normalizada 45
WDVI	Índice de Vegetación de Diferencia Ponderada
SNAP	Sentinel Application Platform
UTC	Por sus siglas en inglés, Coordinated Universal Time
MODIS	Nombre sensor satélite MODIS, por sus siglas en inglés, Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
TM	Sensor óptico satélite Landsat 5, por sus siglas en inglés, Thematic Mapper
+ETM	Sensor óptico satélite Landsat 7, por sus siglas en inglés, Enhanced Thematic Mapper Plus
SAVI	Índice de vegetación ajustado al suelo
METRIC	Por sus siglas en inglés, Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration
LAI	Índice de Area Foliar
LST	Land Surface Temperature
RS-ET	Modelos de estimación de ET basados en datos de teledetección
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
IV	Índices de vegetación
IPVI	Infrared Percentage Vegetation Index
NIR	Infrarrojo cercano
Sen-ET	Sentinels for Evapotranspiration
SWIR	Infrarrojo de onda corta o infrarrojo medio
TIR	Infrarrojo Térmico
EVI	Índice de Vegetación Realzado
SEBAL	Surface Energy Balance Algorithm for Land
VIS	Espectro Visible
MAGNA	Marco Geocéntrico de Referencia Nacional
SIRGAS	Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas

Símbolos

Pp	Precipitación
ETo	Evapotranspiración de referencia considerando una superficie de referencia de pasto.
ETc	Evapotranspiración de cultivo o Evapotranspiración real
LE	Calor latente de evaporación
H	Calor sensible
Rn	Radiación neta
G	Flujo de calor del suelo
Ks	Coeficiente de estrés hídrico
E	Evaporación
T	Transpiración
Kc	Coeficiente de cultivo
α	Albedo

1. Introducción

La evapotranspiración es un componente importante del ciclo hidrológico, cuya proporción relativa entre la precipitación, define la disponibilidad de agua (Sharma et al., 2018), esta variable ayuda a conocer la pérdida de agua de la transpiración de los cultivos y la evaporación del suelo, mejorando de manera eficiente la gestión del recurso agua y la producción de cultivos. La evapotranspiración de cultivo (ETc) puede obtenerse utilizando diferentes metodologías, como utilizar aparatos específicos, en los que se destacan los lisímetros de drenaje. Estos instrumentos registran la diferencia de la cantidad de agua drenada, que se deposita en el fondo de los lisímetros, con la cantidad total de agua almacenada. Los lisímetros de pesaje, registra la pérdida de agua directamente por el cambio de masa. El método con tanques de evaporación aplica de manera empírica coeficientes que relacionan la evaporación de dicho tanque y posteriormente calcular la evapotranspiración de referencia (Allen et al., 2006).

Entre otras metodologías para el cálculo de la evapotranspiración, se encuentra el de balance de energía, que controla el intercambio de energía de la superficie y la cantidad de energía disponible, aplicando el principio de conservación de energía. Otro método es el de balance de agua del suelo, que consiste en evaluar el circuito entrante y saliente del agua circulante en la zona radicular del cultivo dentro de un tiempo determinado. Por último, los métodos de datos meteorológicos utilizando varias ecuaciones empíricas y semi-empíricas, dependiendo si el cultivo está bajo condiciones estándar o no (Allen et al., 2006)

El Centro de Investigaciones de la Caña de Colombia - CENICAÑA, tiene como misión "contribuir al desarrollo, competitividad y sostenibilidad del sector agroindustrial de la caña de azúcar del país" (CENICAÑA, 2020, Misión y visión, https://www.cenicana.org/mision-y-vision/), esta organización estima el coeficiente de cultivo (Kc) con lisímetros y tanques tipo A

combinados con datos de las estaciones meteorológicas, que toman lecturas en campo. Posteriormente, procesan y entregan esta información para que los afiliados y otros usuarios realicen seguimiento y administración de sus cultivos de caña.

En este trabajo de investigación se plantea destacar el mejor modelo para estimar la evapotranspiración de cultivos de caña de azúcar, utilizando índices de vegetación obtenidos por sensores remotos Sentinel 2, que hacen parte de la organización de CENICAÑA, en los departamentos de Cauca y Valle del Cauca para los años de 2019- 2020 y correlacionar dicho modelo, con la Evapotranspiración de cultivo que genera la herramienta de Sen-ET del software SNAP de la Agencia Espacial Europea.

El documento está organizado conforme a los apartes de un proyecto investigativo, inicialmente se explica el problema planteado y la justificación donde se plantea la importancia de conocer la evapotranspiración de cultivos utilizando variables que suministran los sensores remotos.

Posteriormente, se plantea el objetivo general, que nos enfoca el alcance del problema y los objetivos específicos que nos dan la ruta de las acciones relevantes para llegar a la finalidad planteada del modelamiento para estimar la evapotranspiración de cultivos de caña de azúcar con el uso de sensores remotos.

Seguido a lo anterior, se desarrolla el marco teórico en el cual se detalla los conceptos necesarios para entender la metodología de investigación planteada en los temas de los sensores remotos, las imágenes satelitales, la teoría del fenómeno de evapotranspiración en los cultivos, los modelos utilizados para la estimación de la evapotranspiración de referencia y el modelo utilizado por Sen-ET.

En un capítulo aparte, se desarrolla la metodología donde se detalla la zona de estudio, lo datos utilizados y el marco experimental, que nos detalla las acciones puntuales para atender los objetivos específicos y poder mostrarlos de manera gráfica en un diagrama de flujo.

Finalmente, se muestran los resultados obtenidos de la investigación, su discusión conforme a los objetivos planteados, las conclusiones y recomendaciones.

1.1. Problema

Una gestión inteligente y racional de los recursos naturales influyen directamente en el sector del agro, en el medio ambiente y nuestro bienestar, principalmente el manejo del agua nos da la pauta para preservar este recurso renovable. La evapotranspiración está compuesta por la evaporación de la superficie y la transpiración de las plantas, el agua que se transfiere a la atmósfera en forma de vapor, necesita del factor energético como la radiación solar, los vientos y la temperatura para darle continuidad a este ciclo hidrometeorológico.

La oferta hídrica de Colombia para el año 2012 muestra que *"en promedio sube a 2.300 km^3/año, lo que indica una reducción de un 38% para el año seco medio, llegando a 1.400 km^3/ año aproximadamente"* (Uribe, Lozano & Martínez, 2012). De lo anterior, también se evidencia, que no solo los periodos de sequía o lluvia afectan la disponibilidad de agua, sino también el uso de este recurso en la producción de bienes y servicios, lo que se llama "Huella Hídrica". En estudios realizados en 2008, la huella hídrica por zona hidrográfica se destaca en el Magdalena y el Cauca, principalmente en los cultivos de café, plátano, maíz y caña de azúcar, los cuales son más de la mitad del consumo de la huella hídrica en el país, teniendo en cuenta que más de los 38.000 millones de m^3 de agua al año es el total de huella hídrica del sector agrícola colombiano (Uribe, Lozano & Martínez, 2012). Otro aspecto preocupante es que los cultivos, especialmente de caña

de azúcar, en el Valle del Cauca no realizan estudios de balance hídrico en aproximadamente 40% de los cultivos, ocasionando que no se tenga una adecuada gestión para el riego (CENICAÑA, 2013).

La Evapotranspiración Real o de Cultivo en el país, utiliza valores extrapolados medidos de estaciones terrestres puntuales y de instrumentación para ver la transpiración y evaporación del suelo y la vegetación, en muchas ocasiones se genera ambigüedad en el riego del cultivo de caña de azucar, ya que se acarrea con mayor inversión, personal especializado y desplazamientos.

Con el avance continuo de la percepción remota, los sensores remotos cada día aportan datos detallados y de manera continua, mejorando, en este caso la competitividad de producción agrícola. Las técnicas de teledetección y las imágenes satelitales obtenidas, cada vez se usan con mayor frecuencia para estimar algunas variables relacionadas con la fenología de la vegetación, niveles de humedad y datos meteorológicos (Farg et al., 2012). La combinación de diferentes bandas espectrales, son utilizados para destacar elementos naturales y arcifinios de las imágenes satelitales. Las combinaciones más utilizadas para resaltar la cobertura vegetal son los Índices de Vegetación (IV), que usualmente está relacionado con la respuesta espectral que presenta la vegetación sana y vigorosa entre distintas bandas del espectro electromagnético, del visible (VIS) que tiene alta y baja reflectividad y el infrarrojo cercano (NIR) que tiene alta reflectividad (Chuvieco, 2010).

A partir de los índices de vegetación (IV) se puede calcular el coeficiente de cultivo Kc y con este estimar la evapotranspiración real o de cultivo ETc e incluso con nuevos desarrollos de software para calcularlo directamente, sin asociar variables tomadas in situ (Reyes et al, 2019).

La metodología actual para estimar la evaporación y evapotranspiración, puede mejorarse o fortalecerse con la combinación de variables de teledetección, como ayuda a la gestión y aprovechamiento del recurso hídrico, la estimación de la evapotranspiración en los cultivos es clave para controlar los tiempos de riego de un cultivo, ya que nos da información detallada de cada cuanto se tienen que realizar este proceso, así como de la cantidad requerida de agua en cada parcela (Ortega et al., 1999). Como alternativa al método tradicional de cálculo del índice de cultivo Kc, los datos suministrados por nuevos sensores remotos ayudarían a la estimación puntual de la evapotranspiración, evitando interpolar y generalizar datos tomados por estaciones meteorológicas (Rivas & Caselles, 2003).

Cabe aclarar que, aunque la información de sensores remotos es útil para la estimación de la evapotranspiración, uno de los limitantes es la periodicidad o disponibilidad temporal de los datos de los satélites de los cuales se han hecho estudios de evapotranspiración. La mayoría de estudios realizados ha considerado los satélites de Landsat, el cual entrega información cada 16 días, cuya resolución es de 30 metros y cuenta con 8 bandas espectrales en su versión número 7 y 11 para la versión 8.

Conforme a lo anterior, se plantea la siguiente pregunta de investigación:

¿Cuál es el modelo apropiado para estimar la evapotranspiración en cultivos de caña de azúcar a partir de índices de vegetación obtenidos por sensores remotos Sentinel 2?

1.2. Justificación

Para el año 2050 se necesitará producir aproximadamente 60 por ciento más alimento a nivel mundial, con el fin de garantizar la seguridad alimentaria , teniendo en cuenta que esta meta debe lograrse mientras se conserva e incrementa la base del agua (FAO, 2009), al igual que tiene que asegurar las acciones pertinentes para el agua como desarrollo sostenible.

De las políticas internacionales las más relevantes para la conservación y acceso del agua son aquellas lideradas y/o vigiladas por la Organización de las Naciones Unidas -ONU, como la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, que en su objetivo 6 propone las metas que garanticen la disponibilidad de agua, su adecuada gestión y saneamiento sostenible para toda la población. Entre los acuerdos de la AGENDA 2030, están los compromisos y metas de:

- *Marco de Sendái para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030*
- *La Agenda de Acción de Addis Abeba 2015*
- *El Acuerdo de París 2015 dentro del Marco de la Convención de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.*

Aunque hay mejoras importantes en el acceso y saneamiento del agua en zonas rurales, este objetivo mundial, se ha visto en una posición más relevante aún, ya que la disponibilidad del recurso agua es una medida de salubridad para la contención de patógeno y prevención de virus.

En Colombia, en cabeza del Minambiente (Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible), se adoptan estos acuerdos internacionales para poner en marcha planes, programas y proyectos. El compromiso es el de minimizar los gases emitidos por el efecto invernadero en un 20%, para el año 2030. Por otra parte, el Plan Nacional de Seguridad alimentaria y nutricional para el periodo 2012-2019, en cumplimiento a las políticas establecidas en el documento CONPES

113 de 2007, busca *"mejorar la disponibilidad suficiente y estable de alimentos, el acceso y el consumo oportuno y permanente de los mismos en cantidad, calidad e inocuidad por parte de todas las personas"* (Ministerio del Medioambiente y Desarrollo Sostenible, 2020, seguridad alimentaria y nutricional, https://www.minambiente.gov.co).

La FAO en el Foro de Expertos, sobre la agricultura mundial en la perspectiva del año 2050 dice que el 80% de la cantidad de alimentos para esa proyección de año, deberá ser abastecida volviendo más eficiente el parque productivo del agro, sin ser ocupadas para tal fin, más del 20% en tierras nuevas. Lo anterior lleva a que en Colombia se debe investigar y proponer nuevas mejoras en cada cultivo a nivel genético, en tecnologías, en automatizar procesos, en economías de escala y de agricultura de precisión. Todas estas políticas deben asegurar una continuidad inteligente del recurso, priorizando necesidades hídricas de cada cultivo, mejorando los riegos de cultivos y logrando la eficiencia y equidad en el acceso al agua. Este proceso requiere un cambio de actitud en las entidades públicas y privadas, tomadores de decisiones y los agricultores, asimismo debe darse este cambio, implementando mejoras en la infraestructura, reestructuración institucional, y enriqueciendo las capacidades técnicas de los agricultores y los administradores de agua (FAO, 2009).

En el Valle del Cauca, Cauca y Risaralda la industria de la caña de azúcar es muy dinámico, su producción agrícola ocupa buena parte de la ocupación de sus territorios y el Centro de Investigaciones de la Caña de Colombia - CENICAÑA como organización sin ánimo de lucro, favorece a innovar en el campo agroindustrial de la caña de azúcar contribuyendo al desarrollo, sostenibilidad de este cultivo, teniendo en cuenta la conservación del recurso agua y suelo.

Entre los diferentes estudios e información que desarrolla CENICAÑA, adicionalmente, suministra el dato de la evaporación y evapotranspiración de 37 estaciones meteorológicas

terrestres, con datos capturados in situ e incorporando instrumentación adicional, como lisímetros y tanques tipo A (Informe Anual 2019, CENICAÑA). Un seguimiento a la evapotranspiración del cultivo es importante para puntualizar las necesidades de riego y hacer un uso racional del agua, teniendo en cuenta que la huella hídrica del país se ve afectado por la necesidad de este recurso en la agricultura.

Este aquí donde el aporte de la teledetección para la agricultura es de utilidad para optimizar los recursos, mejorar en los seguimientos de cultivos, validar información de otros métodos, mejorar productividad e incentivar la investigación.

2. Objetivos

2.1. Objetivo General

Establecer un modelo de estimación de evapotranspiración en cultivos de caña de azúcar a partir de índices de vegetación obtenidos por sensores remotos Sentinel 2. Caso de estudio desarrollado en CENICAÑA.

2.2. Objetivos Específicos

1. Determinar el índice de vegetación óptimo para el cálculo del Coeficiente de Cultivo Kc mediante la correlación con los datos de evaporación de las estaciones meteorológicas de CENICAÑA.
2. Estimar la evapotranspiración real o de cultivo ETc mediante la combinación de modelos de evapotranspiración de referencia ETo y el coeficiente del cultivo Kc obtenido con índices de vegetación obtenidos de Sentinel 2.
3. Evaluar la precisión de estimación de la evapotranspiración de cultivo ETc de los métodos utilizados con respecto a la herramienta Sen-ET del software SNAP v.7 como instrumento de referencia.

3. Marco Teórico

Este apartado pretende contextualizar al lector con relación al análisis de imágenes de sensores remotos, detalles de las fuentes de datos utilizados y su interpretación en el tema de la evapotranspiración, así como proporcionarle un soporte teórico, para posteriormente entender la metodología aplicada en este proyecto:

3.1. Antecedentes

En Colombia según Gómez & Cadena (2018), el primer concepto de evapotranspiración, introducido por Charles Thornnthwaite en 1948, se definió textualmente como *"la máxima cantidad de agua que puede evaporarse desde un suelo completamente cubierto de vegetación, que se desarrolla en óptimas condiciones, y en el supuesto caso de no existir limitaciones en la disponibilidad de agua"*. Posteriormente, los primeros estudios de evapotranspiración en el país se iniciaron por integrantes de la misión de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y en los años ochenta se crea el HIMAT, e inician estudios aplicados a labores de riego y drenaje y de evaporación potencial de referencia (ETo) y para cultivos particulares (ETc). En 1984 el HIMAT apoyo al país para hacer mediciones con evapotranspirómetro, ya que los estudios anteriores eran experimentales sin datos en campo, estos equipos generaron información por más de 10 años.

Con el estudio de Castro y Guzmán en 1985, se concentró el estudio en calcular ETo por diferentes metodologías, contrastándolas con la evaporación del tanque clase A, aunque el estudio no fue muy confiable porque solo se utilizaron 12 y la información presentaba inconsistencias. Posteriormente, a finales de los 80 se calculó para todo el país el modelo Penman-Monteith y se actualizó el modelo con un mejor software en el 2000, donde ya se contempló los datos de 400 estaciones y técnicas estadísticas. Estas estimaciones de ETo, se han seguido actualizando

siguiendo los lineamientos de FAO del 2006 y son las que actualmente son utilizadas en estudios que utilizan la variable (Gómez & Cadena, 2018).

Para la presente investigación se destacarán los antecedentes de los últimos 5 años, donde se estima la ET utilizando datos de los sensores remotos. En Ke et al (2016), una de las aplicaciones no es solo la estimación directa de la ET, sino también buscar mejoras en el proceso, como es la utilización del sensor meteorológico MODIS (resolución temporal de 8 días y una resolución espacial de 1 kilómetro) y LANDSAT 8 (resolución temporal de 16 días y una resolución espacial de 30 metro) para la reducir la escala e involucrando las variables de albedo, LST e índices de vegetación como son NDVI, EVI, SAVI, MSAVI, NDMI, NDWI, D1609, NDIIb7 y TVDI, y variables de MODIS para la estimación de la ET.

No solo el cálculo de la ET se ha utilizado para el ámbito de la agricultura en zonas rurales, en un estudio realizado por Nouri et al (2016), en Adelaide en el sur de Australia, se resalta la creciente preocupación por el suministro de agua en paisajes urbanos, como son jardines, campos de golf y zonas verdes. En este artículo, se comparan dos enfoques prácticos para la estimación de la evapotranspiración ET, con análisis detallados del balance hídrico del suelo (SWB) durante un período de un año. Un enfoque es el Water Use Classification of Landscape Plants (WUCOLS), que se basa en la opinión de expertos sobre la necesidad del agua dependiendo el tipo de planta. El otro enfoque es el uso de la teledetección utilizando el Índice de Vegetación Mejorado (EVI) utilizando MODIS. Se concluye que el parámetro promedio de modelo SWB, indica un consumo de agua de 1084 mm por año de agua por ET. La ET por MODIS utilizando el índice de vegetación EVI fue de 1088 mm por año, muy cerca de la estimación de SWB. La ET calculado por WUCOLS estimó el requerimiento total de agua en solo 802 mm por año. Finalmente, el método MODIS

EVI puede proporcionar estimaciones precisas de requerimiento de agua en zonas urbanas mejorando la precisión en espacios grandes como para ser muestreados.

En Marini et al (2017), en el sudoeste de la provincia de Buenos Aires (Argentina) con datos del período 2000-2014, basados en análisis de regresión múltiple entre valores de evapotranspiración real (ETr) y de evapotranspiración potencial (ETp), utilizando los datos de 7 estaciones meteorológicas y las variables de Temperatura de Superficie (TS) e Índice Normalizado de Diferencia de Vegetación NDVI. Como resultado se obtuvieron modelos que permiten estimar ETr y ETp con una frecuencia temporal de cada ocho días, igualmente, se generan mapas de las evapotranspiraciones, destacando que no solo se debe sin recurrir con datos meteorológicos, esto muestra las bondades de la teledetección para el cálculo y seguimiento de la ET.

Particularmente, en esta investigación se tomó en cuenta el estudio realizado en Israel por Rozenstein et al (2018), donde se estima la evapotranspiración del algodón utilizando varios métodos, incluido el del Coeficiente de Cultivo Kc. Aquí se procesan 22 índices de vegetación y se analizan en una serie de tiempo para imágenes Sentinel 2, posteriormente se evaluaron los modelos derivados de la relación del Kc de estaciones terrestres con los IV por medio de regresiones lineales, encontrando una alta correlación del NDVI.

Entre los métodos mencionados para el cálculo de la ET con sensores remotos, en Sharma & Tare (2018) se evaluó el modelo SSEBop (Operational Simplified Surface Energy Balance) en Uttarakhand y Uttar Pradesh en el norte de la India, para generar mapas de ET de alta resolución (10 metro) con imágenes satelitales multiespectrales Sentinel 2. También se usaron datos de Landsat 8 para el dato de temperatura LST y los datos meteorológicos del Departamento Meteorológico de la India.

Los Coeficientes de Cultivo Kc también están estandarizados en diferentes manuales o informes técnicos, como son los dados por la FAO en la revista 56 o el Manual de la ASCE 70 (Apéndice E). En Reyes et al (2018) se utilizó el dato Kc del Manual de la ASCE 70 para evaluar la relación con el NDVI de imágenes Landsat 8 de cultivos en el norte de México, de esta correlación se generaron mapas de ETc con valores oscilantes entre 1,40 y 7,41 mm/día, resultado del Kc multiplicado por los valores de evaporación de referencia. Los resultados indican que los agricultores podrían reducir su agua en un 18% solo con el uso apropiado de ETc, mejorando eficientemente la programación de riegos.

De la aplicación anterior, Reyes et al. (2019) realizó un estudio de evapotranspiración real (ETc) en cultivo de maíz forrajero donde calculo índices de vegetación obtenidos in situ con el equipo GreenSeeker y utilizando igualmente los sensores remotos Landsat 5 y Landsat 7 TM, en la Comarca Lagunera, México. Después de comparar los dos (NVDI) en relación al coeficiente de cultivo (Kc) hallando su RMSE y la diferencia entre estos, se determinó que los: valores máximos en el ajuste de Kc se dá a los 54 y 48 días después de la siembra en el sitio y a los 61 y 59 días después de la siembra con los datos de los sensores remotos de los años 2011 y 2012. Los dos resultados muestran un alta correlación entre la ETc estimada en el sitio y la ETc estimada con datos telemáticos con un coeficiente de determinación de $R^2 = 0.98$ para el 2011 y de $R^2 = 0.97$ para el 2012.

En los estudios de Evapotranspiración también se han realizado avances en software o módulos sistematizados para su estimación, como el CROPWAT desarrollado por Salgado & Mateos, (2019), el cual utiliza los IV (índices de vegetación) calculados de las misiones Landsat 7 y Landsat 8 entre julio de 2014 a junio de 2015 en cultivo de algodón, donde aplica la metodología de balance de agua teniendo en cuenta condiciones estándar del cultivo, e implementando

algoritmos obtenidos sobre la superficie de la aplicación EEFlux para el cálculo de la necesidad de riego, en el sector Santiago del Estero, (Argentina).

