



---

# **COLEGIO DE POSTGRADUADOS**

**INSTITUCION DE ENSEÑANZA E INVESTIGACION EN CIENCIAS  
AGRÍCOLAS**

**CAMPUS MONTECILLO**

**POSTGRADO DE HIDROCIENCIAS**

## **ESTIMACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN A PARTIR DE IMÁGENES SATELITALES**

**ANA LILIA AGUILAR GARCÍA**

**T E S I S**

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL**

**PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**MAESTRA EN CIENCIAS**

**MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MEXICO**

**2018**

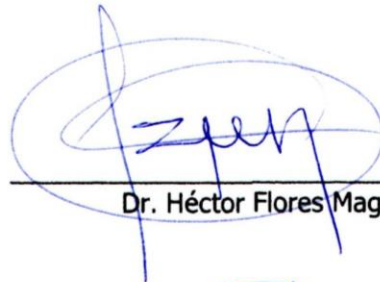
---

La presente tesis titulada: **ESTIMACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN A PARTIR DE IMÁGENES SATELITALES** realizada por la alumna: **ANA LILIA AGUILAR GARCÍA** bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS  
HIDROCIENCIAS

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO



Dr. Héctor Flores Magdaleno

ASESOR



M.C. Guillermo Crespo Pichardo

ASESORA



Dra. Ma. Isabel Marín Sosa

Montecillo, Texcoco, Estado de México, mayo de 2018

# ESTIMACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN A PARTIR DE IMÁGENES SATELITALES

Ana Lilia Aguilar García, M.C.  
Colegio de Postgraduados, 2018

## RESUMEN

Evapotranspiración (ET) es el segundo componente más grande del ciclo del agua; más del 60% de la precipitación en la Tierra es regresada a la atmósfera a través de ella. MOD16 representa una alternativa de información de ET, a escala regional, sin embargo no se cuenta con elementos para la toma de decisiones acerca de su uso en México. El principal objetivo fue evaluar el desempeño del producto MOD16A2, comparándolo con mediciones puntuales de covarianza de vórtices (EC), a fin de determinar las limitaciones e incertidumbres de la ET estimada. Se utilizaron tres parámetros de comparación: error (RMSE), sesgo (BIAS) e índice de concordancia (d), en cinco sitios del noroeste de México, dos en cultivo de trigo y tres en matorrales, y un sexto en el estado de Veracruz, sobre una plantación de café. Se compararon los valores de ET promedio diario ( $\text{mm}\cdot\text{día}^{-1}$ ) y la suma mensual ( $\text{mm}\cdot\text{mes}^{-1}$ ). Se encontró buena correlación de MOD16 con EC en los seis sitios. Se obtuvo un modelo lineal de ajuste de MOD16 a escala regional, para las condiciones climáticas de los sitios estudiados. Sin embargo, es necesario evaluar MOD16 en otros ecosistemas naturales y cultivos, para poder recomendar su uso a nivel nacional.

**Palabras clave:** MOD16, covarianza de vórtices, evapotranspiración, trigo, matorrales, plantación de café

# ESTIMATION OF EVAPOTRANSPIRATION FROM SATELLITE IMAGES

Ana Lilia Aguilar García, M.C.

Colegio de Postgraduados, 2018

## ABSTRACT

Evapotranspiration (ET) is the second largest component of the water cycle; more than 60% of the precipitation on Earth is returned to the atmosphere through it. MOD16 represents an information alternative to ET, at a regional scale, however, there are no elements to make decisions about its use in Mexico. The main objective was to evaluate the performance of the product MOD16A2, comparing it with punctual measurements of eddy covariance (EC), in order to determine the limitations and uncertainties of the estimated ET. Three comparison parameters were used: error (RMSE), bias (BIAS) and concordance index (d), in five sites in northwestern Mexico, two in wheat cultivation and three in thickets, and one-sixth in the state of Veracruz, on a coffee plantation. The values of average daily ET ( $\text{mm} \cdot \text{day}^{-1}$ ) and the monthly sum ( $\text{mm} \cdot \text{month}^{-1}$ ) were compared. A good correlation of MOD16 with CD was found in all six sites. A linear adjustment model of MOD16 was obtained at a regional scale, for the climatic conditions of the studied sites. However, it is necessary to evaluate MOD16 in other natural ecosystems and crops, in order to recommend its use at the national level.

**Keywords:** MOD16, Eddy Covariance, evapotranspiration, wheat, shrublands, coffee plantation

## DEDICATORIA

A Jehová mi Dios, porque de Él, por Él y para Él son todas las cosas y se ha placido en concederme finalizar este proyecto, pues hasta aquí me ha sostenido.

A mis padres, por ser los mejores ejemplos de trabajo, esfuerzo y constancia, de no darse nunca por vencido, por haber dado todo para que yo esté en este punto de mi formación académica y de la vida, aunque tuvieran que sacrificar cosas para sí mismos.

A mis hermanos y hermanas, por el apoyo incondicional en todo momento, por abrirme las puertas de su casa y ser tan generosos conmigo. Definitivamente he visto el amor de Dios a través de sus vidas.

A mis sobrinas y sobrinos, desde el más pequeño hasta la princesa más grande, por motivarme a ser mejor cada día, porque sé que me observan y anhelo que me vean como un ejemplo en manera de vivir y que se aseguren de que mayores cosas pueden lograr.

A mi abuela, quien me motiva a ser misericordiosa y me recuerda siempre de dónde vengo.

A los que partieron inesperadamente, recordándome lo efímero de esta vida, y motivándome a vivir plenamente. Los llevo en el corazón por siempre.

A mi familia espiritual, Pastores, líderes y todos mis hermanos en la Fé, adultos, jóvenes y adolescentes que he conocido en mi andar, que me sostienen con su oración eficaz. A las mujeres esforzadas que me guían por el camino de Dios y me motivan a crecer.

A mis amigos, por compartir conmigo parte de su vida, con su tiempo, su alegría, viajes, sueños y proyectos. Porque estoy segura de contar con su apoyo antes de que lo pida.

Sin su presencia en mi vida, llegar a este punto no sería lo mismo, por ello les dedico este logro y reitero mi más profundo agradecimiento.

Ana L. A.G

## AGRADECIMIENTOS

A la Comisión Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el financiamiento de mi formación académica, a través del programa de Becas Nacionales y Beca Mixta en el extranjero.

Al Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, especialmente al Postgrado en Hidrociencias. A todos los profesores y trabajadores que hicieron de mi estancia lo mejor para mi desarrollo profesional.

Especial agradecimiento a los profesores que guiaron el desarrollo de este proyecto. Al Dr. Héctor Flores Magdaleno, al M.C. Guillermo Crespo Pichardo y a la Dra. Ma Isabel Marín Sosa, por sus invaluable aportaciones profesionales y su motivación a finalizar con excelencia.

Al Dr. Isidro Campos y al Dr. Alfonso Calera, por compartir su experiencia y conocimiento, durante mi estancia en el Instituto de Desarrollo Regional de la Universidad Castilla la Mancha.

Ana L. A.G

## INDICE GENERAL

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	4
2.1	General.....	4
2.2	Particulares.....	4
<b>3</b>	<b>HIPÓTESIS</b> .....	4
<b>4</b>	<b>REVISIÓN DE LITERATURA</b> .....	5
4.1	Evapotranspiración.....	5
4.1.1	Pérdida por interceptación.....	5
4.1.2	Evaporación.....	5
4.1.3	Transpiración.....	6
4.2	Medición y/o estimación.....	6
4.3	Métodos puntuales.....	7
4.3.1	Lisímetro.....	7
4.3.2	Escintilómetro.....	8
4.3.3	Relación de Balance de Energía de Bowen (BREB).....	9
4.3.4	Penman Monteith.....	10
4.3.5	Covarianza de vórtices.....	11
4.4	Métodos de sensores remotos (RS).....	13
4.4.1	Métodos de Balance de Energía (SEB, por siglas en inglés).....	13
4.4.2	Métodos de índices de vegetación.....	16
4.4.3	Métodos de Priestley-Taylor.....	18
4.4.4	Algoritmo MOD16.....	19
4.5	Antecedentes.....	29
<b>5</b>	<b>MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	33
5.1	Estimación de ET mediante el algoritmo MOD16.....	33
5.1.1	Datos de entrada.....	33
5.1.2	Procesamiento de la información.....	40
5.1.3	Validación de la ET estimada.....	41
5.2	Sitios de Covarianza de vórtices.....	42
5.3	Datos Covarianza de vórtices.....	45
5.4	Datos MOD16.....	46

5.5	Análisis comparativo MOD16 contra EC .....	47
5.6	Generación de productos espaciales.....	48
<b>6</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>50</b>
6.1	Estimación de la ET mediante el algoritmo MOD16.....	50
6.2	Validación de la ET Estimada.....	52
6.3	Comparación de pares de datos.....	53
6.3.1	Evapotranspiración ( $\text{mm}\cdot\text{dia}^{-1}$ ).....	53
6.3.2	Evapotranspiración ( $\text{mm}\cdot\text{mes}^{-1}$ ).....	57
6.4	Análisis de regresión.....	60
6.4.1	Evapotranspiración ( $\text{mm}\cdot\text{dia}^{-1}$ ).....	60
6.4.2	Evapotranspiración ( $\text{mm}\cdot\text{mes}^{-1}$ ).....	62
6.5	Generación de productos espaciales.....	64
<b>7</b>	<b>DISCUSIÓN</b> .....	<b>68</b>
<b>8</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	<b>72</b>
<b>9</b>	<b>LITERATURA CITADA</b> .....	<b>74</b>
<b>10</b>	<b>ANEXOS</b> .....	<b>82</b>