En Guzinski & Nieto (2019) se plantea el uso de los satélites Sentinel 2 y 3 ya que tienen un conjunto de imágenes de alta resolución que se usan para algoritmos de balance energético de la superficie para estimar la ET, de este último satélite, al ser más reciente tiene insuficientes datos para realizar series de tiempo y carecen de buena resolución en bandas térmicas TIR. Sin embargo, se utilizan datos de otros satélites para contemplar la brecha de estos datos. Al año siguiente, en Guzinski et al (2020), estos autores evaluaron tres modelos para el cálculo ET, donde se utilizan bandas térmicas (METRIC, ESVEP y TSEB-PT) y evaluando los modelos con árboles de decisión para estimaciones operativas de flujos de agua y de energía de los datos Sentinel.

La nueva visión para el cálculo de la ET según Nhamo et al (2020), apunta a utilizar la información capturada por UAV's (Vehículos Aéreos No Tripulados) realizando evaluaciones de los NDVI, salud en cultivos, evapotranspiración y reducción y seguimiento a riesgos de desastre. El objetivo es proporcionar estadísticas más precisas sobre irrigación y necesidad de agua en cultivos, facilitando los datos agrometeorológicos en agricultura a pequeña escala y el acceso sobre parámetros biofísicos de cultivos casi en tiempo real. Asimismo, en Niu et al (2020), muestran que los UAV's pueden utilizarse para estimar ET en una escala espacial detallada, se espera que en un futuro los modelos TSEB y DTD sobresalgan ya que en este tipo de tomas se puede separar el suelo del dosel, se puede analizar necesidad hídrica por árbol, se pueden utilizar nuevos algoritmos de aprendizaje para el procesamiento de los datos y los resultados de las primeras investigaciones muestran la fuerte relación entre el NDVI y el Kc a nivel de árbol, así mismo la ET por árbol.

No solo se han propuesto mejoras en la estimación de la ET para manejo particular, también se han realizado avances para disponer de esta información en Sistemas de Información Geográfica basados en tecnologías Web como se muestra en Calera et al (2017), donde mediante la teledetección se evalúan las necesidades de agua de los cultivos, identificando fortalezas y debilidades y proponiendo alternativas. Esta información es muy apreciada por los usuarios finales, generalmente agricultores o responsables de la toma de decisiones.

3.2. Imagen Satelital

Las imágenes satelitales están formadas por un arreglo matricial como lo es una fotografía digital, pero utilizando para su capturada un sensor remoto colocado a bordo de un satélite artificial que orbita alrededor de la tierra, durante este trayecto realiza un barrido que registra la energía reflejada de la superficie, generando finalmente después de un posprocesamiento una representación visual de lo capturado (Chuvieco, 1995).

La imagen satelital se puede procesar para resaltar, corregir, eliminar o minimizar en su composición matricial, según la finalidad o mejoramiento que se requiera, mediante el procesamiento digital de imágenes –PDI, que utiliza software especializado para realizar este tipo de operaciones. Cada pixel viene definido por un número entero a este se le denomina nivel digital (ND), o valor del pixel o nivel de gris, en conclusión este píxel viene definido por un número entero que determina la intensidad luminosa o nivel de gris (Villegas, 2008).

3.2.1. Tipos de Imágenes Satelitales

Para clasificar el tipo de imágenes satelitales, primero se tiene que clasificar el tipo de sensor remoto según su funcionamiento. En esta clasificación los sensores se clasifican en pasivos y activos. Los sensores activos son aquellos que no requieren fuente de alimentación alguna porque generan su propia radiación y reciben la información reflejada en longitudes de microondas artificiales.

Los sensores pasivos son instrumentos ópticos que captan la energía reflejada por el sol de la superficie terrestre, no generan su propia radiación electromagnética. Los sensores activos y pasivos manejan sus señales dentro del espectro electromagnético, principalmente en las longitudes de onda que comprenden las regiones del espectro visible, infrarrojo, térmico y radar, también comprende las transmisiones de señales de radio, televisión, rayos ultravioleta, rayos x y gamma (Ford & Reedman, 2005).

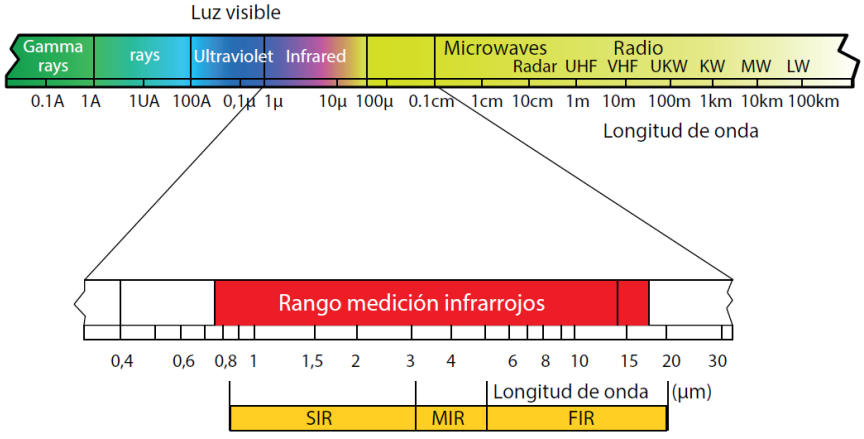


Figura 1. Espectro Electromagnético, Fuente: (Díaz Freddy et al, 2014)

Los sensores pasivos pueden captar ciertas regiones del espectro electromagnético produciendo diferentes tipos de imágenes:

- Imágenes Pancromáticas: Comprenden una gran parte del espectro o bandas, los datos de estos sensores se visualizan como imágenes en tonos de grises, incluyendo el blanco y el negro. Los sensores remotos actualmente abarcan en este tipo de imágenes, el espectro visible rojo, verde, azul y parte del infrarrojo cercano del espectro electromagnético (Chuvieco, 1995).
- Imágenes Multiespectrales: Estas miden la reflectancia en muchas capas o bandas tanto del sector visible como del infrarrojo, la conformación de imágenes de color puede generarse a partir del conjunto de dos detectores que miden la energía en la misma longitud de onda, estas combinaciones de distintos valores se llaman de reflectancia (Chuvieco, 1995). Estas imágenes tienen la bondad de manejar mejor la información de coberturas y mapas temáticos, pero para el nivel de confianza tiene que estar complementado con trabajo en campo (Velazco et al, 2015)
- Imágenes Hiperespectrales: Estas miden la reflectancia en muchas cantidades de bandas, donde en la misma franja del espectro electromagnético permite individualizar características muy sutiles entre los rasgos que se capturan de la superficie, especialmente en lo referente a las superficies de vegetación, de suelo y de rocas (Chuvieco, 1995). Las imágenes hiperespectrales permiten aplicar algoritmos de detección de objetos a través de firmas espectrales muy específicas permitiendo una alta confiabilidad de los datos. (Velazco et al, 2015)

Existen otros tipos de clasificaciones como los que se dividen por el tipo de función en la región del espectro electromagnético donde operan como los sensores de microondas que operan entre 1mm y 1m. También se pueden dividir entre imageadores y no imageadores, los primeros crean una imagen de la superficie, mientras que los otros no. (Villegas, 2008)

3.2.2. Resolución Espacial

La resolución espacial es el detalle de la imagen en su unidad más pequeña que es el pixel, por lo general esta medido en metros sobre el terreno. Esta resolución está determinada por el instrumento de captura en la óptica del sensor y está también condicionada a efectos atmosféricos (Franco, 1995).

Con el desarrollo de nuevos sensores y programas en la teledetección esta resolución espacial es un componente que mejora con el tiempo, permitiendo nuevos análisis detallados, controles y seguimientos más precisos. Es importante resaltar que la resolución espacial nos enfoca Para tener clara la relación de escala a la que se va a trabajar y el grado de interpretación que se pueda tener. (Villegas, 2008).

3.2.3. Resolución Espectral

La resolución espectral es el número de bandas y su ancho en el espectro electromagnético, que es captado por el sensor de la energía reflejada en la superficie. Dependiendo del tipo de sensor y su finalidad, estas bandas se concentran o resaltan más en una zona del espectro, ver Figura 1.

La información multiespectral, muestra las bondades de registrar de manera simultánea, el comportamiento de los objetos distinguidos en la superficie sobre distintas bandas del espectro electromagnético. Es importante tener en cuenta el tipo de sensor que se va a utilizar y su finalidad, ejemplo, en un sensor meteorológico es más importante el manejo de las bandas en el infrarrojo y que contengan una o más bandas térmicas (Villegas, 2008).

3.2.4. Resolución Radiométrica

La resolución radiométrica es la sensibilidad para expresar los datos recogidos por el sensor remoto, se da por las diferentes señales electromagnéticas que puede captar. Esta resolución hace referencia a la cantidad de niveles digitales de la imagen, oscila entre 64, 128,256 y 1024 (Sobrino, 2000).

Suele expresarse en términos del número de bits que son necesarios para precisar, almacenar cada píxel en tonalidades de grises. Los sensores Sentinel 2 tienen resolución radiométrica de 12 bits que son un total de 4095 niveles digitales. Cuando tiene una alta resolución radiométrica, mejora la cantidad de detalles que se pueden distinguir en el raster.

3.2.5. Resolución Temporal

La resolución temporal de un sensor satelital es la periodicidad con que se adquiere o toma la imagen en una misma área de la superficie. Esta periodicidad y su ciclo está en función de las características orbitales en el que se mueve la plataforma la altura donde se encuentra desde la Tierra, la velocidad de desplazamiento, la inclinación y de estructura del sensor según su ángulo y apertura (Sobrino, 2000). Esta resolución temporal también varía como otros tipos de resoluciones dependiendo del objetivo final del sensor. (Villegas, 2008)

3.3. Sensores remotos utilizados

Como se explicó anteriormente, existen varias clasificaciones de sensor remoto, para finalidades de este proyecto, se utiliza principalmente los sensores de la misión Copernicus de Sentinel, por tener imágenes de descarga gratuita, con buena temporalidad y resolución espacial.

3.3.1. Sensor Remoto Sentinel 2

La misión Copernicus de Sentinel 2 comprende dos satélites, Sentinel 2a y Sentinel 2b, en órbita polar posicionados en esa misma orbita con un diferencia de 180° entre sí. Su objetivo es monitorear la variabilidad de las diferentes coberturas de la superficie terrestre. Las aplicaciones principales son proporcionar información para prácticas agrícolas y forestales, estas imágenes se utilizan para determinar diversos tipos de índices de vegetación, igualmente, para alertar la contaminación de cuerpos de agua, mapear el estado y cambios de la superficie terrestre entre otros.

En su funcionamiento cuenta con una franja de captura de 290 kilómetros de ancho y su tiempo de revisita o resolución temporal, hasta de 5 días con los dos satélites. Estos satélites llevan consigo una cámara multiespectral de alta resolución, con una resolución espectral conformada por 13 bandas espectrales que procesadas dan resultados enriquecedores de la superficie terrestre y la vegetación. La cámara multiespectral (MSI) cuenta con dos grandes planos donde se forman las imágenes de los objetos, el primero corresponde a las bandas del visible (VIS) y del infrarrojo próximo (NIR) y el segundo plano focal está en el infrarrojo medio (SWIR), ver Figura 2, así:

- 4 bandas que funcionan para una resolución espacial de 10 metros en tamaño de pixel: azul (490 nanómetros), verde (560 nanómetros), rojo (665 nanómetros) e infrarrojo cercano (842 nanómetros).
- 6 bandas que funcionan para una resolución espacial de 20 metros en tamaño de pixel: 4 bandas estrechas para la caracterización de la vegetación (705, 740, 783 y 865 nanómetros) y 2 bandas SWIR más grandes (1610 y 2190 nanómetros) para aplicaciones como detección de nieve, hielo, nubes o evaluación de estrés hídrico de la vegetación.

- 3 bandas de 60 metros para detección de nubes y correcciones atmosféricas (443 nanómetros para aerosoles, 945 nanómetros para vapor de agua y 1375 nanómetros para detección de cirrus).

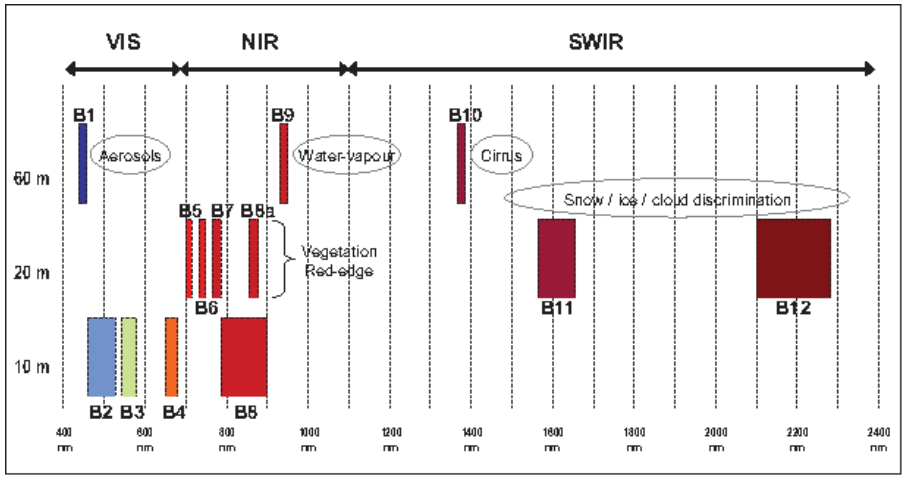


Figura 2. MSI Bandas espectrales y resolución espacial Sentinel 2, Fuente: (Thales Alenia Space France, 2018) Copernicus Sentinel-2 Products Specification Document

3.3.2. Sensor remoto Sentinel 3

Copernicus de la ESA comprende los sensores remotos de la misión de Sentinel 3, que comprende actualmente dos satélites, Sentinel 3a y Sentinel 3b, con un desfase de 180°, estos sensores son muy completos al monitorear la Tierra en diferentes coberturas y dinámicas. Sentinel 3 toma medidas del sistema oceánico, terrestre, de coberturas de hielo y hasta datos atmosféricos, muy útil para integrar diferentes dinámicas, realizar monitoreo y poder mejorar modelos de pronósticos terrestres y atmosféricos.

En este proyecto utilizamos los datos del instrumento SLSTR (Sea and Land Surface Temperature Radiometer) para el producto Level-2 LST (Level 2 of Land Surface Temperature Parameters), las bandas S7 (0.38 nanómetros), S8 (0.9 nanómetros) y S9 (1 nanómetro), que capturan datos térmicos en el infrarrojo, a una resolución de espacial de 1.000 metros, (Donlon et al., 2012) para

el procesamiento en Sen-ET, en la Figura 3 vemos una salida grafica de la banda LST del sensor Sentinel 3

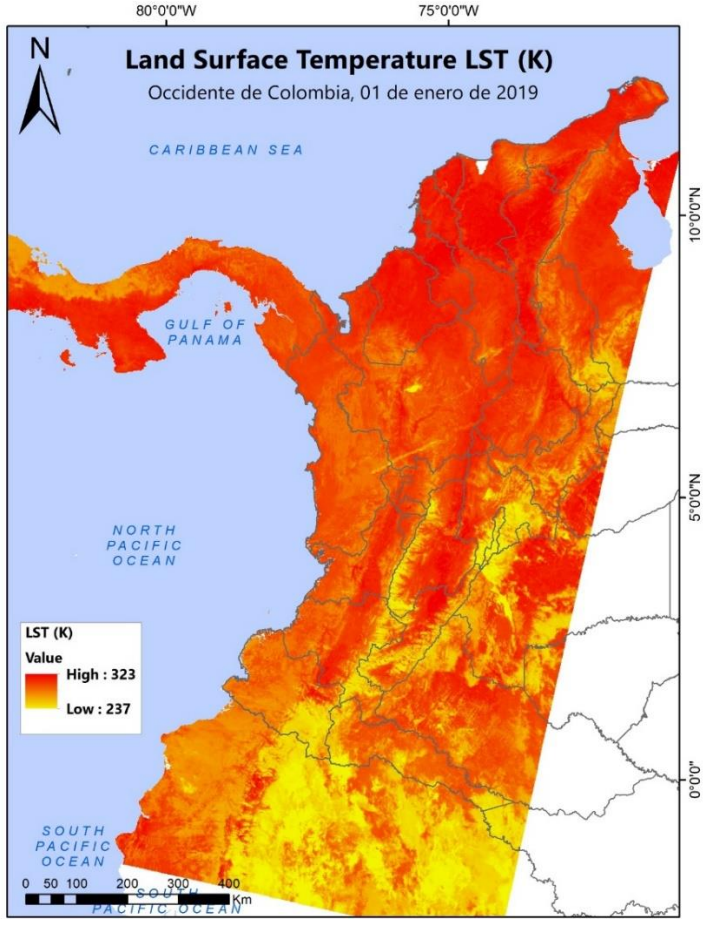


Figura 3. Temperatura en superficie LST para Colombia del 01 de enero de 2019 producto del sensor Sentinel-3 LST-Level 2 en grados Kelvin (°K) . Fuente: Elaboración Propia.

3.4. Evapotranspiración (ET)

La evapotranspiración es el proceso resultante de la evaporación y de la transpiración. La evaporación es el proceso en que se convierte el agua en gas, pasa de un estado líquido a gaseoso, en los cultivos este cambio comprende el ciclo meteorológico y se da del suelo a la atmósfera. La transpiración igualmente es pérdida de agua en forma de vapor, principalmente por las hojas de las plantas.

En los estomas, que son como los poros de la epidermis de las plantas ocurre la transpiración, pero también aquí se recoge el dióxido de carbono CO_2 atmosférico, importante para el proceso de fotosíntesis. La evaporación de agua implica un esfuerzo energético importante debido a que se sube la temperatura de la hoja al recibir la energía del sol. Por otra parte, la transpiración balancea estos cambios térmicos, que regula la planta para proceder el correcto funcionamiento del sistema enzimático y de los procesos metabólicos (Alegría. 2016).

La evaporación y la transpiración son importantes para determinar las necesidades hídricas de un cultivo, actualmente se determinan estas mediciones directamente en campo y utilizando datos meteorológicos de estaciones terrestres.

Por lo anterior, aunque la evaporación y la transpiración son procesos independientes pero asociados en una cobertura vegetal o cultivo es muy complicado diferenciar de manera individual la pérdida de agua o cambio físico proveniente de la evaporación y de la transpiración, por lo cual su estimación se realiza de manera conjunta por evapotranspiración ET (Villodre, 2019). Por esta interacción de varios sistemas en el proceso de ET, existe el denominado Sistema Suelo-Planta-Atmosfera, ver Figura 4.

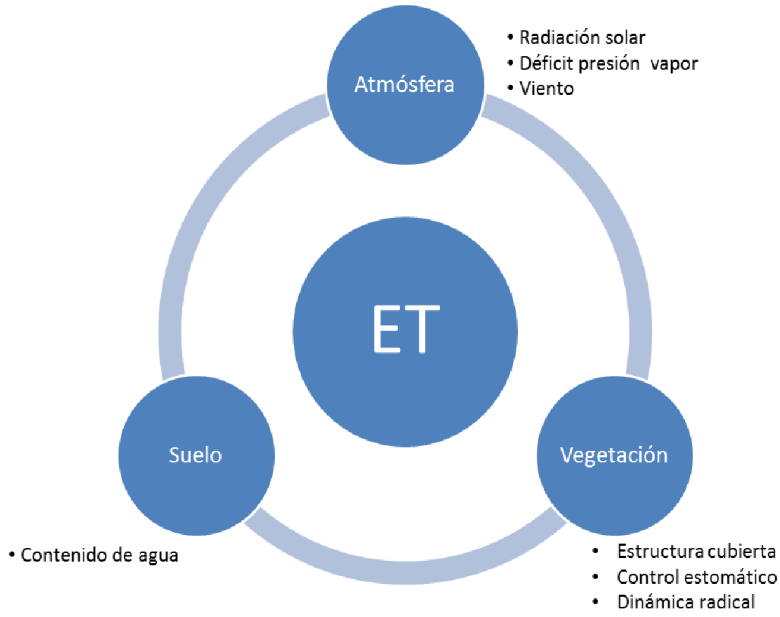


Figura 4. Esquema del proceso de la ET, Sistema Suelo – Vegetación - Atmósfera. Fuente: Carrilero Villodre 2019

3.4.1. Evapotranspiración de Referencia o de cultivo de referencia (ETo)

La Evapotranspiración de Referencia (ETo), supone una superficie vegetal de pastos, sin restricciones de agua sin tomar en cuenta tipos de cultivo, desarrollo o fenología, ni tipo de follaje o prácticas de manejo, La FAO en la revista 56, no recomienda otras referencias como Evapotranspiración Potencial ETp, debido a la ambigüedad que existe en las definiciones. De lo anterior, debido a que supone un ambiente con excelente disponibilidad de agua, los factores del suelo no son tomados en cuenta.

Los datos meteorológicos si están vinculados a la ETo, por consiguiente, se pueden definir como un parámetro climático. La ETo se modela en un espacio y año específico, mostrando el dato evaporante, sin tener en cuenta las características del suelo, ni del cultivo (Allen, 2006).

3.4.2. Evapotranspiración Real o Evaporación de Cultivo (ETc)

La evapotranspiración real (ETc), es el proceso dual de perdida de agua por lo evaporado de la superficie del suelo y por lo transpirado en la planta, se da bajo condiciones estándar sin tener en cuenta las enfermedades de la planta, una adecuada fertilización, condiciones óptimas de suelo y agua, y que puede alcanzar un máximo en su producción y las condiciones climáticas del lugar.

La ETc tiene en cuenta datos climáticos y factores propios de cada cultivo, como son la reflectividad y la resistencia del aire según el método de Penman-Monteith, ya que en algunos casos a la falta de información para los cultivos, como son los datos de velocidad del viento, estructura de la cobertura, cantidad de agua del suelo, índice de área foliar (IAF), la altura y estructura de la planta, que permita determinar su incidencia, este método solo se utiliza en el cálculo de referencia (ETo), pero se puede colocar particularidades del cultivo, mediante un coeficiente (Villodre , 2019).

3.4.3. Coeficiente de Cultivo (Kc)

Las características del cultivo y la evaporación del suelo se toman en cuenta en el coeficiente de cultivo Kc, este coeficiente está muy bien definido en el manual de la FAO 56, sin embargo, su aproximación metodológica está dada por la división de la evapotranspiración de cultivo ETc con la evaporación de referencia ETo relacionado en la ecuación (1). Por lo cual, la ETo tiene en cuenta lo factores climatológicos y características del cultivo.

$$ETc = Kc * ETo \quad (1)$$

Puntualizando estos factores que determinan Kc, para un cultivo diferente de la referencia de pastos son: el tipo de cultivo que tiene en cuenta la altura, densidad, características del follaje y el riego y el factor clima. (Allen et al, 2006).