## INDICE DE CUADROS

<b>Cuadro 4.1.</b>	Parámetros para estimación de la presión atmosférica.....	26
<b>Cuadro 5.1.</b>	Sitios de estudio .....	42
<b>Cuadro 6.1.</b>	Clases de ET ( $\text{mm}\cdot\text{dia}^{-1}$ ) para reclasificación.....	51
<b>Cuadro 6.2.</b>	Estadísticos de correlación de imágenes de satélite .....	53
<b>Cuadro 6.3.</b>	Evaluación del desempeño de MOD16 en relación con EC ( $\text{mm}\cdot\text{dia}^{-1}$ ) .....	55
<b>Cuadro 6.4.</b>	Evaluación del desempeño de MOD16 en relación con EC ( $\text{mm}\cdot\text{mes}^{-1}$ ).....	58
<b>Cuadro 6.5.</b>	Estimados de intersección y pendiente de modelo de ajuste de la ET ( $\text{mm}\cdot\text{dia}^{-1}$ ) .....	60
<b>Cuadro 6.6.</b>	Evaluación del desempeño de los modelos de ajuste de la ET ( $\text{mm}\cdot\text{dia}^{-1}$ ) .....	61
<b>Cuadro 6.7.</b>	Estimados de intersección y pendiente de modelo de ajuste de la ET ( $\text{mm}\cdot\text{mes}^{-1}$ ).....	62
<b>Cuadro 6.8.</b>	Evaluación del desempeño de los modelos de ajuste de la ET ( $\text{mm}\cdot\text{mes}^{-1}$ ).....	63



## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 4.1.</b> Proceso del Algoritmo MOD16 (Mu, et.al., 2007).....	20
<b>Figura 5.1.</b> Mosaicos MODIS, proyección sinusoidal .....	33
<b>Figura 5.2.</b> Vista de la plataforma en línea para descarga de productos MODIS .....	34
<b>Figura 5.3.</b> Vista de plataforma para descarga de productos satelitales MERRA-2 .....	37
<b>Figura 5.4.</b> Vista del navegador de productos de CM SAF.....	39
<b>Figura 5.5.</b> Vista del sitio de descarga del Continuo de Elevaciones Mexicano.....	40
<b>Figura 5.6.</b> Ubicación de herramienta Resample, en ArcGis. ....	41
<b>Figura 5.7.</b> Ubicación de herramienta Multivariate, en ArcGis. ....	42
<b>Figura 5.8.</b> Ubicación geográfica de los sitios de medición Covarianza de vórtices (EC) .....	43
<b>Figura 5.9.</b> Ejemplo de código en Python, para obtener el promedio de ET .....	48
<b>Figura 5.10.</b> Ubicación de herramienta Mosaic, en ArcGis. ....	49
<b>Figura 6.1.</b> Visualización de ET MOD16 contra ET Estimada.....	50
<b>Figura 6.2.</b> Reclasificación de la ET MOD16 y ET Estimada .....	52
<b>Figura 6.3.</b> Dispersión de ET ( $\text{mm}\cdot\text{día}^{-1}$ ) MOD16 contra EC.....	56
<b>Figura 6.4.</b> Dispersión de ET ( $\text{mm}\cdot\text{mes}^{-1}$ ) MOD16 contra EC .....	59
<b>Figura 6.5.</b> Series de tiempo de la Evapotranspiración para el año 2008 en el sitio EC3 (a), 2010 en EC4 (b) y 2006 en el sitio EC5 (c). ....	61
<b>Figura 6.6.</b> Series de tiempo de la Evapotranspiración .....	64
<b>Figura 6.7.</b> Organización de la información de ET ( $\text{mm}\cdot\text{día}^{-1}$ ) para descarga. ....	65
<b>Figura 6.8.</b> Organización de los mosaicos con información de ET a nivel nacional.....	65

# 1 INTRODUCCIÓN

La evapotranspiración (ET) es el segundo componente más grande del ciclo del agua (Allen, *et. al.*, 2011b; Wilcox *et. al.*, 2003), se estima que más del 60% de la precipitación en la Tierra es regresada a la atmósfera a través de ella (Mu, *et. al.*, 2011). ET considera todos los procesos en los que el agua cambia de fase de líquido a gas, incluye a la evaporación de la superficie de la planta (también llamada pérdida por interceptación), la evaporación del suelo y la transpiración de la planta. Las proporciones relativas de sus componentes definen la disponibilidad de agua en una región y determinan los patrones de vegetación global (Wilcox *et. al.*, 2003) por lo tanto juega un rol importante en hidrología, agricultura, climatología y meteorología (Ramoelo, *et. al.*, 2014).