3.5. Métodos utilizados para el cálculo de la Evapotranspiración de Referencia (ETo)

La medición de la Evapotranspiración de Referencia (ETo), puede ser estimada mediante mediciones experimentales bajo condiciones muy específicas del terreno y del cultivo, una forma es la estimación mediante la utilización de equipos como los lisímetros. Estos equipos son costosos de instalar y mantener, por esta razón se utilizan mediciones bajo metodologías definidas con variables meteorológicas.

Se han desarrollado varios modelos para determinar esta evapotranspiración de referencia (ETo), en este proyecto se usaron 3 modelos que involucran los datos de las estaciones de CENICAÑA. Para el cálculo se utilizó la "Validación de las fórmulas de evapotranspiración de Referencia ETo para Colombia", publicado por el IDEAM en el 2018".

3.5.1. Método Penman Monteith

Este método de evapotranspiración de referencia requiere de datos meteorológicos como humedad atmosférica, radiación, temperatura, velocidad del viento, los datos de la ubicación geográfica (coordenadas geográficas) y altura sobre el nivel medio del mar de la zona (Allen et al., 2006). La FAO recomienda este método para el cálculo de ETo, porque es el que contiene en su formulación más variables atmosféricas y toma la radiación dependiendo de la latitud del sitio.

La ecuación es derivada originalmente de Penman en 1948 y la FAO la reformuló mediante las ecuaciones de resistencia aerodinámica y de cultivo, la cual se formula así:

$$\lambda ETo = \frac{\Delta(R_n - G) + \frac{\rho_a Cp\,(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \lambda\left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)} \quad (2)$$

Tenemos:

- Δ: Pendiente curva de presión de vapor
- R_n: Radiación neta
- G: Flujo de calor en el suelo
- C_p: Calor específico del aire a presión constante
- λ: Constante sicrosométrica
- ρ_a: Densidad promedio del aire
- e_s: Presión de saturación del vapor de agua
- e_a: Presión de vapor de agua actual
- r_s y r_a: Resistencia superficial y Resistencia Aerodinámica

A la diferencia (e_s - e_a) se le denomina déficit de presión de vapor (DPV).

Para el proyecto se usó la simplificación recomendada por la FAO mediante el uso de algunas constantes para una superficie de pasto como cultivo de referencia, con altura media de 0.12 metros, una resistencia fija de 70 metros sobre segundo y un valor de reflectancia de 0.23 (Allen et al., 2006), la ecuación utilizada es:

$$ETo(mm) = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma\frac{900}{T+273}u_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma\,(1 + 0.34u_2)} \quad (3)$$

3.5.2. Método Hargreaves

El método Hargreaves, para el cálculo de ETo propuesto para esta investigación es la propuesta de cálculo alternativo de Hargreaves por la FAO (Allen et al, 2006), descrito a continuación:

$$ETo = 0.0023\ (T_{med} + 17.78)\ R_o(T_{max} - T_{med})\ 0.5 \quad (4)$$

Donde T_{min}, T_{med} y T_{max} son Temperatura mínima, media y máxima respectivamente y Ro es la radiación en el tope de la atmosfera.

3.5.3. Método Jensen-Haise

El método es propuesto inicialmente por M.E. Jensen y por H.R Haise en 1963, con base a la radiación y la temperatura (Jensen & Haise, 1963), al igual que el método de Hargreaves puede utilizarse en diferentes sitios, se representa como

$$ETo = Rs\ (0.025\ T_{med} + 0.08) \quad (5)$$

Donde Rs es la radiación incidente y T_{med} es la Temperatura media.

3.5.4. Método METRIC

El método METRIC, Mapping EvapoTranspiration at high Resolution with Internalized Calibration por sus siglas en inglés, es utilizado en este proyecto para realizar una comparación con los métodos propuestos, se basa en la estimación de la Evapotranspiración de cultivo o real usando para la investigación el software SNAP 7.0 con el modulo Sen-ET.

Este es un modelo computacional desarrollado por la Universidad de Idaho, que procesa imágenes satelitales y se basa en el principio, de balance de energía variante del método Surface Energy

Balance Algorithm for Land o SEBAL (Bastiaanssen et al, 2005). La ET se estima teniendo en cuenta la radiación total de onda corta (short wave) y onda larga (long wave) de la vegetación (Rn), la cantidad de calor que conduce al suelo (G), y el flujo de calor que va al aire desde la superficie (H). La diferencia de estas tres variables, representa la cantidad de energía absorbida durante la conversión de agua líquida en vapor, ver Figura 5.

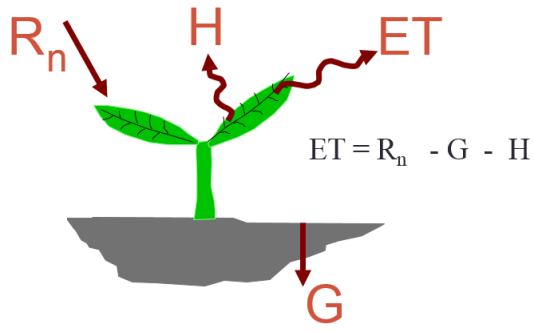


Figura 5. Formula de balance de energía basado en la temperatura para estimar la ET, Rn es Radiación neta, H es flujo de calor, G es la conducción de calor al suelo, ET es la cantidad de agua líquida en vapor. Fuente: (Rickallenidaho, 2015)

3.6. Índices de Vegetación

En el espectro electromagnético se utilizan las longitudes de onda del visible e infrarrojo, como son, la banda del rojo, el azul, verde, el infrarrojo cercano, el infrarrojo de onda corta o infrarrojo medio y el infrarrojo térmico, mediante operaciones y relaciones entre ellas pueden destacar parámetros biofísicos de la vegetación.

En la Figura 6 se muestran las diferentes bandas capturadas por los sensores ópticos Sentinel 2 y Landsat 8 y en cuadros los anchos de cada banda, en la Figura 7 se muestran las respuestas espectrales de algunas mediciones hechas en cultivos en la estación húmeda con el espectro radiómetro FieldSpec4 (Martínez M., L. J. 2017).

La respuesta en el espectro visible se debe en gran medida a la cantidad y tipo de clorofila y carotenos, principalmente en la banda roja R, mientras que en el NIR incide principalmente en las características de la estructura foliar y en el SWIR está más relacionado con el contenido de agua (Liang, 2004)

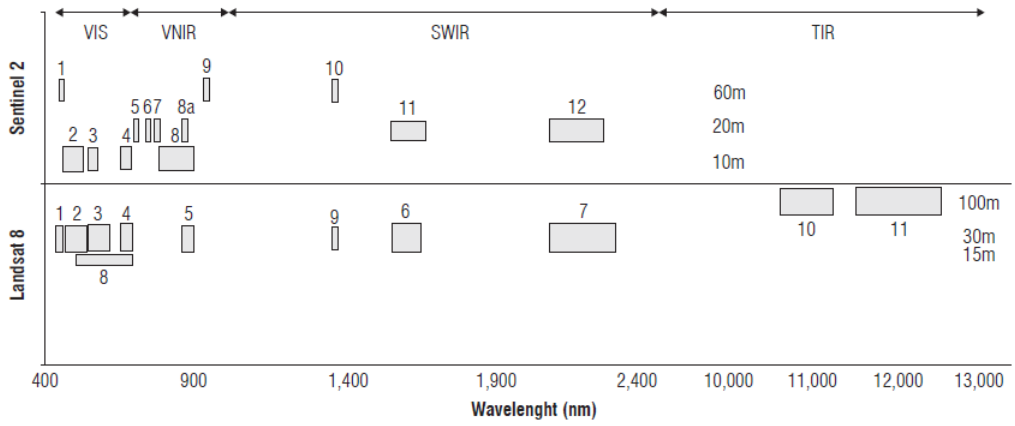


Figura 6. Características espectrales de los sensores Sentinel 2 y Landsat 8. Fuente: Martínez M., L. J. 2017

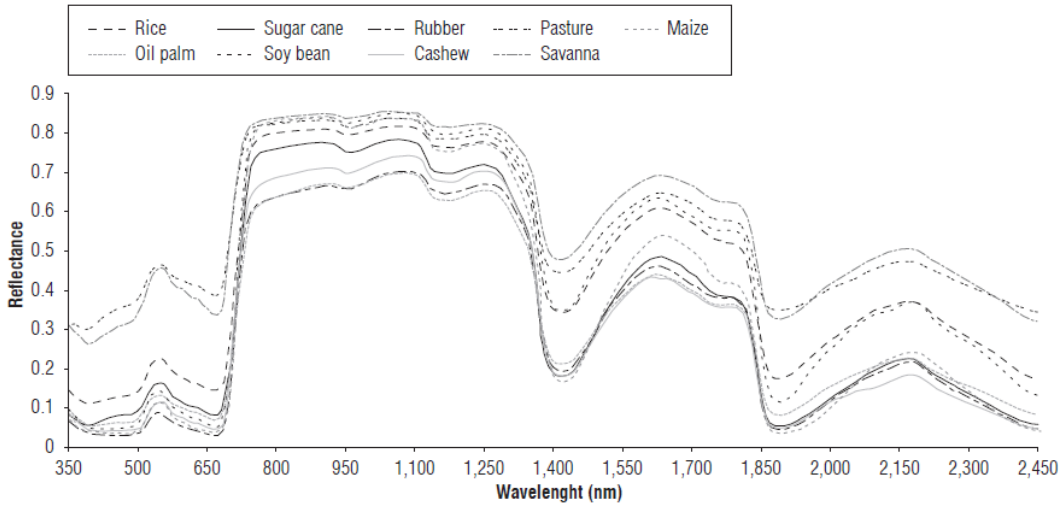


Figura 7. Reflectancia de algunos tipos de cultivo, la caña de azúcar en línea negra continúa. Fuente: Martínez M., L. J. 2017

En las la Figura 6 y Figura 7, podemos ver la distribución de las bandas en el espectro electromagnético de los sensores Sentinel 2 y Landsat 8 y las firmas espectrales de algunos cultivos, incluidos la caña de azúcar, respectivamente. Se puede observar, la respuesta espectral en las bandas del espectro visible, NIR y SWIR que finalmente relaciona la mayoría de índices de vegetación.

Los índices de vegetación se convierten entonces en la estrategia más adecuada para extraer información cuantitativa de los parámetros biofísicos de la superficie terrestre en la capa vegetal (Gilabert et al, 2010).

Por último, se detallan en la Tabla 1, los Índices de Vegetación-IV que son los utilizados en este proyecto, en la sección de Resultados donde se analizaron las correlaciones de estos y el dato de evaporación de las estaciones terrestres de CENICAÑA.

La capacidad de los sensores remotos ópticos para calcular los IV, y su correlación entre estos y el coeficiente de cultivo permite estimar una aproximación a la ETc que utilizaremos en este proyecto para realizar las comparaciones entre los espacios temporales en la zona de estudio.

Tabla 1. Índices de vegetación y su aplicación usando imágenes Sentinel 2. Fuente: O. Rozenstein et al. 2018.

Nombre IV	***Fómula***	***Sentinel 2, Bandas Asignadas***	***Referencia***
MERIS terrestrial chlorophyll index (MTCI)	$\frac{(NIR-RE)}{(RE-RED)}$	$\frac{(B6-B5)}{(B5-B4)}$	(Dash & Curran, 2007)
Red Edge In-flection Point (REIP)	$700+400\left(\frac{\frac{R670+R780}{2}-R700}{R740-R700}\right)$	$700+400\left(\frac{\frac{B04+B07}{2}-B05}{B06-B05}\right)$	(Guyot et al, 1988)
Atmospherically Resistant Vegetation Index (ARVI)	$\frac{(NIR-2)(RED-BLUE)}{(NIR+2)(RED-BLUE)}$	$\frac{(B08-2)(B04-B02)}{(B08+2)(B04-B02)}$	(Kaufman & Tanre, 1992)
Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI)	$\left(\frac{NIR-RED}{NIR+RED+L}\right)(1+L)$	$\left(\frac{B08-B04}{B08+B04+0{,}5}\right)(1{,}5)$	(Huete, 1988)
Modified Soil Adjusted Vegetation Index 2 (MSAVI2)	$\frac{2*NIR+1-\sqrt{(2*NIR+1)^2-8*(NIR-RED)}}{2}$	$\frac{2*B08+1-\sqrt{(2*B08+1)^2-8*(B08-B04)}}{2}$	(Qi et al, 1994)
Infrared Percentage Vegetation Index (IPVI)	$\frac{NIR}{NIR+RED}$	$\frac{B08}{B08+B04}$	(Crippen, 1990)
Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)	$\frac{NIR-RED}{NIR+RED}$	$\frac{B08-B04}{B08+B04}$	(Tucker, 1979)
Modified Soil Adjusted Vegetation Index (MSAVI)	$\frac{(NIR-RED)(1+L)}{NIR+RED+L}$ $where: L=1-\frac{2*s*(NIR-RED)(NIR-s*RED)}{NIR+RED}$	$\frac{(B08-B04)(1+L)}{B08+B04+L}$ $where: L=1-2*0{,}5*NDVI*WDVI$	(Qi et al, 1994)
Transformed Normalized Difference Vegetation Index (TNDVI)	$\sqrt{\frac{NIR-RED}{NIR+RED}+0{,}5}$	$\sqrt{\frac{B08-B04}{B08+B04}+0{,}5}$	(Deering, 1975)
Green Normalized Difference Vegetation Index (GNDVI)	$\frac{NIR-GREEN}{NIR+GREEN}$	$\frac{B07-B03}{B07+B03}$	(Gitelson & Merzlyak, 1998)
Inverted Red-Edge Chlorophyll Index (IRECI)	$\frac{NIR-RED}{RE1/RE2}$	$\frac{B07-B04}{B05/B06}$	(Frampton et al, 2013)
Global Environmental Monitoring Index (GEMI)	$\acute{\eta}(1-0{,}25*\acute{\eta})-\frac{RED-0{,}125}{1-RED}$ $where: \acute{\eta}=\frac{2(NIR^2-RED^2)+1{,}5*NIR+0{,}5*RED)}{NIR+RED+0{,}5}$	$\acute{\eta}(1-0{,}25*\acute{\eta})-\frac{B04-0{,}125}{1-B04}$ $where: \acute{\eta}=\frac{2(B8A^2-B04^2)+1{,}5*B8A+0{,}5*B04)}{B8A+B04+0{,}5}$	(Pinty & Verstraete, 1992)
Normalized Difference Index 45 (NDI45)	$\frac{NIR-RED}{NIR+RED}$	$\frac{B05-B04}{B05+B04}$	(Delegido et al, 2011)
Perpendicular Vegetation Index (PVI)	$\sqrt{(\rho G_{ir,s}-P_{ir})^2+(\rho G_{r,s}-P_r)^2}$	$\sin(a)*B08-\cos(a)*B04$ $where\ a=45°$	(Richardson & Wiegand, 1977)
Difference Vegetation Index (DVI)	$NIR-RED$	$B08-B04$	(Tucker, 1979)
Pigment Specific Simple Ratio (PSSRa)	$\frac{RE}{RED}$	$\frac{B07}{B04}$	(Blackburn, 1998)
Ratio Vegetation Index (RVI)	$\frac{NIR}{RED}$	$\frac{B08}{B04}$	(Pearson & Miller, 1972)
Weighted Difference Vegetation Index (WDVI)	$NIR-s*RED$	$B08-0{,}5*B04$	(Clevers, 1989)
Transformed Soil Adjusted Vegetation Index (TSAVI)	$\frac{A(NIR-A)(RED-B)}{A*NIR+RED-A*B+x(1+A^2)}$	$\frac{s(B08-s)(B04-a)}{a*B08+B04-a*s+x(1+s^2)}$ $where\ a=0{,}5;\ \ s=0{,}5;\ \ x=0{,}08$	(Baret et al, 1989)
Sentinel-2 Red-Edge Position (S2REP)	$705+35\left(\frac{\frac{p783+p665}{2}-p705}{p740-p705}\right)$	$705+35\left(\frac{\frac{B04+B07}{2}-B05}{B06-B05}\right)$	(Frampton et al, 2013)
Modified Chlorophyll Absorption Ratio Index (MCARI)	$(RE-RED)-0{,}2(RE-GREEN)\left(\frac{RE}{RED}\right)$	$(B05-B04)-0{,}2(B05-B03)\left(\frac{B05}{B04}\right)$	(Daughtry et al, 2000)
Enhanced Vegetation Index (EVI)	$\frac{2{,}5(NIR-RED)}{NIR+6*RED-7{,}5*BLUE+1}$	$\frac{2{,}5(B08-B04)}{B08+6*B04-7{,}5*B02+1}$	(Huete et al, 2002)

3.6.1. Relación entre los índices de vegetación IV y el coeficiente de cultivo Kc

La aplicación directa de los IV en la estimación de la ET en los cultivos es sustituir el IV en diferentes ecuaciones de Kc. Actualmente, los valores mensuales de Kc se determinan desde un valor mínimo en la siembra hasta un valor máximo en el máximo dosel, entonces el Kc disminuye a partir de la maduración de la cosecha. La curva generada a partir de estas fases determinan los valores del coeficiente de cultivo, cabe resaltar que estos valores de Kc se dan para cultivos estándar en condiciones óptimas con irrigación continua, la FAO recomienda que se modifiquen localmente las fases de crecimiento del cultivo y las necesidades hídricas. La teledetección puede proporcionar una estimación indirecta del Kc, porque la ET depende de la porción de cobertura del suelo y del índice de foliar, donde estas variables pueden integrarse en una ecuación por que integra el componente de radiación que se produce en la fotosíntesis derivado de la reflectancia de las plantas en los IV (Glenn et al., 2007).

Es de interés para este proyecto obtener el coeficiente de cultivo Kc mediante los índices de vegetación de imágenes de satélite Sentinel 2, así se puede incorporar este coeficiente teniendo en cuenta condiciones más reales del cultivo de caña de azúcar, como son el crecimiento de la caña, características de humedad y temporalidad de los datos. No se consideran otras variables como es el estrés hídrico de la caña de azúcar, puesto que los índices estructurales de la planta no son utilizados para tales efectos (Villodre, 2019).

Existen varias aplicaciones que utilizan la metodología para el cálculo de la ETc con base a los índices de vegetación, se han estudiado diferentes relaciones entre estos y el Kc en diferentes coberturas vegetales para distintos espacios de tiempo, en relación a los índices y los cultivos se encontraron 2 estudios (Jayanthi H. 2003) y (González-Dugo y Mateos, 2008) que aplicaron para un espacio y tiempo el análisis de las etapas del cultivo y su relación con varios índices de

vegetación que concluyen que la relación es significativa y con valores aproximados. La posibilidad de utilizar una misma ecuación involucrando los IV en diferentes tipos de cultivos, es una manera viable para la estimación de la ETc en grandes áreas, independiente de si se utiliza una relación particular para cada cultivo (Melton et al, 2012)

Para este proyecto se utiliza la relación de la ecuación (6) que es usada ampliamente en cultivos herbáceos donde está incluido la caña de azúcar, sus valores constantes corresponden a las recomendadas por FAO 56 para el cultivo a media etapa de crecimiento y que en su etapa máxima de desarrollo alcanza crecimiento completo (Allen et al., 2006). Para el uso de esta ecuación, el cultivo debe tener un manejo estándar con un sistema de riego constante, ya que esta componente evaporativa es altamente dependiente de un sistema de riego característico del tipo de cultivo industrializado que se analiza aquí, además de las características propias del suelo y del cultivo (Calera et al, 2016).

$$Kc = 1.25 * NDVI + 0.1 \qquad (6)$$

Sin embargo, se establece algunas limitaciones de la ecuación (6), como se había comentado anteriormente, esta relación se establece para una etapa de crecimiento medio, en las etapas iniciales del cultivo, debido a que en el suelo desnudo la evaporación es alta, muy dominante (Calera et al, 2016), pero al realizarse riegos frecuentes como lo recomienda la FAO y seguramente es así al tratarse de cultivos monitoreados de CENICAÑA, la ecuación es una buena aproximación del Kc.

Como se ha descrito, la utilización de los índices de vegetación para el cálculo del Kc, es insumo para calcular la ETc mediante relación (1). Los índices de vegetación se calculan en base de datos del espectro visible VIS y el infrarrojo cercano NIR que son suministrados por varios sensores

ópticos (Landsat 5, 7 y 8, Sentinel 2, Ikonos, Deimos 2, RapiEye, entre otros.) y también pueden ser utilizados de manera combinada entre varios sensores remotos, mejorando las condiciones de frecuencia temporal y espacial (Martínez-Bernal et al, 2009).

4. Metodología

En este capítulo se describe el área de estudio, los datos utilizados y el marco experimental empleados para el desarrollo de la presente investigación en cumplimiento de los objetivos planteados. Adicionalmente, se presentará el diagrama de flujo asociado a la investigación, ver Figura 12.

Para esta metodología se aplica el método de investigación experimental, donde se controlan las variables con la mayor confiabilidad posible, para determinar las relaciones entre los datos analizados.

4.1. Área de estudio

El área de estudio se encuentra en los departamentos de Cauca y Valle del Cauca, en su mayoría parcelas de cultivo de caña administradas por CENICAÑA, en la zona del valle geográfico del rio Cauca entre coordenadas geográficas medias 76°23'33.176"W y 3°27'11.338"N, con una altura promedio de 180 metros sobre el nivel medio del mar (msnmm), ver Figura 8.

La zona se considera húmeda y semi-húmeda, de suelos arcillosos en un 79%, en general presentan buenas condiciones para el desarrollo del cultivo de caña. Las parcelas del cultivo están en diferentes estados fenológicos donde se encuentran las estaciones meteorológicas de CENICAÑA que capturan datos diarios para Temperatura, Humedad Relativa, Radiación Solar, Precipitación y evaporación, ver ubicación de las estaciones en la Figura 8 y el detalle de las estaciones en la Tabla 3.

En el informe anual de Cenicaña se verifica que todos los datos de las estaciones meteorológicas contengan datos continuos, resaltando que para el año 2019 predominaron anomalías de

temperatura superficial del mar (TSM) positivas o cálidas debido al fenómeno del niño, que a pesar que se esperaba temporada de sequía, el primer semestre fue más húmedo del normal histórico en todo el valle del rio Cauca. Respecto a la precipitación acumulada de febrero, marzo, abril, mayo y junio fue de 14%, 13% 31%, 8% y 13% respectivamente, siendo superior al valor promedio histórico mensual, para el segundo semestre la cantidad de agua que cayó fue similar al valor promedio histórico, Figura 9 y Figura 10.

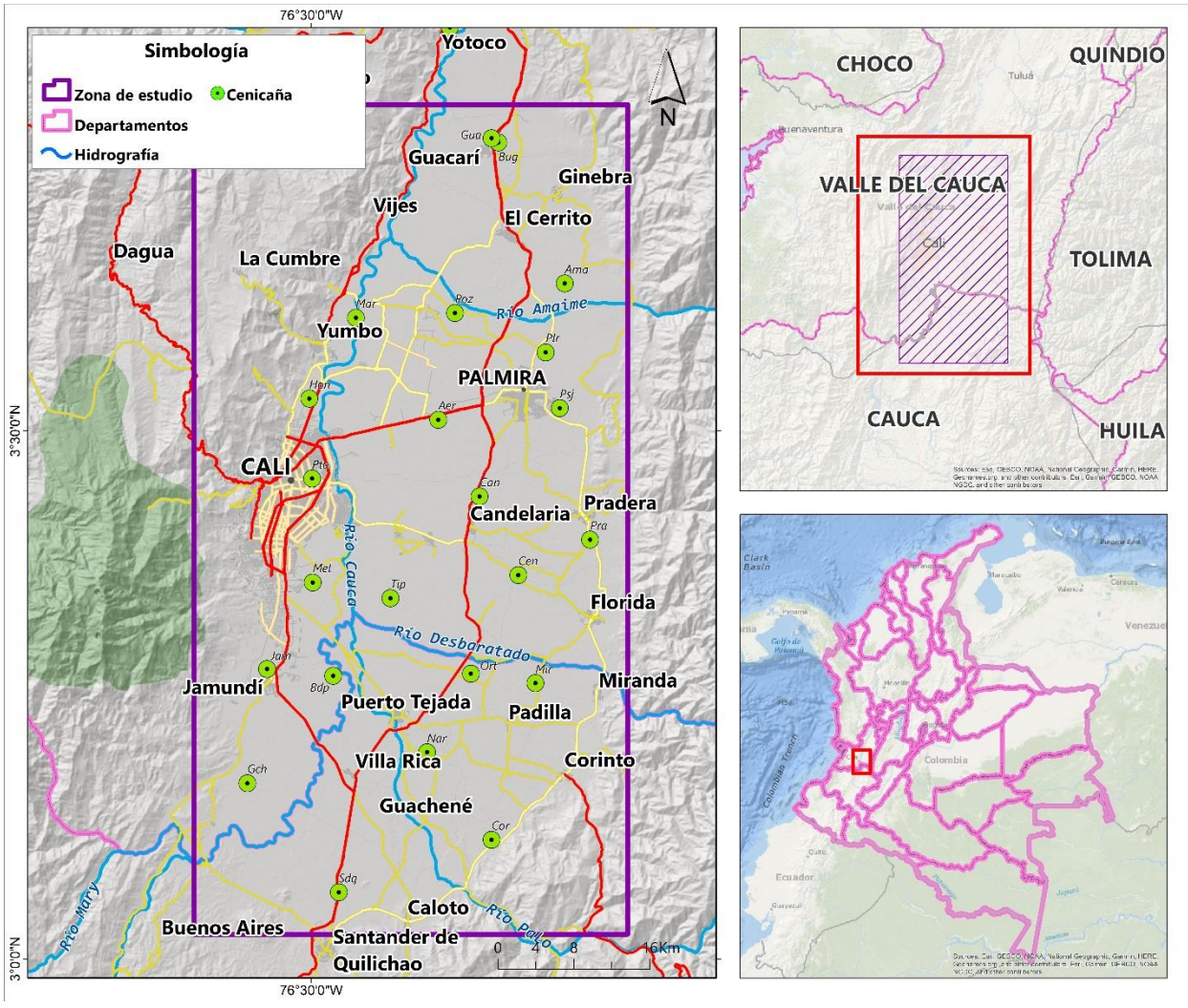


Figura 8. Área de Estudio, Fuente: Elaboración propia, 2020

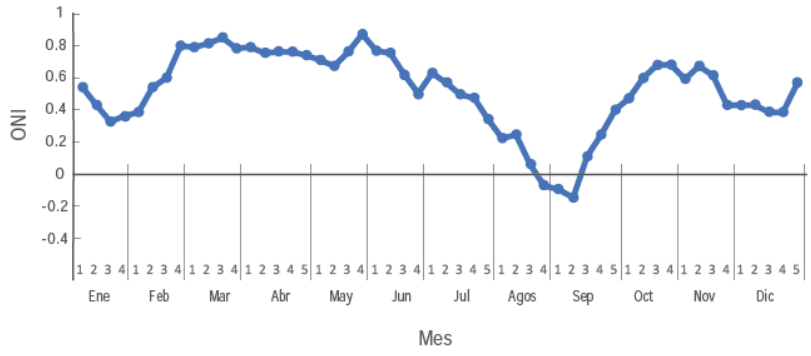


Figura 9. Datos de la anomalía de la temperatura superficial del mar en la zona Niño 3.4 (Oceanic Niño, ONI) de acuerdo a los datos semanales publicados por BM Australia 2019, Fuente: CENICAÑA 2019

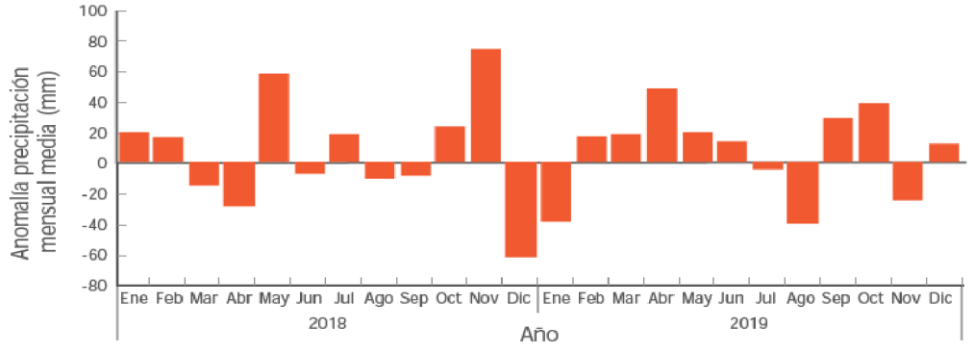


Figura 10. Anomalía de la precipitación mensual media del valle del río Cauca con respecto al promedio histórico mensual. Calculado con base en los datos de la Red Meteorológica Automatizada (RMA) de la agroindustria de la caña. 2019. Fuente: CENICAÑA 2019

4.1.1. Datos de estaciones Meteorológicas

Los datos meteorológicos obtenidos de las 20 estaciones de CENICAÑA del año 2019 y 2020, que sirven para la comparación, se obtienen de las estaciones en el Meteoportal – Clima que ofrece gratuita y de manera interactiva los datos de la red Meteorológica Automatizada (RMA) tanto información meteorológica en tiempo real como datos históricos, ver Tabla 3.y en la Figura 11 se observa la distribución de las estaciones.

De los datos in situ se compara la evaporación estimada por las estaciones contra los índices de vegetación calculados a partir de las imágenes procesadas Sentinel 2, se utilizan los datos de

ubicación geográfica, temperatura, radiación solar y precipitación para el cálculo de los métodos de evapotranspiración de referencia del método Penman-Monthein (1992), Hargreaves (1985) y Jensen-Haise (1963).

Para el tratamiento estadístico de los datos, se consolidaron en una hoja de cálculo los datos de las estaciones por código, fecha, ubicación geográfica y datos meteorológicos, a estos se indexaron todos los datos calculados de los procesamientos de imágenes por extracción de datos por pixel del módulo "extrack by pixel" del software SNAP 7.0.

4.1.2. Datos de sensores remotos

Las imágenes analizadas provienen de los sensores Sentinel 2a y Sentinel 2b nivel L2A, corregidas a nivel de superficie y de Sentinel 3a y Sentinel 3b, las cuales hacen parte de la misión espacial Copernicus de la Agencia Espacial Europea (ESA). Dichas imágenes son de acceso libre y fueron descargadas desde el portal Alaska Satellite Facility, estas fueron proyectadas al sistema de proyección para Colombia MAGNA-SIRGAS.

La descarga de imágenes Sentinel 2a y 2b, con nivel de procesamiento L2A, es entre los meses de enero del año 2019 con 20 escenas y el primer semestre de 2020 con 16, la calidad de la imagen se relaciona con el porcentaje de cubrimiento de nubes, si es Excelente la cobertura de nubes es menos del 10%, Buena de 10% a 40% y Regular más del 40%, ver en la Tabla 2 el resumen de las imágenes seleccionadas para el estudio de este proyecto. Respecto a la selección de las imágenes se ha tenido en cuenta la ubicación geográfica de las estaciones meteorológicas procurando que tenga el menor cubrimiento de nubes posible, estas imágenes contienen 20 estaciones

meteorológicas de CENICAÑA, ver ubicación de estaciones sobre una imagen Sentinel 2 en la Figura 11.

Tabla 2. Frecuencia Temporal y descripción de las imágenes satelitales utilizadas en el proyecto. Fuente: Elaboración propia.

Calidad	Sensor	Año	Mes	Fecha
Excelente	S2B_MSIL2A	2019	ene	2/01/2019
Buena	S2B_MSIL2A	2019	ene	12/01/2019
Buena	S2B_MSIL2A	2019	feb	11/02/2019
Regular	S2A_MSIL2A	2019	jun	16/06/2019
Regular	S2A_MSIL2A	2019	jun	26/06/2019
Excelente	S2A_MSIL2A	2019	jul	6/07/2019
Buena	S2B_MSIL2A	2019	jul	11/07/2019
Excelente	S2A_MSIL2A	2019	ago	5/08/2019
Excelente	S2B_MSIL2A	2019	ago	10/08/2019
Regular	S2A_MSIL2A	2019	ago	15/08/2019
Buena	S2B_MSIL2A	2019	ago	20/08/2019
Excelente	S2A_MSIL2A	2019	ago	25/08/2019
Excelente	S2B_MSIL2A	2019	sep	9/09/2019
Regular	S2B_MSIL2A	2019	oct	19/10/2019
Buena	S2A_MSIL2A	2019	nov	3/11/2019
Regular	S2B_MSIL2A	2019	nov	8/11/2019
Regular	S2A_MSIL2A	2019	nov	23/11/2019
Regular	S2B_MSIL2A	2019	nov	28/11/2019
Regular	S2B_MSIL2A	2019	dic	8/12/2019
Regular	S2B_MSIL2A	2019	dic	28/12/2019

Calidad	Sensor	Año	Mes	Fecha
Regular	S2A_MSIL2A	2020	ene	2/01/2020
Regular	S2A_MSIL2A	2020	ene	12/01/2020
Excelente	S2B_MSIL2A	2020	ene	17/01/2020
Excelente	S2B_MSIL2A	2020	ene	17/01/2020
Regular	S2B_MSIL2A	2020	ene	27/01/2020
Regular	S2A_MSIL2A	2020	feb	1/02/2020
Excelente	S2B_MSIL2A	2020	feb	6/02/2020
Excelente	S2B_MSIL2A	2020	feb	6/02/2020
Buena	S2B_MSIL2A	2020	feb	16/02/2020
Regular	S2A_MSIL2A	2020	mar	2/03/2020
Buena	S2B_MSIL2A	2020	mar	17/03/2020
Excelente	S2A_MSIL2A	2020	mar	22/03/2020
Buena	S2B_MSIL2A	2020	mar	27/03/2020
Regular	S2B_MSIL2A	2020	abr	16/04/2020
Buena	S2B_MSIL2A	2020	abr	26/04/2020
Buena	S2A_MSIL2A	2020	jun	20/06/2020

Tabla 3. Estaciones CENICAÑA analizadas en la relación IV y evaporación. Fuente: Elaboración propia.

Estación	Latitude	Longitude	Altura (m)	Zona	Departamento	Municipio
Hon	3,530311	-76,501694	954	Centro	Valle del Cauca	Yumbo
Mar	3,606984	-76,457531	948	Centro	Valle del Cauca	Yumbo
Aer	3,510242	-76,379432	959	Centro	Valle del Cauca	Palmira
Roz	3,611381	-76,363649	975	Centro	Valle del Cauca	Palmira
Plr	3,574152	-76,277807	1034	Centro	Valle del Cauca	Palmira
Psj	3,521349	-76,264413	1029	Centro	Valle del Cauca	Palmira
Pta	3,454709	-76,498873	959	Centro - Sur	Valle del Cauca	Cali
Mel	3,356402	-76,498361	953	Centro - Sur	Valle del Cauca	Cali
Tip	3,341409	-76,424727	958	Centro - Sur	Valle del Cauca	Candelaria
Can	3,437762	-76,340266	970	Centro - Sur	Valle del Cauca	Candelaria
Cen	3,363375	-76,303624	1001	Centro - Sur	Valle del Cauca	Florida
Pra	3,396931	-76,235537	1063	Centro - Sur	Valle del Cauca	Pradera
Sdq	3,063051	-76,473644	998	Norte	Valle del Cauca	Santander de Quilichao
Bdp	3,268072	-76,478882	961	Sur	Valle del Cauca	Jamundí
Nar	3,195573	-76,389969	977	Sur	Cauca	Guachené
Ort	3,269975	-76,348586	984	Sur	Cauca	Miranda
Cor	3,112806	-76,328857	1047	Sur	Cauca	Caloto
Mir	3,261101	-76,287472	1016	Sur	Valle del Cauca	Miranda
Gch	3,166388	-76,560251	979	Sur	Cauca	Jamundí
Jam	3,274489	-76,541699	968	Sur	Cauca	Jamundí

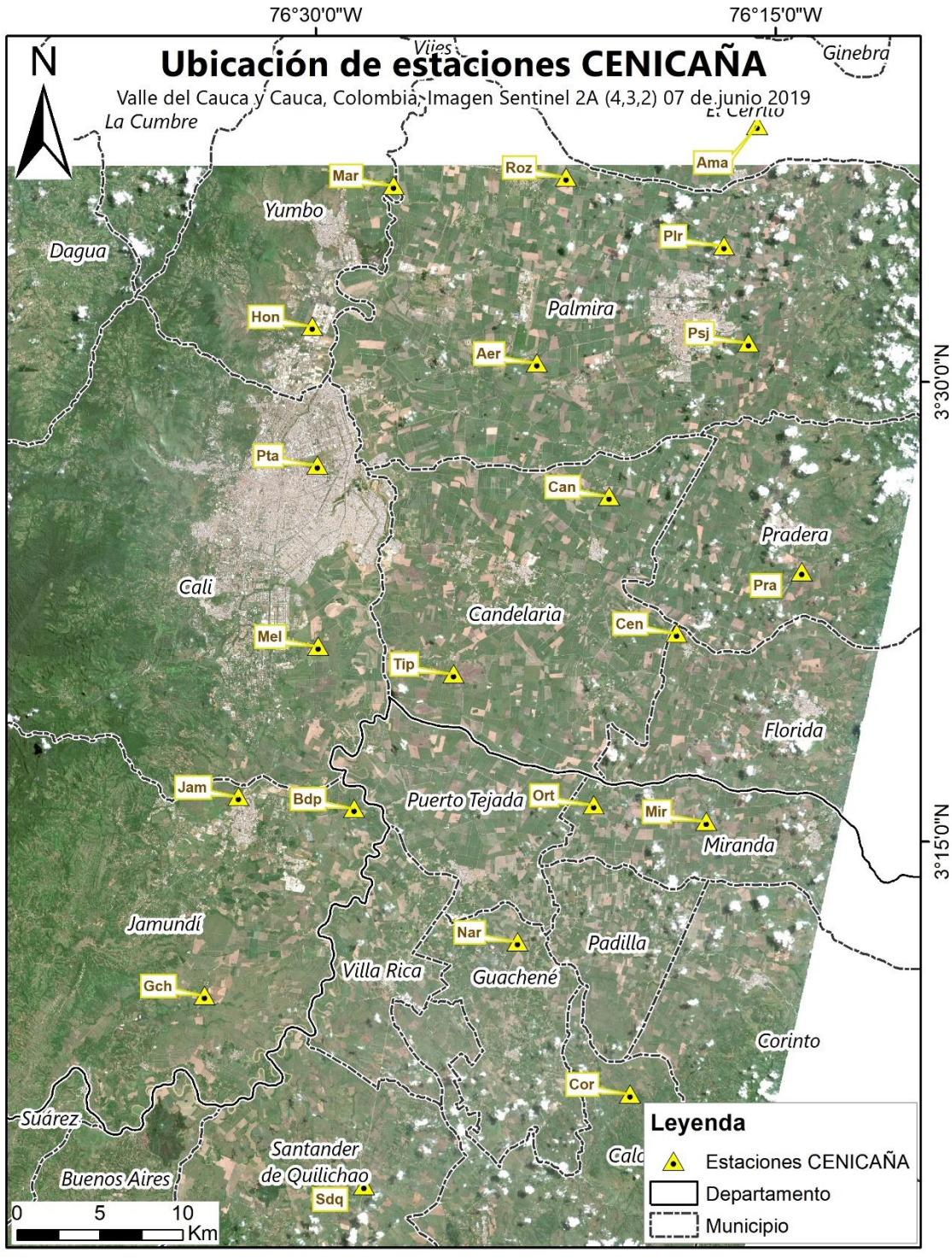


Figura 11. Imagen Sentinel 2 en color natural RGB 432 con ubicación de estaciones de CENICAÑA. Fuente Elaboración Propia.

Adicionalmente, se utilizaron las imágenes del sensor Sentinel 3a y 3b para el procesamiento de la evapotranspiración real ETc por el módulo Sen-ET, procesada en el software SNAP Esa 7.0. El cubrimiento de estas imágenes es en un área diferente al del total de las 20 estaciones meteorológicas utilizadas en la investigación, debido a que el procesamiento en el módulo necesita de pares de imágenes Sentinel 2 y Sentinel 3 válidas para la misma fecha. Por lo cual, en las muestras realizadas en el sector sur, donde están las 20 estaciones, no se encontraron pares válidos, ya que la máscara LST de Sentinel 3 no contenía niveles digitales en la imagen. Por lo anterior, se cambia dentro del cubrimiento de CENICAÑA, un área que garantice esta condición. Finalmente, se encontraron 16 pares de imágenes para el path Sentinel 2 T18UL y Sentinel 3 6059 que cumplían esta condición, y abracaban en su cubrimiento 3 estaciones de CENICAÑA distribuidas a lo largo de las imágenes, en la Tabla 4 se detalla la frecuencia temporal de estos datos..

Tabla 4. Frecuencia Temporal y descripción de las imágenes satelitales utilizadas en el proyecto, para comparación del método de ETc METRIC. Fuente: Elaboración Propia

Satelite		Fecha		
Sentinel 2	Sentinel 3	Año	Mes	(DD/MM/AAAA)
S2A_MSIL2A	S3A_SL_2_LST	2019	ene	4/01/2019
S2A_MSIL2A	S3A_SL_2_LST	2019	feb	13/02/2019
S2A_MSIL2A	S3B_SL_2_LST	2019	mar	25/03/2019
S2A_MSIL2A	S3A_SL_2_LST	2019	abr	14/04/2019
S2A_MSIL2A	S3B_SL_2_LST	2019	abr	24/04/2019
S2A_MSIL2A	S3A_S3B_SL_2_LST	2019	may	4/05/2019
S2A_MSIL2A	S3A_SL_2_LST	2019	jun	3/06/2019
S2A_MSIL2A	S3B_SL_2_LST	2019	jun	13/06/2019
S2A_MSIL2A	S3A_S3B_SL_2_LST	2019	jul	3/07/2019
S2B_MSIL2A	S3A_S3B_SL_2_LST	2019	jul	28/07/2019
S2B_MSIL2A	S3B_SL_2_LST	2019	ago	7/08/2019
S2A_MSIL2A	S3B_SL_2_LST	2019	ago	22/08/2019
S2B_MSIL2A	S3A_SL_2_LST	2019	ago	27/08/2019
S2A_MSIL2A	S3B_SL_2_LST	2019	sep	11/09/2019
S2A_MSIL2A	S3A_SL_2_LST	2019	oct	1/10/2019
S2B_MSIL2A	S3A_S3B_SL_2_LST	2019	oct	16/10/2019

4.2. Marco Experimental

El flujo metodológico en el desarrollo de este proyecto inicia con la selección de la zona de estudio, para la entrada de los datos se utilizan tres tipos de insumos, datos de las estaciones meteorológicas, datos del sensor Sentinel 2a y 2b y los datos de Sentinel 3a y 3b. La disponibilidad de los datos es importante para seleccionar los insumos en este proyecto, en la actualidad la Unión Europea con su programa Copernicus ofrece imágenes satelitales de libre acceso y distribución, al igual que desarrollo de software para el procesamiento de estas de código abierto, siendo actualmente una de las mejores alternativas disponibles, ver Figura 12.

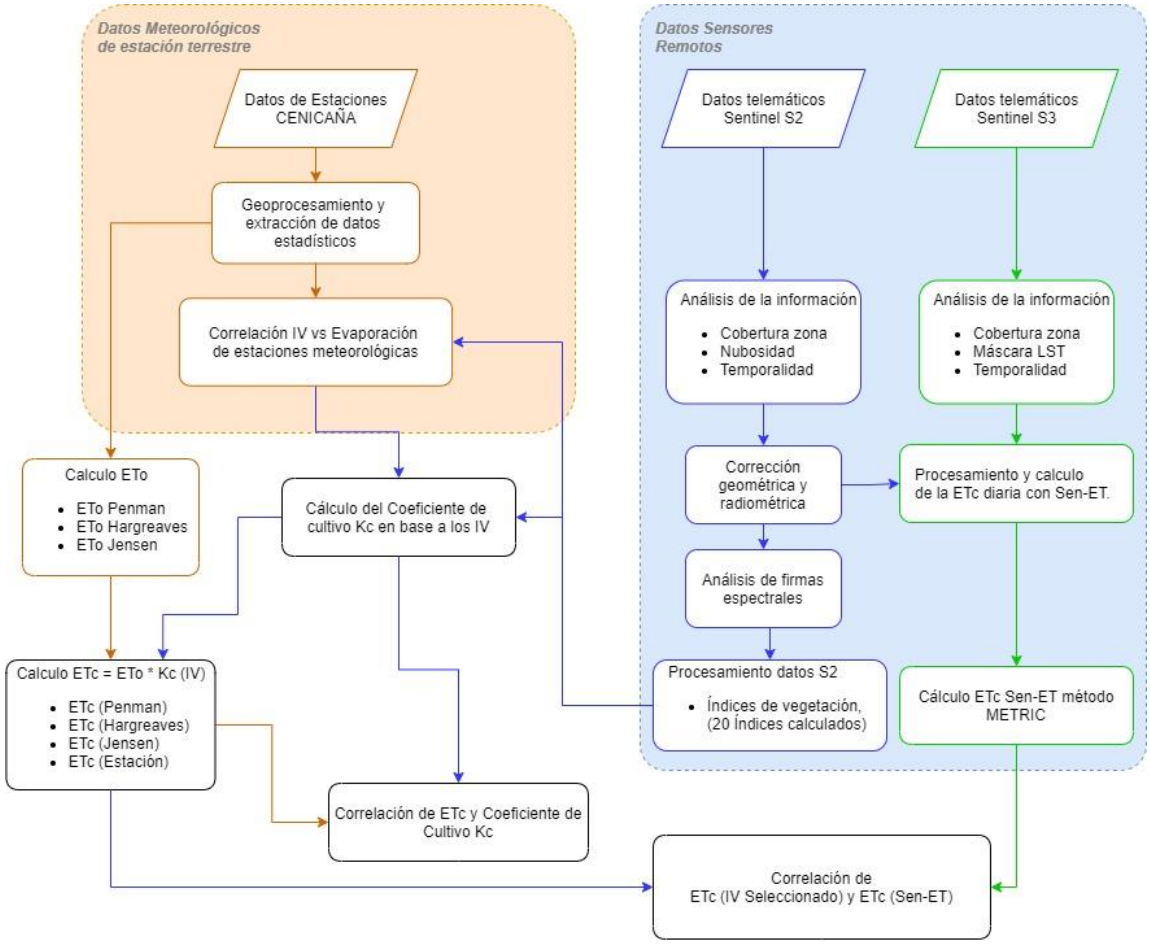


Figura 12. Metodología para el modelamiento de la Evapotranspiración de Cultivo. Fuente: Propia

En este proyecto el proceso metodológico se desarrolla con dos enfoques de desarrollo, primero se analizan y se procesan los datos de las estaciones meteorológicas, donde se realiza la estimación de la Evaporación de Referencia ETo aplicados en los modelos de Penman-Monteith, Hargreaves y Jensen. Se tiene en cuenta para el modelo Penman-Monteith, la extracción de los datos ráster sobre el pixel donde se encuentra la estación, obteniendo una coordenada geográfica, ver Tabla 3, estas coordenadas son referencia para utilizar los datos de radiación solar que tiene en cuenta la latitud y son consultadas en las tablas de referencia del modelo Penman. Por otra parte, se calculan estos métodos utilizando las variables de temperatura, la precipitación y la velocidad del viento de la zona consultada en la página del IDEAM.

En el preprocesamiento de las imágenes se utilizaron un total de 36 imágenes relativamente libres de nubes de los sensores Sentinel 2a y Sentinel 2b para el año 2019 y el primer semestre de 2020 y 16 imágenes del sensor Sentinel 3a y Sentinel 3b para el año 2019. El nivel de procesamiento de las imágenes del sensor Sentinel 2 es el L2A que son imágenes ya corregidas atmosféricamente (Louis et al, 2016) descargadas de la plataforma Open Access Hub.

Para el cubrimiento de imágenes de las estaciones de las estaciones meteorológicas de CENICAÑA, se busca dentro de los path T18NUJ para el sensor Sentinel 2 y el path 6059 en el caso de Sentinel 3, posteriormente, se define un polígono de cobertura que contenga las 20 estaciones meteorológicas utilizadas, Figura 11.

Se analizan las firmas espectrales de cultivos de caña en diferentes estados de desarrollo y diferentes periodos de tiempo, este análisis se realizó, utilizando el software QGIS 3.14 con el complemento semi-automatic classification v. 7, en el cual se crea una entrada de entrenamiento, para posteriormente, agrupar en áreas de entrenamiento (ROI) en áreas homogéneas de la imagen en las coberturas de cultivo vigorosos densificados, cultivos menos densificados y suelos

desnudos en temporada de lluvia y sequía. Posterior a esto, se obtienen las firmas espectrales ver Figura 13 y Figura 14.

Posteriormente, se realiza la combinación de bandas que realce la cobertura del cultivo por medio de Índices de Vegetación, en total se calcularon 20 IV, ver Tabla 1. Se realiza la correlación lineal simple entre cada IV y la Evaporación de la estación meteorológica (EV). De las ecuaciones de relación lineal R^2 se toman los mejores índices de vegetación NDVI, IPVI y el SAVI, este último se contempla por tener estudios anteriores donde se referencia el cultivo de caña y por tener una constante de corrección para el suelo, luego se reemplaza en la ecuación (l), (González-Dugo y Mateos, 2008). Se continúa con el cálculo de coeficiente de cultivo Kc, aplicando la ecuación (6) para el cultivo de caña.

Cabe aclarar que CENICAÑA no suministra este dato de Kc en el Meteoportal dispuesto en línea. Por lo anterior, CENICAÑA utiliza el coeficiente de cultivo estandarizado de acuerdo al documento FAO 56 en 0,7, teniendo en cuenta una irrigación constante o lo determina de manera instrumental utilizando el método de balance de agua.

De lo anterior, se obtiene la evapotranspiración de referencia ETo, de los tres métodos Penman - Monteith, Hargreaves y Jensen y el coeficiente de cultivo relacionado con los índices de vegetación de Sentinel 2. Posteriormente, se multiplica para obtener la Evapotranspiración de cultivo o real ETc y se realiza una regresión lineal simple para mirar que modelo se ajusta mejor de acuerdo a la ecuación (1).

En el segundo enfoque del proyecto, se usa el nuevo módulo de Sen-ET del software SNAP para la estimación de ETc con solo datos de las imágenes Sentinel 2 y Sentinel 3. En sus algoritmos internos realiza un remuestreo de las imágenes mejorando la resolución espacial de las imágenes

Sentinel 3 resultante. Este módulo, utiliza modelos basados en el balance energético, en este caso el METRIC que calcula la evapotranspiración real utilizando datos de sensores remotos, con bandas de onda corta y bandas térmicas. Para la investigación se usa el dato del Sentinel 3 con la banda LST.

Los resultados de estas correlaciones muestran el mejor modelo para el cálculo de ETc producto de la ETo y el coeficiente de cultivo relacionados con los IV y el modelo automatizado del módulo de Sen-ET con el modelo METRIC. Se generan las salidas gráficas resultantes de las ETc que tuvieron en cuenta los índices de vegetación NDVI, IPVI y SAVI, utilizando la calculadora raster de ArcGis 10.4.

Estas salidas gráficas y análisis se realizan tomando dos fechas, junio 2019 y marzo 2020 para evaluar los cambios en la Evapotranspiración de cultivo. Las salidas gráficas del Sen-ET, se realizaron para enero y agosto de 2019, teniendo en cuenta que el cubrimiento es diferente tomando solo 3 estaciones meteorológicas terrestres. Igualmente, se calcula el coeficiente de determinación entre el modelo propuesto de ETc (Penmant; NVDI) y ETc (Sen-ET), para analizar la relación de esas ET y su validación, ver Figura 12. Metodología para el modelamiento de la Evapotranspiración de Cultivo. Fuente: Propia.

5. Resultados

Para el análisis de resultados se describirá de manera puntual los resultados en las diferentes fases del proyecto.

5.1. Análisis de firmas espectrales e índices de vegetación.

Las firmas espectrales se tomaron de 3 parcelas cultivadas con caña de azúcar que mostraban formas definidas utilizando el software QGIS 3.14 con el complemento semi-automatic classification v.7 en los meses de abril de 2019 y de agosto de 2019, donde son las temporadas de mayor y menor precipitación respetivamente, apoyándose en la Figura 9 y Figura 10 de precipitación y temperatura de CENICAÑA.

Cabe aclarar que al no tomarse datos en campo, se puede dar una interpretación ambigua del resultado de las firmas espectrales registradas por que no se tiene la certeza del estado fenológico, las condiciones de salud del cultivo o componentes bioquímicos. En el mes de abril se muestra un comportamiento espectral característico de un cultivo con buen follaje, ya que en el espectro visible VIS (bandas 2, 3 y 4) una planta en crecimiento absorbe más luz para realizar el proceso de fotosíntesis para mantener su clorofila los cual se identifica al tener una porcentaje bajo de reflectancia, en el infrarrojo cercano IRC (bandas 5, 6, 7, 8 y 8A) y SWIR en su banda 9 (bandas 9,10,11 y 12) muestra un comportamiento con mayor reflectancia, que indica que las hojas no necesitan absorber toda esa radiación para evitar calentarse y perder agua en el proceso de evaporación. En conclusión en esta temporada con mayor precipitación estaba el cultivo en desarrollo o maduro al presentar actividad fotosintética. Por otra parte, en el mes de agosto de 2019, el comportamiento de la firma espectral varía considerablemente, esta no muestra el trazado típico de una vegetación o cultivo vigoroso, sino tiende a mostrar un comportamiento de una firma

espectral tipo suelo, lo que puede indicar varias cosas, que el cultivo se haya de alguna manera terminado que estuviera en un estado fenológico de germinación, ver Figura 13 y Figura 14.

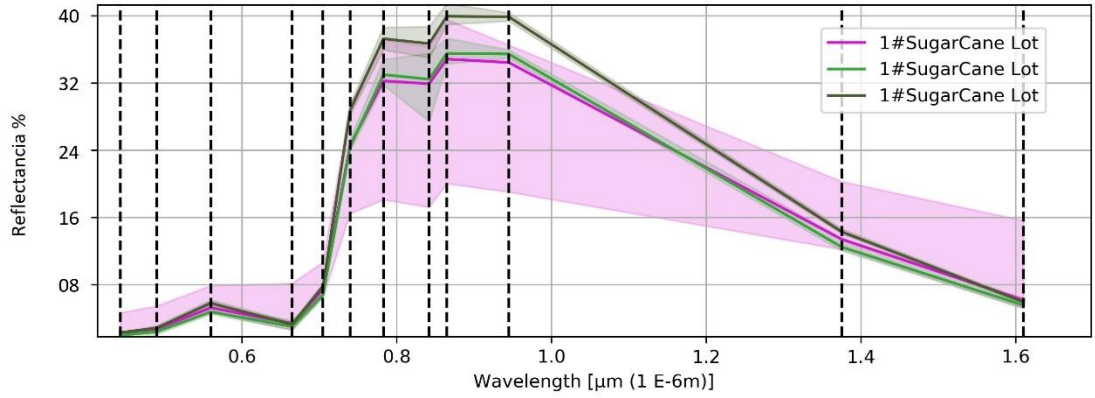


Figura 13. Respuesta espectral de tres lotes con caña de azúcar en la zona del proyecto, consulta sobre imagen Sentinel 2 de abril 2019, alta precipitación. Fuente: Elaboración Propia

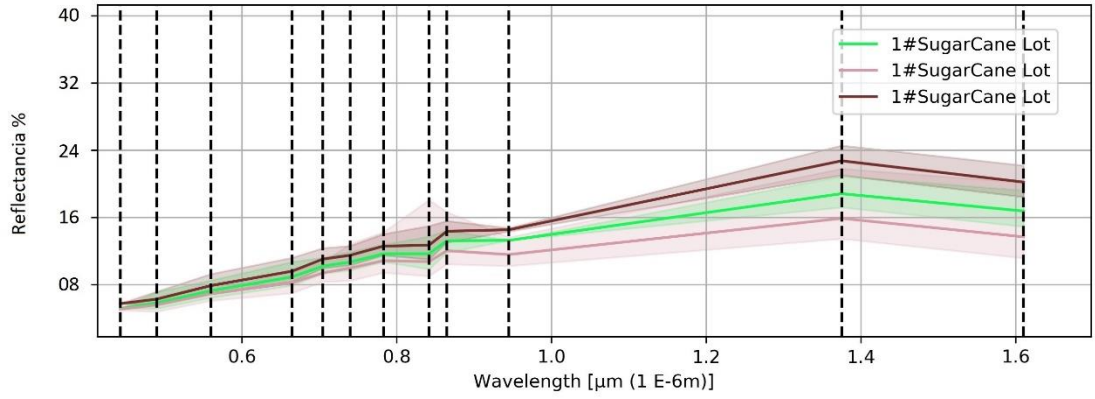
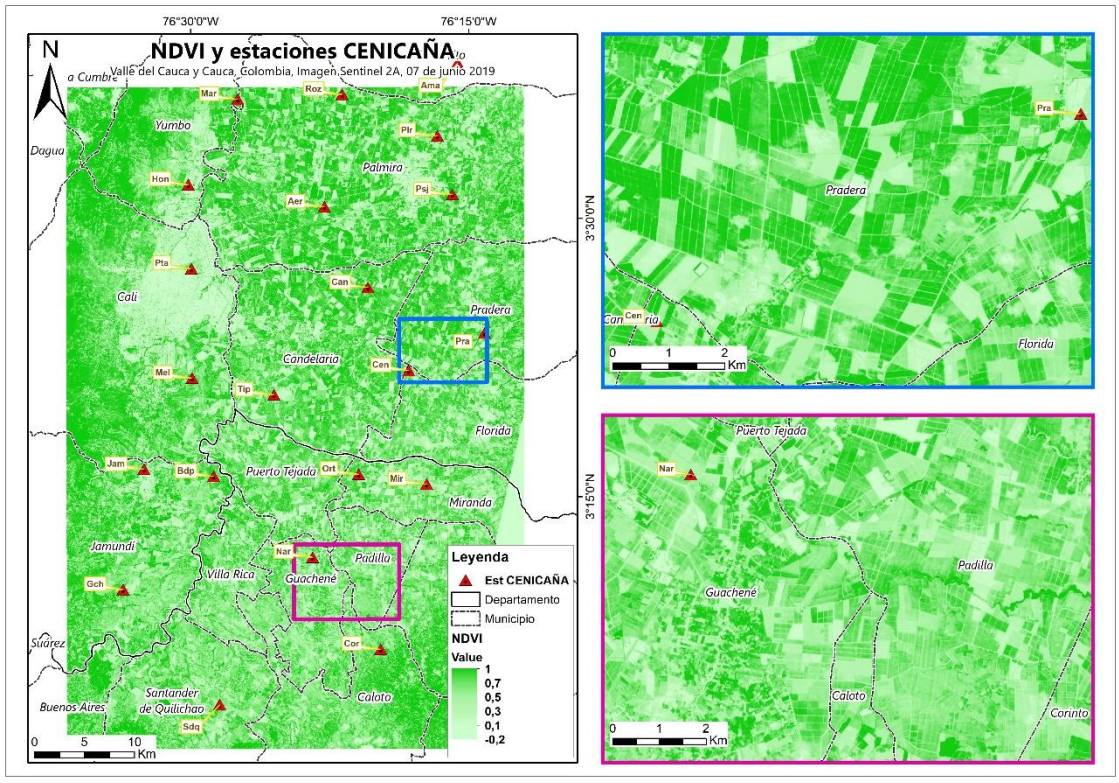
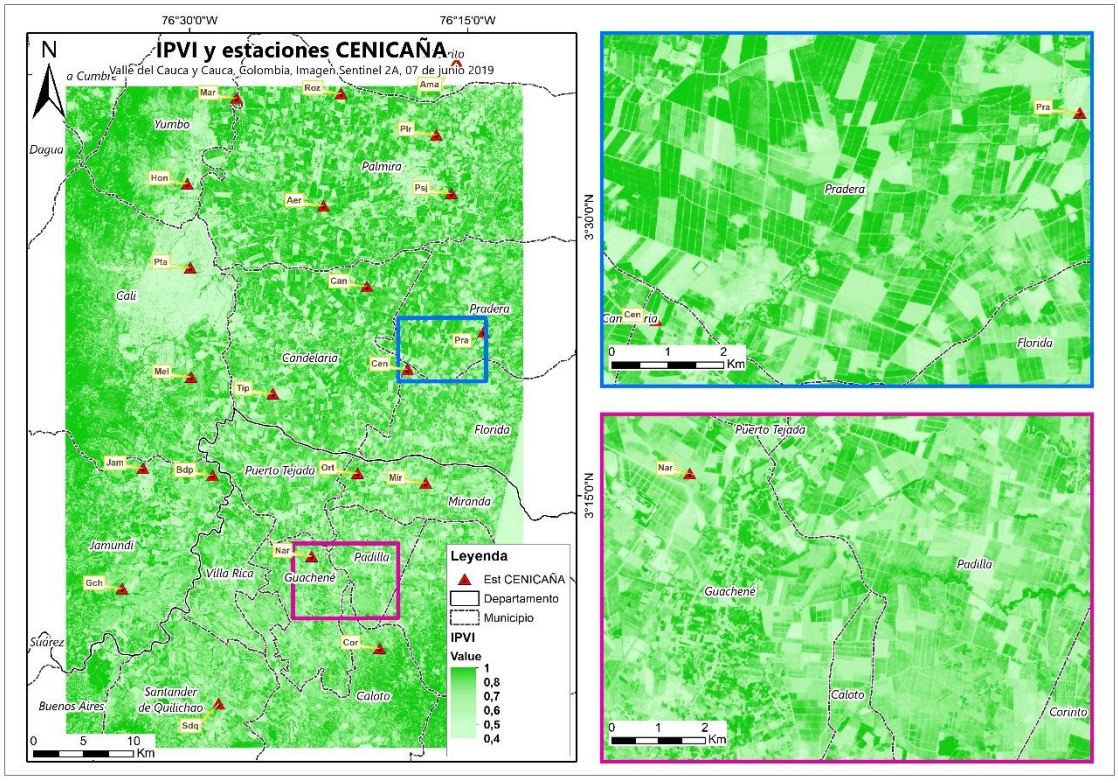


Figura 14. Respuesta espectral de tres lotes con caña de azúcar en la zona del proyecto, consulta sobre imagen Sentinel 2 de agosto 2019, baja precipitación. Fuente: Elaboración Propia

Para el cálculo de los 20 índices de vegetación se utilizó el software SNAP v7, para calcular a las imágenes los valores de IV, en la Figura 15 se selecciona una imagen Sentinel 2 de Junio 2019 donde se observan los IV: NDVI, IPVI y SAVI.


NDVI y estaciones CENICAÑA
Valle del Cauca y Cauca, Colombia, Imagen Sentinel 2A, 07 de junio 2019
N
76°30'0"W
76°15'0"W
3°30'0"N
3°15'0"N
Yumbo
Dagua
Palmira
Cali
Pradera
Candelaria
Florida
Puerto Tejada
Miranda
Jamundi
Villa Rica
Guachené
Padilla
Suárez
Buenos Aires
Santander de Quilichao
Caloto
Corinto
Leyenda
Est CENICAÑA
Departamento
Municipio
NDVI
Value
1
0,7
0,5
0,3
0,1
-0,2
0 5 10 Km
0 1 2 Km


IPVI y estaciones CENICAÑA
Valle del Cauca y Cauca, Colombia, Imagen Sentinel 2A, 07 de junio 2019
N
76°30'0"W
76°15'0"W
3°30'0"N
3°15'0"N
Yumbo
Dagua
Palmira
Cali
Pradera
Candelaria
Florida
Puerto Tejada
Miranda
Jamundi
Villa Rica
Guachené
Padilla
Suárez
Buenos Aires
Santander de Quilichao
Caloto
Corinto
Leyenda
Est CENICAÑA
Departamento
Municipio
IPVI
Value
1
0,8
0,7
0,6
0,5
0,4
0 5 10 Km
0 1 2 Km

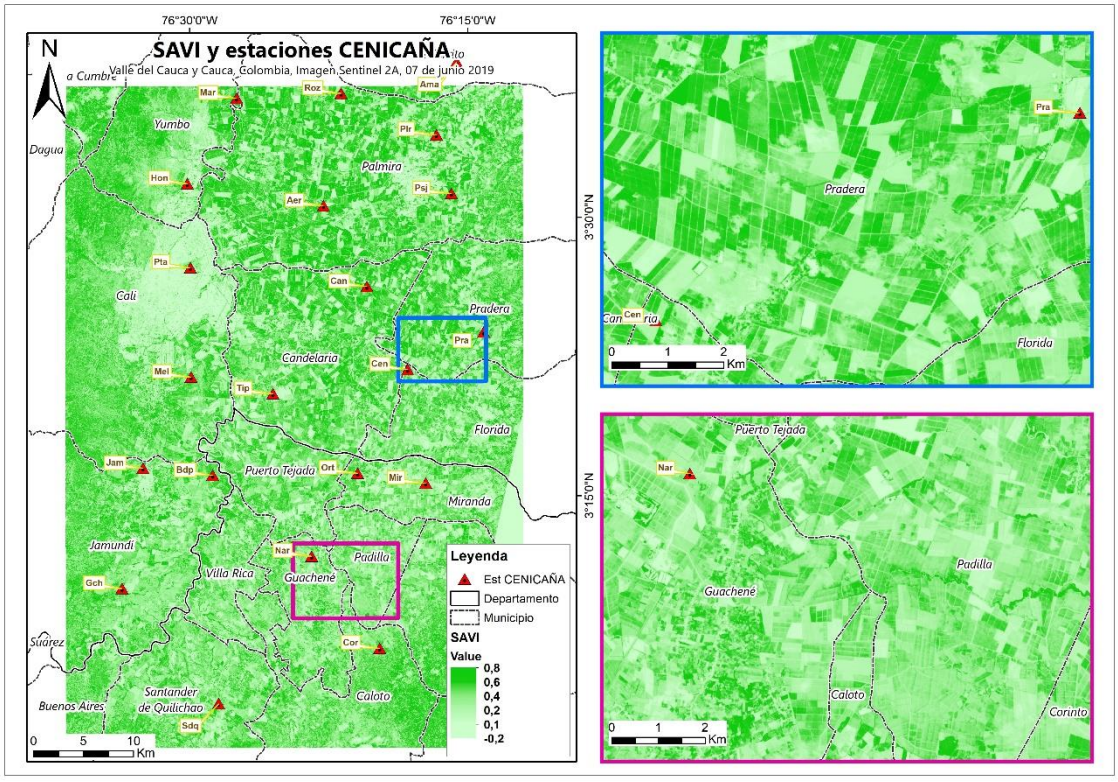


Figura 15. Salida grafica de los IV: NDVI, IPVI y SAVI para junio 2019 en la zona del proyecto. Fuente: Elaboración Propia

5.2. Correlación de índices de vegetación y evaporación de estaciones

Los modelos y gráficas de las regresiones lineales entre los 20 Índices de Vegetación y la evaporación se describen en la Figura 16, igualmente la relación lineal entre la evaporación de las estaciones y los índices de vegetación IV.

Figura 16. Regresiones Lineales entre la evaporación de las estaciones y los índices de vegetación IV basado en las imágenes Sentinel 2. El nombre del IV es mostrado sobre cada gráfico. Los puntos representan el promedio de IV para la máscara de cada estación. Cada modelo muestra la ecuación y el R^2, Fuente: Elaboracion propia

Para el cálculo de las regresiones se promedia el valor del índice para una ventana de 21 pixeles en las imágenes Sentinel 2, y se condiciona que el NDVI sea mayor a 0.15, con estas condiciones se abarca el área donde está instalado el tanque tipo A localizados junto a la estación meteorológica y de parte del área de los cultivos cercanos, que influyen en el valor de los datos de evaporación bajo el método de estimación (Allen et al., 2006). Con esta ventana se toman cultivos de caña con las mismas características y se evita tomar elementos diferentes al cultivo como cuerpos de agua, construcciones, etc. Adicionalmente, las ventanas que ofrece el software son de 5x5, 15x15, 21x21 y superiores, ver Figura 17.

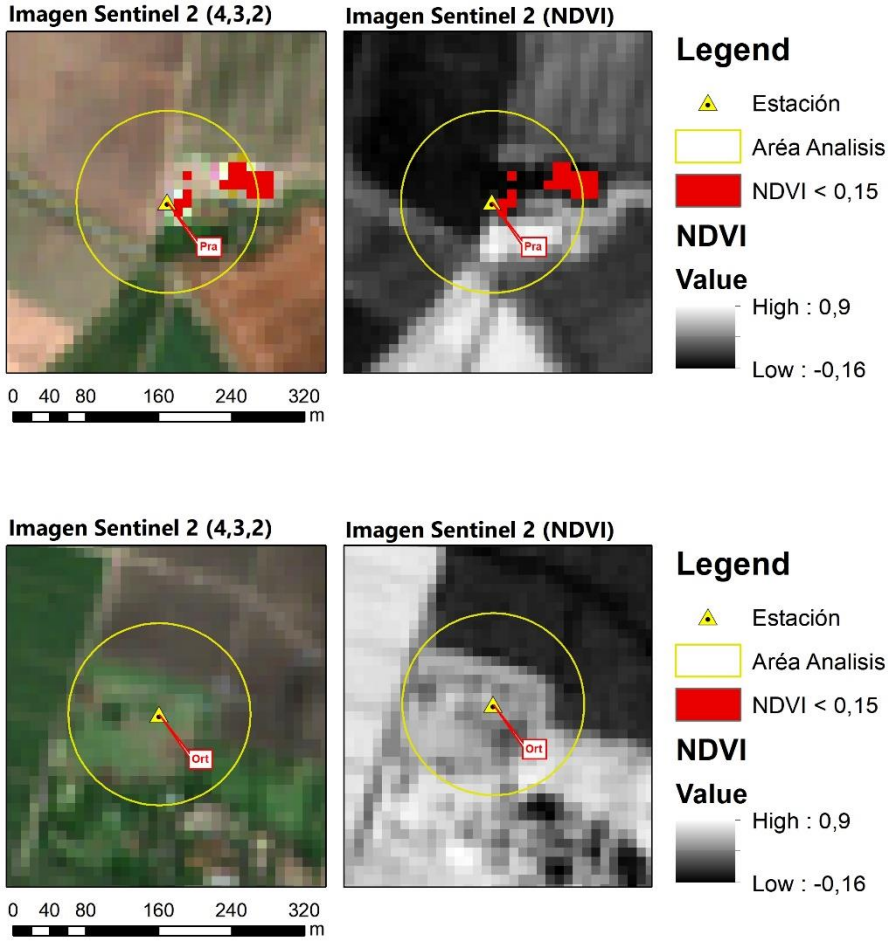


Figura 17. Muestra del área de análisis 21 piexeles, para la estación Para, para la relación de los IV

Una primera depuración de los datos se realizó en la extracción de la información de los IV, al seleccionar los datos que sean mayores a NDVI = 0.15, luego se realizaron gráficas para analizar y depurar datos atípicos, de esta manera se generan los análisis de regresión y se obtienen los datos que se describen en este proyecto.

Las mejores correlaciones de las regresiones lineales y su R^2 se dan para los IV: NDVI, IPVI, TNDVI, NDI4S, WDVI, RVI, PSSRA, SAVI, MSAVI2, GNDVI y MSAVI, que tienen R^2 superior a 0.6, que evidencia una la relación directa de los IV del sensor remoto Sentinel 2 y la evaporación de las estaciones. Estos índices utilizan las bandas del infrarrojo cercado y banda del rojo del sensor para su estimación.

El índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), ampliamente investigado en la agricultura, igualmente es el IV recomendado para cálculo de Kc, ya que permite brindar ayuda en el seguimiento de cultivos, estimación de rendimientos y de utilización racional (Reyes et al, 2019), por lo cual no es de extrañarse que en este proyecto igualmente sea el mejor relacionado con la evaporación con un R^2 de 0.6882.

El IPVI es similar al NVDI, pero en este IV no toma relevancia la resta de la banda del rojo en el numerador. Los valores oscilan entre 0 y 1, eliminado la extrañeza conceptual de los valores negativos para los índices de vegetación. Por esta razón el R^2 de 0.6882 similar al NVDI, aunque con diferente ecuación de regresión. Hay que resaltar que también la similitud es por la condición de que al NDVI, tomara datos de pixel por encima del 0,15.

El SAVI adiciona una constante para separar la reflectancia a nivel de suelo, por lo cual se toma en cuenta para el análisis y por tener estudios anteriores donde se referencia el cultivo de caña, luego se reemplaza en la ecuación (6), (González-Dugo y Mateos, 2008). Su R^2 es de 0.63.

Los modelos en los cuales se utilizaron los IV: IRECI, TSAVI, S2REP, REIP, son los menos relacionados y tienen en común que usan distintas constantes y son utilizados para resaltar o calcular otros elementos o componentes de los cultivos.

Estos resultados demuestran que los IV pueden usarse para estimar la evaporación, y tiene sentido usar los IV y relacionarlos con el índice de vegetación Kc como lo proponen otras comparaciones investigadas para este proyecto (Rozenstein et al., 2018).

Estos resultados sugieren que los IV calculados a partir de imágenes del sensor remoto Sentinel 2 tienen relación y que índices como el de vegetación, que tienen en su cálculo componentes de algunos índices como el NDVI, son predictores adecuados, este índice se usa de manera empírica en base a las tablas de la FAO (Allen et al., 2006). Este cálculo asociando ecuaciones que relacionan los IV, permite que pueda calcularse para cualquier momento, sin estar en el sitio y es una herramienta importante para el cálculo de balance hídrico de los cultivos para el cálculo de las necesidades de agua en un momento dado. Cabe recordar que aunque no se realiza un seguimiento en campo los índices de vegetación, en especial el que presenta una mejor relación con la evaporación el NDVI, tiene en cuenta estados fenológicos del cultivo de caña de azúcar, por reflejar el comportamiento de la banda visible del rojo y del infrarrojo cercano, que muestra la respuesta espectral de procesos fotosintéticos (VIS) y de la estructura interna de la hoja (NIR) (Casiano & Paz, 2018). En la figura 16, el valor del eje y corresponde a la evaporación del dato de las estaciones meteorológicas en (mm/día) y el eje x corresponde a lo IV de los 20 calculados adimensional.

Tabla 5. Relaciones IV, Kc (x, y) ordenado por R2 y su Ecuación respectiva. Fuente: Elaboración Propia

Índice Vegetación	R2	Relación
NDVI	0,69	y = 0,7389x + 5,6089
IPVI	0,69	y = 1,4778x + 4,87
TNDVI	0,68	y = 1,4456x + 4,5429
NDI4S	0,65	y = 1,2587x + 5,7163
WDVI	0,64	y = 1,4327x + 5,7834
RVI	0,64	y = 0,0568x + 5,7405
PSSRA	0,63	y = 0,0567x + 5,7398
SAVI	0,63	y = 1,1454x + 5,6119
MSAVI2	0,61	y = 1,0683x + 5,6513
GNDVI	0,61	y = 0,7159x + 5,6705
MSAVI	0,60	y = 1,2054x + 5,6344
IRECI	0,58	y = 0,5033x + 5,7638
GEMI	0,58	y = 0,9248x + 5,4205
ARVI	0,58	y = 0,7556x + 5,5914
PVI	0,48	y = 2,4434x + 5,6473
DVI	0,48	y = 1,7278x + 5,6473
MCARI	0,34	y = 3,1903x + 5,7803
S2REP	0,12	y = 0,0161x - 5,6078
REIP	0,12	y = 0,0161x - 5,6078
TSAVI	0,03	y = -0,0142x + 5,9849

Cabe aclarar que, que los coeficientes de determinación están por debajo de 0.7 (NDVI, IPVI, SAVI) lo que indica en la escala de Pearson una correlación positiva moderada. Como se indica anteriormente, se hizo una depuración de los datos atípicos o sin información, sin embargo la FAO en sus anexos 4 y 5 de la FAO56 contempla el análisis estadístico y muestra que los datos meteorológicos pueden sufrir fallas en su integridad y calidad por situaciones instrumentales (calibraciones, deterioros, obsolescencias), antrópicas (mal operador, mala disposición de datos) o cambios externos (bajas de luz, crecimiento de árboles o nuevas construcciones), donde en algunos casos para la corrección de estos se necesita contar con información local, situación que para el proyecto no se contempló (Allen et al, 2006).

5.3. Cálculo de las evapotranspiraciones de referencia ETo

Se agrupan los datos de las estaciones meteorológicas en una hoja de cálculo para aplicar las metodologías de Penman - Monteith, Hargreaves y Jensen, se eliminan los datos de las estaciones que no tienen las variables completas. Aplicando las metodologías se calculan las ecuaciones respectivas, usando los datos de radiación solar según la latitud de cada estación y temperatura, de esta forma tenemos los datos calculados de evapotranspiración de referencia (ETo) para cada estación y para cada método. En la Figura 18, se muestra la serie de tiempo de los datos efectivos utilizados para el cálculo de las evapotranspiraciones de referencia, donde se identifica que todos tienen un comportamiento en el tiempo similar, incluido el dato de evaporación. Respecto a la variable de la radiación solar, muestra similitud con los métodos.

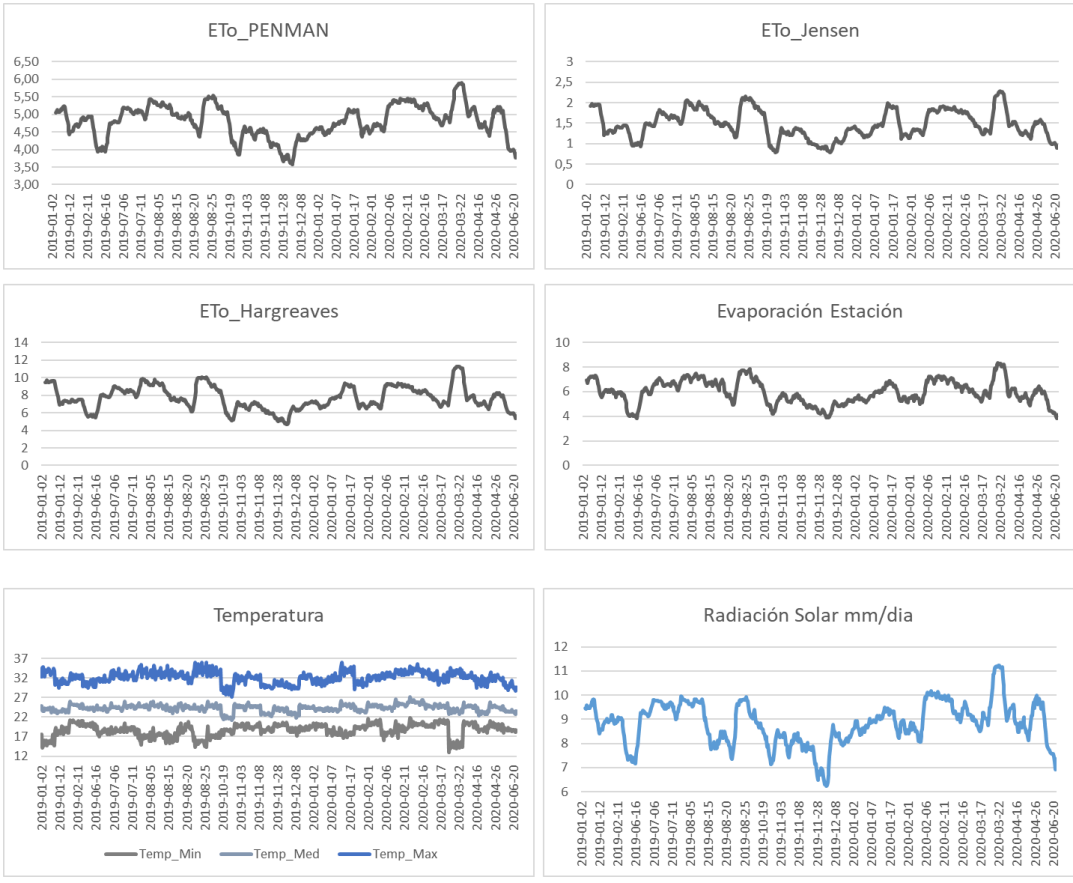


Figura 18. Gráficas del cálculo de la ETo (mm/día), Radiación Solar (mm/día) y Temperatura (°C) desde enero 2019 hasta junio de 2020, Fuente: Elaboracion propia

5.4. Cálculo del índice de cultivo Kc y evapotranspiración real o de cultivo ETc

Para el cálculo del índice de cultivo Kc, se tomaron los índices de vegetación NDVI, IPVI y SAVI, anteriormente sustentados y que presentaron un coeficiente de determinación con una relación lineal importante con la variable de evaporación. El NDVI tiene la mejor relación y por esta razón se utiliza la ecuación (6) (Calera et al., 2014). Para efectos del estudio esta misma ecuación (6) reemplazara el dato de NDVI con el de IPV y SAVI con el fin de determinar que otros índices también podrían ser utilizados. Hay que resaltar que el Kc incorpora las características del cultivo y los efectos promedios de la evaporación en el suelo (Allen et al. 2006).

La ETc se calcula multiplicando la ETo y Kc, ver ecuación (1). Al tener las ETo de Penman-Monteith, Hargreaves y Jensen y los Kc calculados con NDVI, IPVI y SAVI, se calcula las diferentes ETc. Adicionalmente se realiza el cálculo de la ETc para los datos de las estaciones utilizando la evaporación (EV) como si fuera la evapotranspiración de referencia con los respectivos Kc calculados. En la Figura 18, se muestra una relación temporal del cálculo de las diferentes ETo, evidenciando que muestran un comportamiento similar, aunque en diferentes promedios ETc.

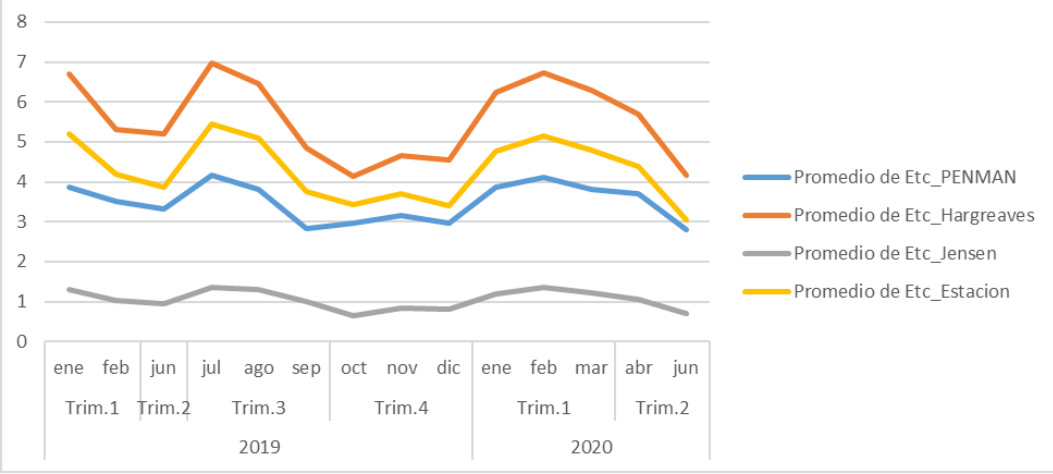


Figura 19. Serie mensual para el cálculo de la ETc (mm/dia) de los métodos investigados y las estaciones de CENICAÑA, Fuente: Elaboración Propia

Calculado las diferentes ETc, realizamos regresión lineal de cada una de ellas respecto al Kc calculado de los diferentes IV (NVDI, IPVI y SAVI), para determinar los mejores coeficientes de determinación R^2 y su respectiva ecuación de correlación lineal, ver Figura 20. En la Tabla 6, se muestra los R^2 y las ecuaciones de correlación lineal resultantes.

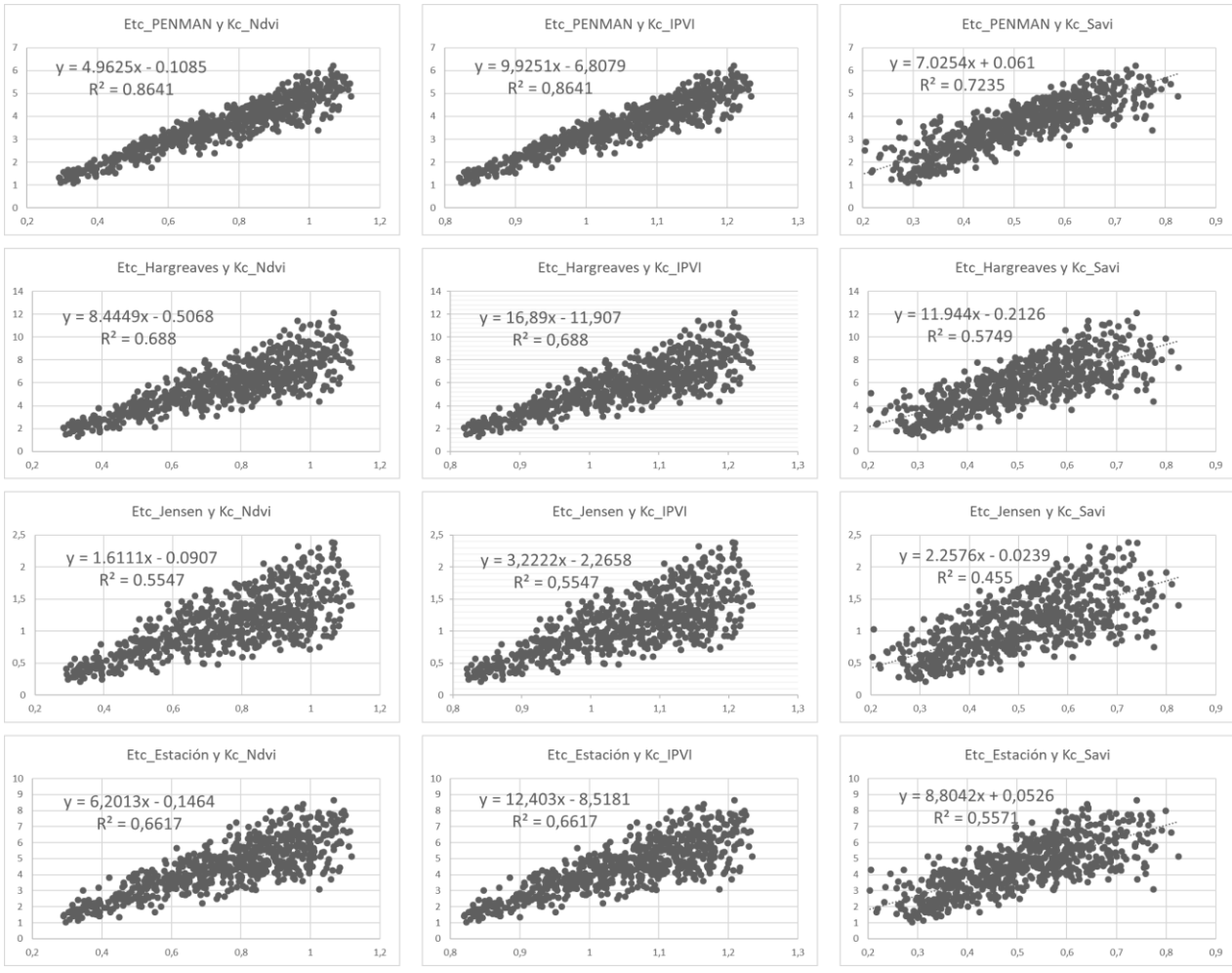


Figura 20. Regresión lineal del ETc Kc_IV de los diferentes métodos analizados, el nombre de la ETc y el Kc basado en el Índice de Vegetación esta sobre cada gráfica, Fuente: Elaboración Propia

Tabla 6. Relaciones IV ETc, (x,y) seleccionados para el proyecto y su Ecuación respectiva. Fuente: Elaboración Propia

Etc	Ndvi		IPVI		Savi	
	R2	Relación	R2	Relación	R2	Relación
Etc_Penman	0,86	y = 4.9625x - 0.1085	0,86	y = 9,9251x - 6,8079	0,72	y = 7.0254x + 0.061
Etc_Hargreaves	0,69	y = 8.4449x - 0.5068	0,69	y = 16,89x - 11,907	0,57	y = 11.944x - 0.2126
Etc_Jensen	0,55	y = 1.6111x - 0.0907	0,55	y = 3,2222x - 2,2658	0,46	y = 2.2576x - 0.0239
Etc_Estación	0,66	y = 6,2013x - 0,1464	0,66	y = 12,403x - 8,5181	0,56	y = 8,8042x + 0,0526

El coeficiente de Cultivo basado en el índice de vegetación NDVI y el método de evapotranspiración Penman-Mothein tienen la mejor relación con un R^2 de 0.86 seguido por el ETc por el método de Hargreaves con un R^2 de 0.688, la ETc producto de la evaporación de las estaciones y el Kc basado en el NDVI, que con un R^2 de 0.66. Esto demuestra que las ETc están relacionados con el coeficiente de cultivo producto de los índices de vegetación a partir de sensores remotos, también podemos rescatar que esta ecuación final del cálculo ETc es un cálculo híbrido entre los datos de las estaciones meteorológicas y los datos de los sensores remotos, para el caso, Sentinel 2.

El modelo con mejor resultado, respecto a su índice de vegetación como al modelo de evaporación de referencia es el Modelo ETc utilizando Penman- Monteith y Kc con el NDVI, con una ecuación de correlación lineal Y = 4.9625X – 0.1085, donde Y es la ETc y X es el Kc, este modelo podrá ser usado en caso de que no existan datos directos de las estaciones meteorológicas o cuando se cuente con alguna de las variables ETo, Kc o IV.

El Modelo resultante para la estimación de la ETc producto de esta investigación es la siguiente:

$$ETc_{(Penman,NDVI)} = 4.9625 * Kc_{(NDVI)} + 0.1085 \quad (7)$$

Para graficar los resultados se tomaron dos fechas diferentes, junio 2019 y marzo de 2020, para observar los cambios en temporada de lluvia y sequía y el crecimiento de los cultivos. Aunque se tiene ya un modelo resultante, se quiere exponer los otros índices de vegetación, ya que muestran comportamientos similares con el NDVI y pueden igualmente ser utilizados en estos procesos.

La ETc calculados con NDVI y IPVI, son similares, para la fecha de junio 2019, se muestran cultivos con más pérdida de agua y otros más irrigados, igualmente ocurre con los cultivos de marzo 2020. Cabe resaltar que los sectores en la imagen muestran dos tipos de sectorización en el

área, destacando dos tipos de cobertura. La primera cobertura en el municipio de Pradera y al sur una zona con cultivos y otros elementos incluyendo el casco urbano del municipio de Guachené, que muestra menos densidad vegetal, pero toma el análisis como si fueran zonas de mediana evapotranspiración.

Una diferencia entre el la ETc con NDVI, SAVI y IPVI, es que los sectores en rojo que corresponden a suelos desnudos secos, muestran una mayor densificación en ETc_{SAVI}, tal vez por la variable de corrección de suelo.

Cabe aclarar, que este cálculo de ETc, se realiza para el momento de la toma de la imagen con los datos del día arrojados por las estaciones terrestres, por esta razón se realiza una extrapolación de los datos para poder abarcar el rango durante todo el día. Las ETc van de 0 a 5 en mm/día, donde los valores próximos a cero son representados en color rojo, indicando suelos desnudos y secos que no tienen humedad, por lo cual no tienen ninguna pérdida evaporativa. Los valores más próximos a 5 en colores violáceos, indican cultivos que tienen alta pérdida de agua, tanto en la evaporación del suelo, como en la transpiración de las plantas. Los valores intermedios corresponden a una ETc media.

Hay que tener en cuenta que, en el periodo de maduración de la caña de azúcar es importante su correcto crecimiento, manejo del cultivo, absorción de nutrientes, tener en cuenta las condiciones climáticas, para poder acumular la sacarosa, .si existe un déficit de agua comenzaría este proceso de maduración antes de su etapa óptima para la acumulación de azúcares. (Aguilar, 2015).

En las Figura 21, Figura 22 y Figura 23 se muestran las imágenes ráster calculadas con las relaciones estimando los ETc basados en los IV NDVI, IPVI y SAVI.

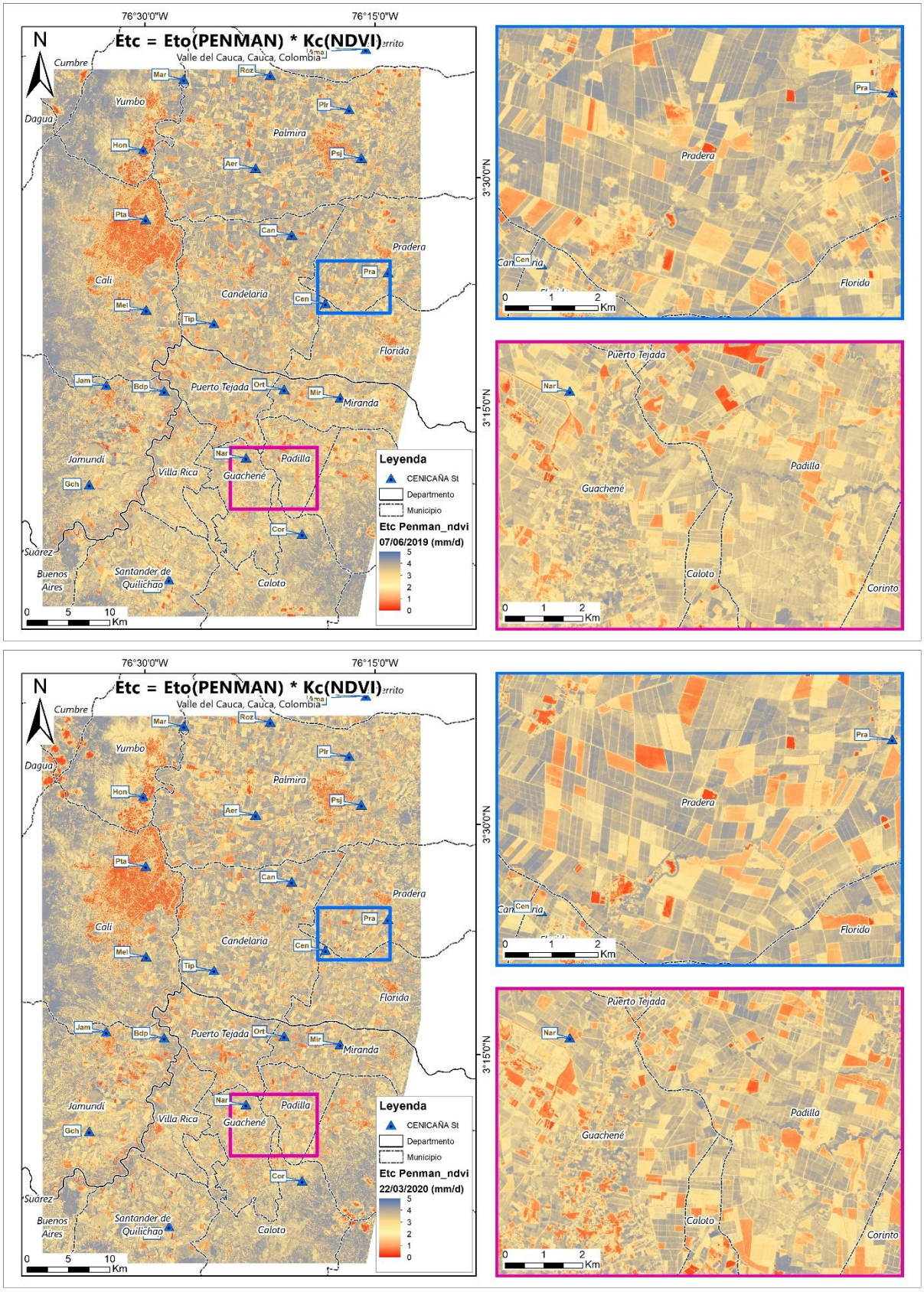


Figura 21. Calculo ETc basado en NDVI para junio 2019 (arriba) y marzo2020 (abajo). Fuente: Elaboración Propia.

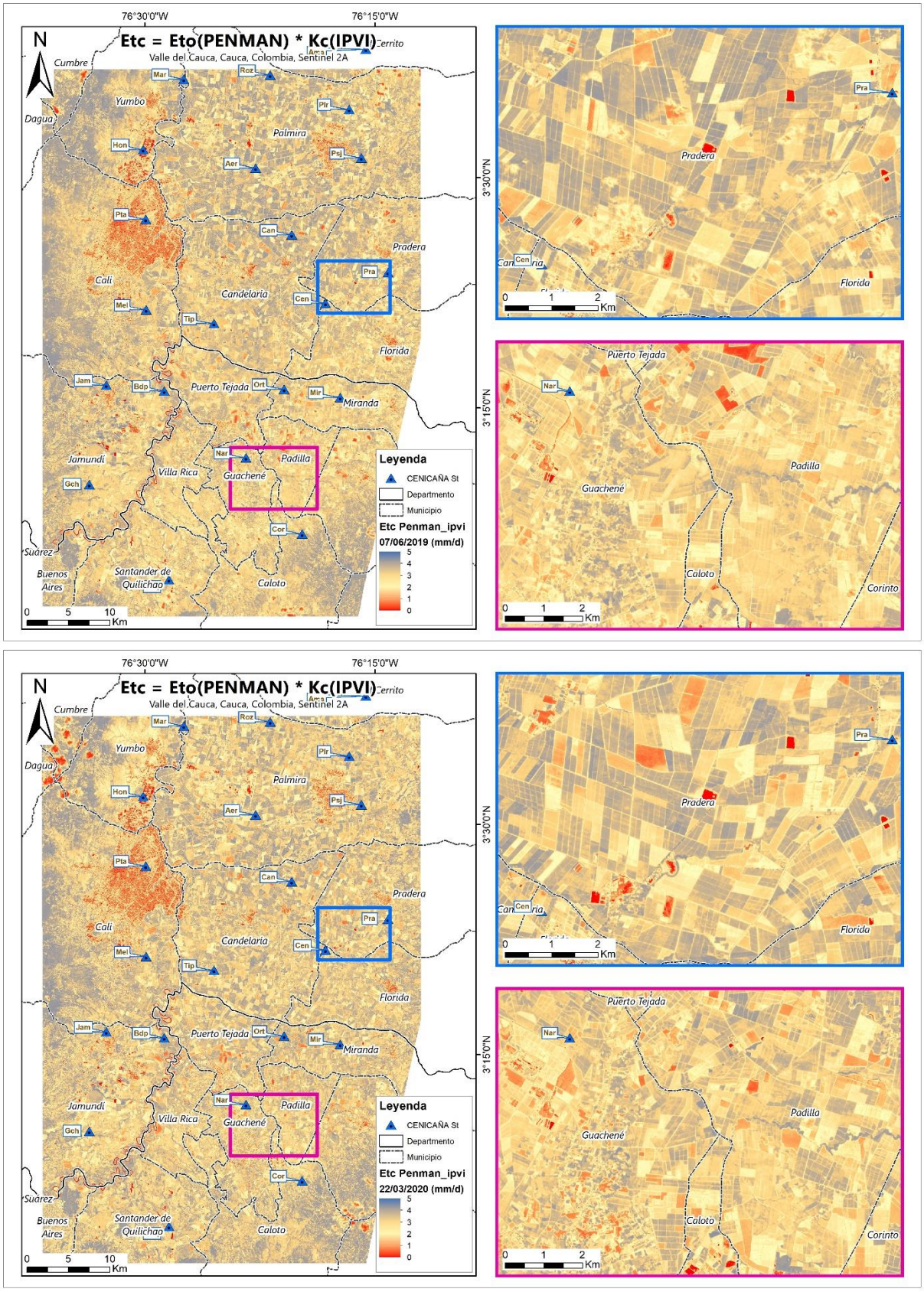


Figura 22. Calculo ETc basado en IPVI para junio 2019 (arriba) y marzo2020 (abajo). Fuente: Elaboración Propia.

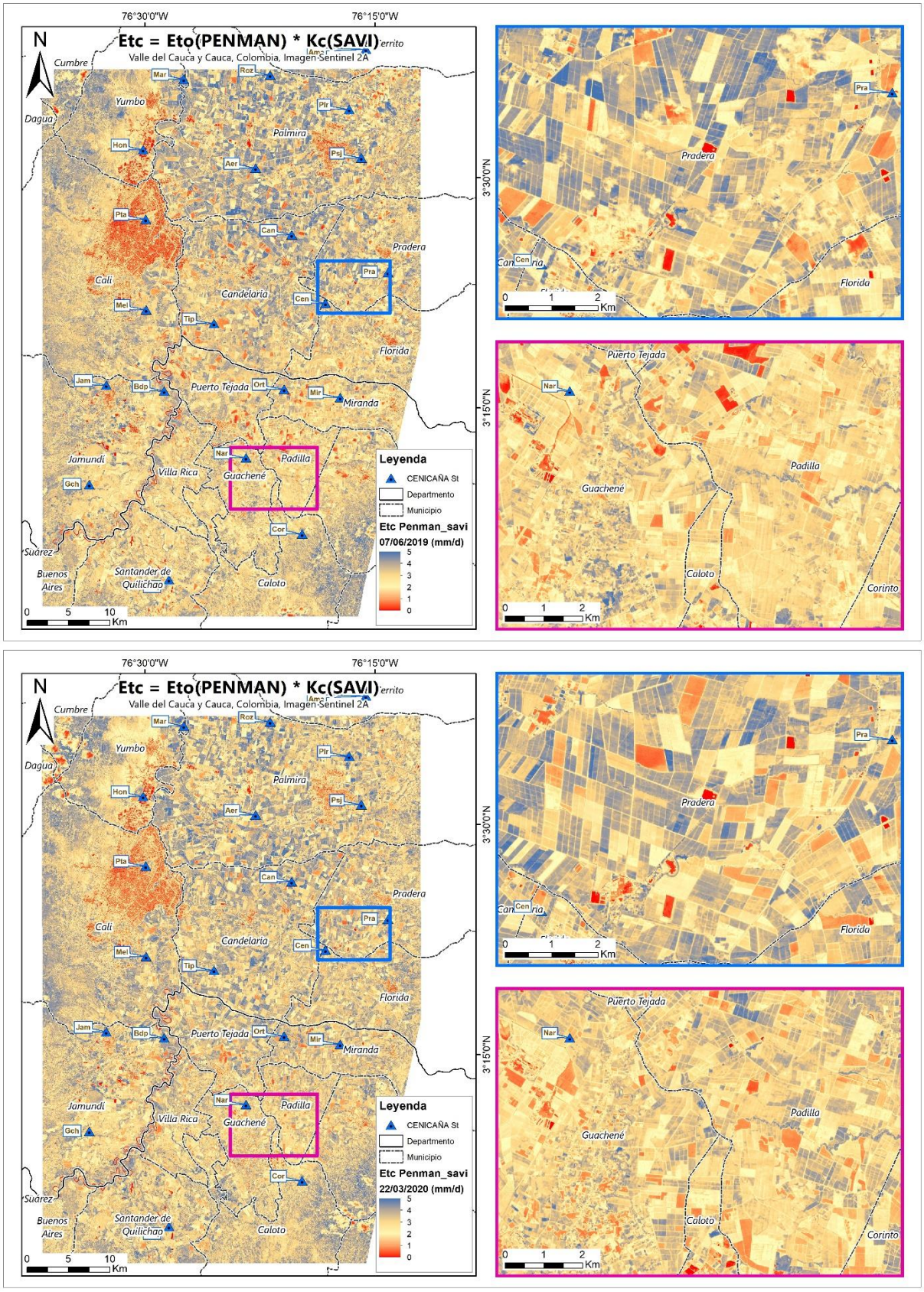


Figura 23. Calculo ETc basado en SAVI para junio 2019 (arriba) y marzo2020 (abajo). Fuente: Elaboración Propia.

5.5. Cálculo de la evapotranspiración diaria a partir del método METRIC

En este apartado vamos a determinar el cálculo de la evapotranspiración diaria basado en el método METRIC. Como se mencionó anteriormente, el método SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land), en el cual es basado el METRIC, tiene la bondad para calcular la ETc sobre áreas extensas, estimando movimientos en el balance de energía mediante el uso de la teledetección (Bastiaanssen et al, 2005).

Para su estimación utilizamos una extensión instalada en el software SNAP 7.0, que utiliza imágenes de los sensores Sentinel 2 y Sentinel 3 que, gracias a los datos del espectro visible e infrarrojo cercano del primero, y de la banda térmica Land Surface Temperature (LST) de segundo sensor, calcula la evapotranspiración diaria de manera semiautomática. Para la evaluación de resultados se utilizan las imágenes Sentinel 3 que cubren 3 estaciones meteorológicas para 20 imágenes aleatoriamente. Se determinan así 14 puntos donde tenemos datos válidos de evapotranspiración por el método METRIC y se correlacionan con el modelo de propuesto Penman NDVI. En la Figura 24, se observa la relación de los datos de evapotranspiración diaria por METRIC contra modelo de propuesto Penman con NDVI, mediante un modelo de regresión lineal simple, donde el R^2 de 0,5804, mostrando una relación media de los datos, no siendo un indicador determinante para establecer una posición respecto a la relación de los datos

Para generar las salidas gráficas de la ETc_{METRIC}, se utilizaron dos fechas, enero 2019 y agosto 2019, donde se visualiza para el mes de enero 2019 se ve que en sector norte muestra una diferente interpretación de la ETc, con ETc_{METRIC}, se ve la zona con más evapotranspiración, mientras ETc propuesto muestra menos evapotranspiración, lo demás se ve acorde entre los modelos. Para las imágenes de ETc del mes de agosto de 2019 con el modelo METRIC de Sen-ET también se ve menos evapotranspiración en la zona central, mientras en el modelo propuesto se ve el sector más

evapotranspirado. Los suelos desnudos secos también se ven rojos en los valores circundantes a cero, pero no corresponden con las dos imágenes de ETc.

En la Figura 25 y Figura 26 resultado de evapotranspiración para dos fechas, enero 2019 y agosto 2019, con Sen-ET y modelo de propuesto Penman con NDVI.

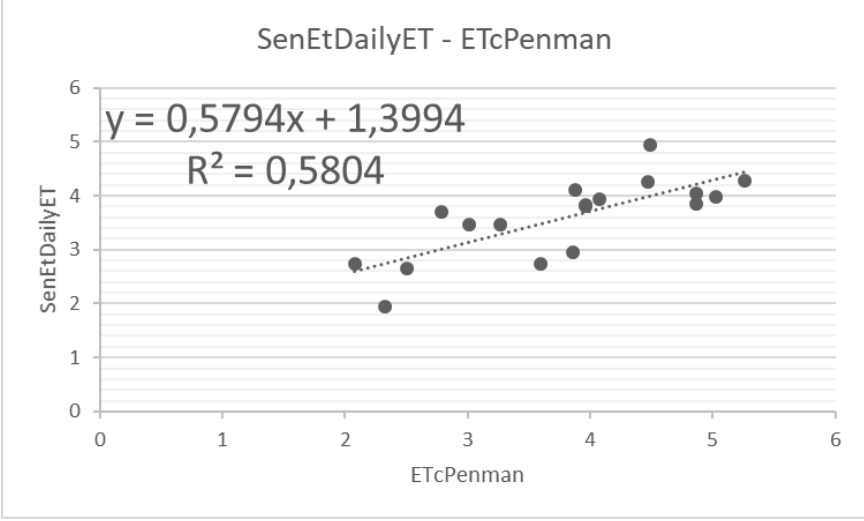


Figura 24. Relación entre el Modelo ETc Penman,-NDVI y ETc METRIC (mm/día), Fuente: Elaboración propia

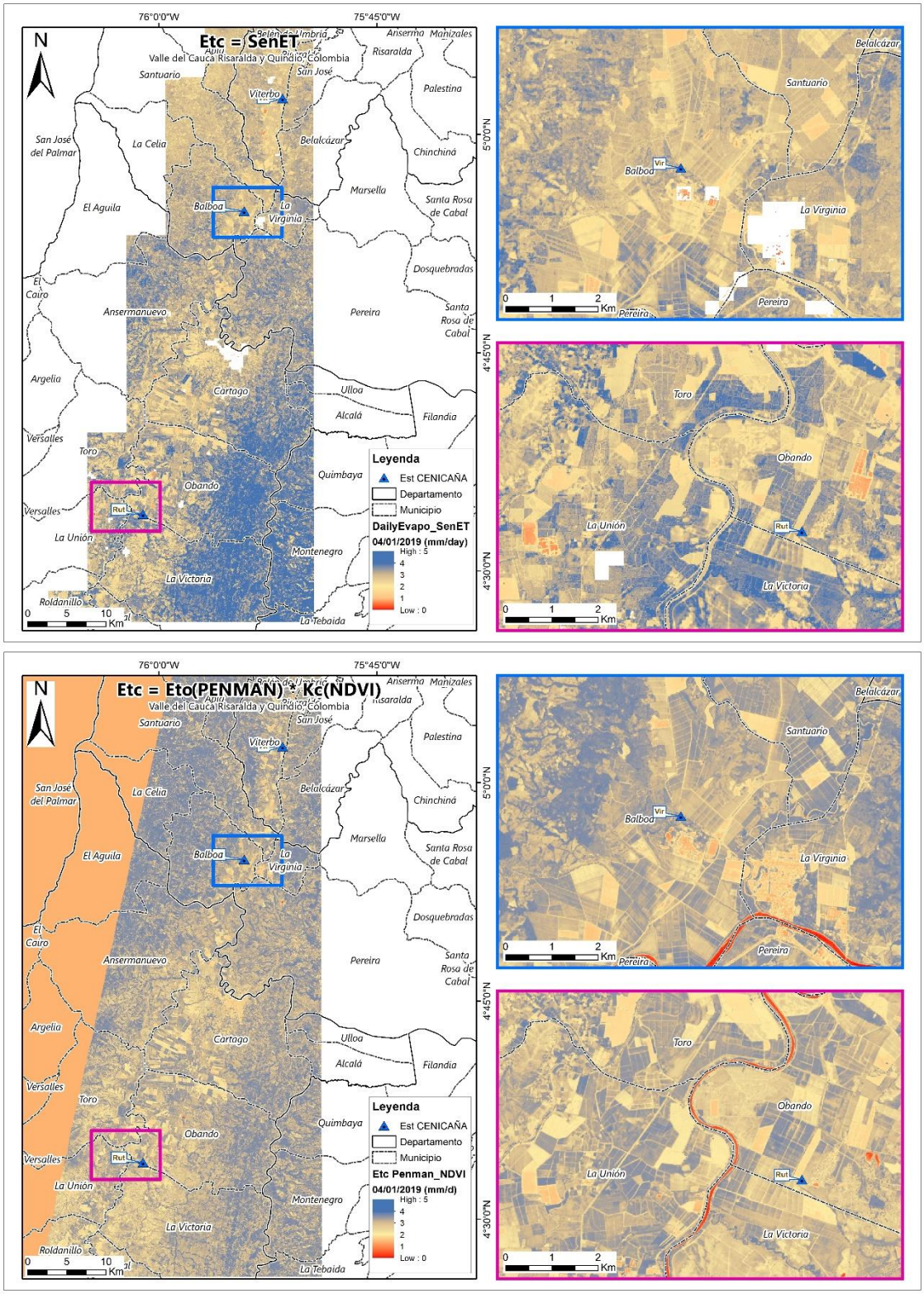


Figura 25. Comparación Calculo ETc basado en Sen-ET (arriba) y ETc NDVI Penman (abajo), para enero 2019. Fuente: Elaboración Propia.

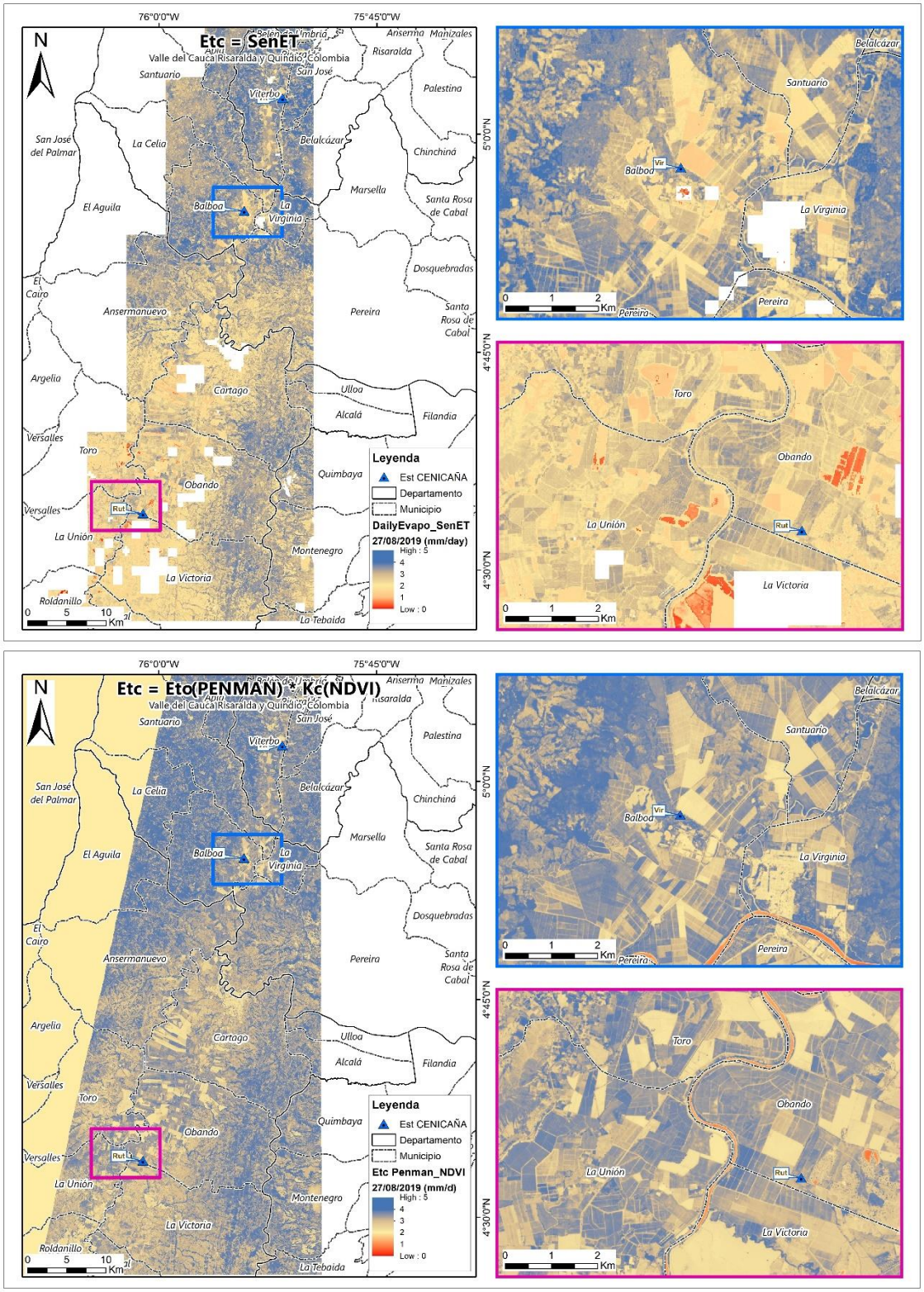


Figura 26. Comparación Calculo ETc basado en Sen-ET (arriba) y ETc NDVI Penman (abajo), para agosto 2019. Fuente: Elaboración Propia.

6. Conclusiones

La importancia de este proyecto radica en encontrar el mejor modelo para evaluar la evapotranspiración de cultivo o real involucrando variables de los sensores remotos Sentinel 2a/2b y Sentinel 3a/3b de dos formas, la primera en utilizar el índice de vegetación para calcular el coeficiente de cultivo Kc indispensable en cálculo de la evapotranspiración de los cultivos de caña de asociados de CENICAÑA, utilizando la evaporación potencial calculada con los datos de las estaciones meteorológicas terrestres, lo segundo utilizar el modelo utilizado en el módulo Sen-ET del software SNAP v.7, desarrollado por la Agencia Espacial Europea -ESA y realizar cálculo directo de la evapotranspiración.

De acuerdo a los resultados de este proyecto, a continuación, se va a detallar las conclusiones obtenidas mediante el desarrollo de este trabajo en cada uno de sus objetivos planteados:

La regresión lineal de 20 diferentes índices de vegetación junto con los datos de evaporación EV de las estaciones meteorológicas arrojaron con mejor relación entre las dos variables, el Índice Diferencial de Vegetación Normalizado – NDVI con un coeficiente de determinación $R^2 = 0.6882$ y el IPVI con $R^2 = 0.6882$, igualmente se escoge el Índice de Vegetación Ajustado al Suelo – SAVI con un coeficiente de determinación $R^2 = 0.633$, por tener esa corrección de suelo y estar relacionado para el estudio de evapotranspiración en otras investigaciones .

La estimación de las evapotranspiraciones de referencia ETo a partir de los datos de los métodos de Penman Monteith, Hargreaves y Jensen con los datos de 20 estaciones meteorológicas, incluyendo los de Evaporación suministradas por CENICAÑA, muestra que el mejor método es el de Penmant- Monteith, como ha sido corroborado e indicado por la FAO para el cálculo de ETo en cultivos.

Para la estimación de la ETc, selecciona como modelo propuesto para esta investigación, la ETc donde se utilizó el ETo Penmant Monteith y el coeficiente de cultivo Kc relacionado con el NDVI, con un coeficiente de determinación $R^2 = 0.8641$.

$$ETc_{(Penman,NDVI)} = 4.9625 * Kc_{(NDVI)} + 0.1085$$

La ETc del modelo METRIC utilizando por la herramienta Sent-ET muestra el resultado utilizando solo datos de los sensores Sentinel 2 y Sentinel 3. Al correlacionar los datos de evapotranspiración de este modelo y el modelo propuesto para la investigación, muestra un ajuste medio en la relación de los datos $R^2 = 0.5804$, esto se evidencia en que la Evapotranspiración generada de los dos modelos puede tener diferente interpretación de los datos.

Recomendaciones y Trabajo Futuro

Respecto a la información publicada de estaciones meteorológicas del país, en especial las que se utilizan en los cultivos, se recomienda publicar el coeficiente de cultivo Kc, es bueno disponer de esta información para futuros estudios y evaluación de otros métodos.

La herramienta Sen-ET, aunque está en continuo desarrollo, debe trabajar en algoritmos que se puedan regionalizar o puntualizar geográficamente como la clasificación Corine Land Cover, ya que toma una CLC mundial. Se recomienda socializar entre el gremio de los agricultores o tomadores de decisiones, ya que no se conoce implementación o estudios en Colombia. Adicionalmente, el Sen-ET sirve de apoyo para el seguimiento de cultivos tecnificados o como herramienta para generar datos de ET que no cuenten con estaciones terrestres meteorológicas.

Actualmente este dato del Kc, no está disponible en el Meteoportal que dispone la organización.

Se aconseja no solo utilizar el NDVI para el cálculo del Kc, sino evaluar otros índices que destaquen otros elementos o componentes de las plantas para complementar la información de evapotranspiración de cultivos.

Para trabajo futuro se necesita evaluación, investigación, modelación y seguimiento de nuevos métodos de estimación de la ET, a nivel de planta con ayuda de los UAV's, ya que este nivel de precisión permite separar el suelo del dosel, analizar necesidad hídrica por árbol, incentivar la investigación incorporando nuevos algoritmos para el procesamiento de los datos, proporcionar estadísticas más precisas sobre irrigación y necesidad de agua en cultivos, casi en tiempo real.

Bibliografía

Aguilar, (2015). Ficha Técnica del cultivo de Caña de Azúcar. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación de Estados Unidos Mexicanos.

Alegría, (2016). Texto Básico para profesional en ingeniería Forestal, en el área de fisiología vegetal. Universidad Nacional de la Amazonía Peruana. Perú-

Allen, R., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., (2006). Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements, FAO. ed, Irrigation and Drainage Paper No. 56. FAO, Rome, Italy.

Allen, R., Pruitt, W.O., Wright, J.L., Howell, T.A., Ventura, F., Snyder, R., Itenfisu, D., Steduto, P., Berengena, J., Yrisarry, J.B., Smith, M., Pereira, L.S., Raes, D., Perrier, A., Alves, I., Walter, I., Elliott, R., (2006). A recommendation on standardized surface resistance for hourly calculation of reference ETO by the FAO56 Penman-Monteith method. Agricultural Water Management 81, 1-22. doi:10.1016/j.agwat.2005.03.007

Bastiaanssen, W. G. M.; Noordman, E. J. M.; Pelgrum, H.; Davids, G.; Thoreson, B. P. and Allen, R. G. (2005). SEBAL model with remotely sensed data to improve water resources management under actual field conditions. J. Irrig. Drain. Eng. ASCE 131(1):85-93.

Baret, F., Guyot, G., Major, D.J., 1989. Crop biomass evaluation using radiometric measurements. Photogrammetria 43, 241–256.

Blackburn, G.A., (1998). Quantifying chlorophylls and caroteniods at leaf and canopy scales. Remote Sens. Environ. 66, 273–285.

Calera, A., Isidro Campos, Garrido Jesús., (2016). Determinación de las necesidades de agua y de riego mediante estaciones meteorológicas y series temporales de imágenes multiespectrales.

Calera, Alfonso; Campos, Isidro; Osann, Anna; D'Urso, Guido; Menenti, Massimo. (2017). Remote Sensing for Crop Water Management: From ET Modelling to Services for the End Users Sensors 17, no. 5: 1104.

Camacho-Velasco, Ariolfo, Vargas-García, César Augusto, Rojas-Morales, Fernando Antonio, Castillo-Castelblanco, Sergio Fernando, & Arguello-Fuentes, Henry. (2015). Aplicaciones y retos del sensado remoto hiperespectral en la geología colombiana. Revista Facultad de Ingeniería, 24(40), 17-29. Retrieved March 14, 2021.

Casiano, Marcos, & Paz, Fernando. (2018). Índice espectral de vegetación para la caracterización simultánea de la floración y crecimiento vegetal. Terra Latinoamericana, 36(2), 169-181. https://doi.org/10.28940/terra.v36i2.249.

CENICAÑA. (2013). Agua: un recurso que compromete a ingenios y cultivadores. Santiago de Cali: Servicio de Cooperación Técnica y Transferencia de Tecnología - Cenicaña.

CENICAÑA, (2019). Informe Anual 2019.

Clevers, J.G.P.W., (1989). Application of a weighted infrared-red vegetation index for estimating leaf Area index by correcting for soil moisture. Remote Sens. Environ. 29, 25–37.

Chuvieco, E. (1995). Fundamentos de teledetección espacial. Madrid, España: EDICIONES RIALP, S.A.

Chuvieco, E. (2010). Teledetección Ambiental. España: Ariel Planeta S.A.

Crippen, R.E., (1990). Calculating the vegetation index faster. Remote Sensing. Environment. 34, 71-73

Dash, J., Curran, P.J. (2007). Evaluation of the MERIS terrestrial chlorophyll index (MTCI). Adv. Space Res. 39, 100–104.

Daughtry, C.S.T., Walthall, C.L., Kim, M.S., de Colstoun, E.B., McMurtrey, J.E., (2000). Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance. Remote Sens. Environ. 74, 229–239.

Deering, D., (1975). Measuring forage production of grazing units from Landsat MSS data. Proceedings of 10th International Symposium on Remote Sensing of Environment 1975, 1169–1178.

Delegido, J., Verrelst, J., Alonso, L., Moreno, J., (2011). Evaluation of Sentinel-2 red-edge bands for empirical estimation of green LAI and chlorophyll content. Sensors 11, 7063–7081.

Díaz Freddy, et al. (2014). Aproximación a los sistemas de percepción remota en satélites pequeños. Bogotá, Colombia.: Universidad Sergio Arboleda. Escuela de Ingeniería.

Donlon C, Berruti B, Buongiorno A, Ferreira M.-H. Féménias P, Frerick P, Goryl,. Klein U, Laur, C. Mavrocordatos, J. Nieke, H. Rebhan, B. Seitz, J. Stroede, R. Sciarra, The Global Monitoring for Environment and Security (GMES) Sentinel-3 mission, Remote Sensing of Environment, Volume 120, (2012), Pages 37-57, ISSN 0034-4257, https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.07.024.

ESA. (2014). Las misiones Sentinel / Spain / ESA in your country / ESA. Retrieved April 15, 2019, from https://www.esa.int/esl/ESA_in_your_country/Spain/Las_misiones_Sentinel.

ESA. (2015). SENTINEL-2 User Handbook. Retrieved from https://sentinel.esa.int/documents/247904/685211/Sentinel-2_User_Handbook.

FAO. (2009). Como alimentar al mundo 2050, Foro de expertos de Alto nivel. Rome 12 – 13 octubre 2009.

Ford, A. L. & Reedman, R. A. (2005). Física universitaria: con física moderna (vol. 2). México D. F.: Pearson Educación.

Franco, J. M. (1995). La teledetección en el seguimiento de los fenómenos naturales. Climatología y Desertificación. Valencia, España: S.A. ECIR.

Frampton, W.J., Dash, J., Watmough, G., Milton, E.J., (2013). Evaluating the capabilities of Sentinel-2 for quantitative estimation of biophysical variables in vegetation. ISPRS J. Photogramm. Remote Sens. 82, 83–92.

Gitelson, A.A., Merzlyak, M.N., (1998). Remote sensing of chlorophyll concentration in higher plant leaves. Adv. Space Res. 22, 689–692.

Gilabert, M.A., González-Piqueras, J., Martínez, B., (2010). Theory and applications of vegetation indices, en: Maselli, F., Menenti, M., Brivio, P.A. (Eds.), Remote Sensing Optical Observations of Vegetation Properties. pp. 1-43.

Glenn, E.P., Huete, A.R., Nagler, P.L., Hirschboeck, K.K., Brown, P., (2007). Integrating remote sensing and ground methods to estimate evapotranspiration. Critical Reviews in Plant Sciences 26, 139-168. doi:10.1080/07352680701402503.

González-Dugo, M.P. & Mateos, L., (2008). "Spectral vegetation indices for benchmarking water productivity of irrigated cotton and sugarbeet crops," Agricultural Water Management, Elsevier, vol. 95(1), pp 48-58.

Guyot, G., Baret, F., Major, D., (1988). High spectral resolution: determination of spectral shifts between the red and the near infrared. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. 11.

Guzinski, Radoslaw; Nieto, Hector; Sandholt, Inge; Karamitilios, Georgios. (2020). "Modelling High-Resolution Actual Evapotranspiration through Sentinel-2 and Sentinel-3 Data Fusion" Remote Sens. 12, no. 9: 1433.

Hargreaves, G., & Samani, Z. (1982). Estimating potential evapotranspiration. American society of civil engineers , 223-230.

Heilman, J.L., Heilman, W.E., Moore, D.G., (1982). Evaluating the crop coefficient using spectral reflectance. Agronomy Journal 74, 967-971.

Huete, A.R., (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). Remote Sens. Environ. 25, 295–309.

Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E.P., Gao, X., Ferreira, L.G., (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. Remote Sens. Environ. 83, pp 195–213.

Gómez & Cadena, (2018). Validación de las fórmulas de evapotranspiración de referencia (ETo) para Colombia 2018. Nota Técnica del IDEAM-METEO/002.

González, Arturo & Kjaersgaard, Jeppe & Trooien, Todd & Hay, Christopher & Ahiablame, Laurent. (2018). Estimation of Crop Evapotranspiration Using Satellite Remote Sensing-Based Vegetation Index. Advances in Meteorology. 2018. 1-12. 10.1155/2018/4525021.

Jaramillo R., A, (2006). Evapotranspiración de referencia en la región Andina de Colombia. Cenicafé.

Jensen, M.E. y Haise, H.R. (1963). Estimating evapotranspiration from solar radiation. J.Irrig. and Drain. Div., ASCE, 89:15-41.

Jensen, M.E.; Burman, R.D.; Allen, R.G. (1990) Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements; FAO: Rome,Italy; Volume 1.

Kaufman, Y.J., Tanre, D., (1992). Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS. Geosci. Remote Sens. 30, 261–270.

Ke, Yinghai; Im, Jungho; Park, Seonyoung; Gong, Huili. (2016). Downscaling of MODIS One Kilometer Evapotranspiration Using Landsat-8 Data and Machine Learning Approaches Remote Sens. 8, no. 3: 215.

Liang, S. (2004). Quantitative remote sensing of land surfaces. Wiley and Sons, Hoboken, NY, USA.

Marini, F., Santamaría, M., Oricchio, P., Di Bella, C., & Basualdo, A. (2017). Estimation of real evapotranspiration (ETR) and potential evapotranspiration (ETP) in the southwest of the Buenos Aires Province (Argentina) using MODIS images. Revista de Teledetección, 0(48), 29-41. Doi: https://doi.org/10.4995/raet.2017.6743 .

Martínez-Beltrán, M. A. Osann Jochum, A. Calera & J. Meliá (2009) Multisensor comparison of NDVI for a semi-arid environment in Spain, International Journal of Remote Sensing, 30:5, 1355-1384, DOI: 10.1080/01431160802509025

Martínez M., L. J. (2017). Relationship between crop nutritional status, spectral measurements and Sentinel 2 images. Agronomía Colombiana, 35(2), 205-215. https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v35n2.62875

McElrone, A.J., Choat, B., Gambetta, G.A., Brodersen, C.R., (2013). Water Uptake and Transport in Vascular Plants [WWW Document]. Nature Education Knowledge.

Melton, F.S., Johnson, L.F., Lund, C.P., Pierce, L.L., Michaelis, A.R., Hiatt, S.H., Guzman, A., Adhikari, D.D., Purdy, A.J., Rosevelt, C., Votava, P., Trout, T.J., Temesgen, B., Frame, K., Sheffner, E.J., Nemani, R.R., (2012). Satellite irrigation management support with the terrestrial observation and prediction system: A framework for integration of satellite and surface observations to support improvements in agricultural water resource management. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing 5, 1709-1721. doi:10.1109/JSTARS.2012.2214474

Mu, Q., Zhao, M., Running, S.W., (2011). Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm. Remote Sensing of Environment 115, 1781-1800. doi:10.1016/j.rse.2011.02.019.

Nhamo, Luxon; Magidi, James; Nyamugama, Adolph; Clulow, Alistair D.; Sibanda, Mbulisi; Chimonyo, Vimbayi G.P.; Mabhaudhi, Tafadzwanashe. (2020). "Prospects of Improving Agricultural and Water Productivity through Unmanned Aerial Vehicles" Agriculture 10, no. 7: 256.

Niu, Haoyu; Hollenbeck, Derek; Zhao, Tiebiao; Wang, Dong; Chen, YangQuan. (2020). "Evapotranspiration Estimation with Small UAVs in Precision Agriculture" Sensors 20, no. 22: 6427.

Nouri, Hamideh; Glenn, Edward P.; Beecham, Simon; Chavoshi Boroujeni, Sattar; Sutton, Paul; Alaghmand, Sina; Noori, Behnaz; Nagler, Pamela. (2016). Comparing Three Approaches of Evapotranspiration Estimation in Mixed Urban Vegetation: Field-Based, Remote Sensing-Based and Observational-Based Methods. Remote Sens. 8, no. 6: 492.

ONU, "Resolución A/RES/70/1 Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible", 25 de noviembre de (2015). http://www.un.org/es/comun/docs/?symbol=A/RES/70/1.

Ortega Farias, S. O., Calderón, R., Acevedo, C., & Fuentes, S. (1999). Estimación de la evapotranspiración real diaria de un cultivo de tomates usando la ecuación de Penman-Monteith. Ciencia e investigación agraria, 91-96.

Pearson, R.L., Miller, L.D., 1972. Remote mapping of standing crop biomass for estimation of the productivity of the shortgrass prairie. Remote Sens. Environ. VIII, 1355.

Penman, H.L.H., (1948). Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences 193, 120-145.

Pinty, B., Verstraete, M., (1992). GEMI: a non-linear index to monitor global vegetation from satellites. Plant Ecol. 101, 15–20.

Qi, J., Chehbouni, A., Huete, A.R., Kerr, Y.H., Sorooshian, S., (1994). A modified soil adjusted vegetation index. Remote Sens. Environ. 48, 119–126.

Guzinski, & Héctor, (2019). Evaluating the feasibility of using Sentinel-2 and Sentinel-3 satellites for high-resolution evapotranspiration estimations, Remote Sensing of Environment, Volume 221, 2019, Pages 157-172, ISSN 0034-4257, https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.11.019.

Reyes González, Arturo & Kjaersgaard, Jeppe & Trooien, Todd & Hay, Christopher & Ahiablame, Laurent. (2018). Estimation of Crop Evapotranspiration Using Satellite Remote Sensing-Based Vegetation Index. Advances in Meteorology. 2018. 1-12. 10.1155/2018/4525021.

Reyes González, Arturo, Reta Sánchez, David G., Sánchez Duarte, Juan I., Ochoa Martínez, Esmeralda, Rodríguez Hernández, Karla, & Preciado Rangel, Pablo. (2019). Estimación de la evapotranspiración de maíz forrajero apoyada con sensores remotos y mediciones in situ. Terra Latinoamericana, 37(3), 279-290. https://doi.org/10.28940/terra.v37i3.485

Richardson, A.J., Wiegand, C., (1977). Distinguishing vegetation from soil background information. Photogramm. Eng. Remote Sens. 43, 1541–1552.

Rivas, R., & Caselles, V. (2003). La ecuación de Penman-Monteith para su uso en teledetección. Revista de Teledetección, 65-72.

Rozenstein, O., Haymanna,, N., (2018). Estimating cotton water consumption using a time series of Sentinel-2 imagery.

Salgado, R.; Mateos, Luciano., (2019). Evaluación de métodos para el cálculo de la evapotranspiración de los cultivos con vistas a la evaluación del desempeño de distritos de riego.

Sharma, Devaki Nandan & Tare, Vinod. (2018). Evapotranspiration estimation using SSEBop method with sentinel -2 and Landsat-8 data set. Xlii-5. 563-566. 10.5194/isprs-archives-XLII-5-563-2018.

Sobrino, J. A. (2000). Teledetección. Valencia, España: Universidad de Valencia.

Thales Alenia Space France, (2018), ESA Sentinel-2 Products Specification Document, p 36-37.

Thornthwaite, C.C.W., (1948). An approach toward a rational classification of climate.

Tucker, C.J., (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. Remote Sens. Environ. 8, 127–150.

Uribe, D. A., Lozano Arango, J. G., & Martínez Arboleda, J. S. (2012). Una mirada a la agricultura de Colombia desde su Huella Hídrica. Bogota: WWF.

Villegas, Henry, (2008). Introducción a la Percepción Remota y sus Aplicaciones Geológicas. Ministerio de Minas y Energía. Servicio Geológico Colombiano.

Villodre, C. (2019). Estimación de la evapotranspiración y el estrés hídrico en la dehesa a alta resolución temporal y espacial mediante teledetección.