Información sobre evapotranspiración (ET) es fundamental en la comprensión y evaluación de los sistemas de recursos hídricos y sus modificaciones por influencia de las actividades del hombre (UNESCO, 1981), así como en la cuantificación de la producción de alimentos (Hernández, *et. al.*, 2017), fibras y biocombustibles (Allen *et. al.*, 2011a), en la parametrización de modelos de planificación y operaciones hidrológicas, en el funcionamiento de modelos de predicción meteorológica y climática (Verstraeten, *et. al.*, 2008) y en la gestión y asignación del agua en regiones con escasez (Allen *et. al.*, 2011a). Contar con estimaciones precisas de ET contribuye a la facilitación en la toma de decisiones para la gestión de los recursos hídricos (Ramoelo *et. al.*, 2014; Jetse *et. al.*, 2008).

ET es muy variable en el espacio y el tiempo (Allen *et. al.*, 2011a), en función de la heterogeneidad del paisaje, las condiciones de la vegetación (Ramoelo *et. al.*, 2014), la radiación solar, velocidad del viento, déficit de presión de vapor y temperatura del aire,

entre otros elementos (Zhang, *et. al.*, 2016); es un componente difícil de medir, ya que requiere del empleo de principios y técnicas relativamente complejas (Allen, *et. al.*, 2011a), especialmente en las regiones áridas y semiáridas, donde el flujo de ET es relativamente menor que en regiones húmedas (Ramoelo *et. al.*, 2014). A lo largo del tiempo se han desarrollado diferentes métodos de medición o estimación de la Evapotranspiración, a diferentes escalas y con diferentes aplicaciones.

Existen métodos de medición directa, que aunque han sido probados con éxito, representan procesos locales y rara vez se pueden extender a grandes áreas puesto que no capturan la variabilidad espacial y están limitados por el tiempo y los costos que implican (Jetse *et. al.*, 2008; Doble y Crosbie, 2017; Bastiaanssen y Bos, 1999). Por otro lado, la información a escala regional requerida para aplicaciones hidrológicas, se obtiene típicamente con la aplicación de técnicas de percepción remota (Verstraeten *et. al.*, 2008) ya que proporcionan mediciones relativamente frecuentes y espacialmente contiguas, para el monitoreo global de las variables biofísicas de superficie que afectan a ET (Bastiaanssen y Bos, 1999). Un caso particular es el uso de la información procedente del Sistema de Observación de la Tierra (EOS), concretamente del sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) (López, *et. al.*, 2017).

Como parte del proyecto NASA/EOS surge MOD16, que representa la transpiración de la vegetación y la evaporación del dosel y superficies del suelo ( $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ ) a nivel mundial con una escala espacial de  $1 \text{ km}^2$ , en intervalos de 8 días (Mu, *et. al.*, 2007, 2011), con acceso libre para el período de 2000-2014. El desempeño del modelo de estimación de MOD16 se ha validado en diferentes ecosistemas de USA (Mu, *et. al.*, 2011; Su-Chuang, *et. al.*, 2015), además, debido al potencial que representa, ha despertado el interés para su uso en otras

regiones del mundo (Yuan *et. al.*, 2010; Kim *et. al.* 2012; Jia, *et. al.*, 2012; Ruhoff, *et. al.*, 2013; Ramoelo *et. al.*, 2014; Hu *et. al.*, 2015; Santini, *et. al.*, 2017), sin embargo en México ha explorado poco (Alvarado y Orozco, 2016). Por lo tanto el principal objetivo de la presente investigación es evaluarlo, mediante la comparación de estimaciones de ET a través de covarianza de vórtices (EC, siglas en inglés), realizadas en diferentes ecosistemas de México, con el fin de determinar las posibles limitaciones e incertidumbres de la ET estimada y generar información para la toma de decisiones acerca de su uso.

## **2 OBJETIVOS**

### 2.1 General

Evaluar el desempeño de los productos satelitales del proyecto “MOD16 Evapotranspiración”, en comparación con estimaciones puntuales obtenidas mediante sistema de covarianza de vórtices (EC), en México.

### 2.2 Particulares

- Estimar la evapotranspiración mediante el algoritmo de MOD16.
- Identificar y analizar estimaciones de ET obtenidas mediante sistema de covarianza de vórtices, en México.
- Comparar las estimaciones MOD16 contra las mediciones EC.
- Generar productos espaciales básicos de Evapotranspiración, de fácil comprensión y visualización para posibles usos en generación de bases geoespaciales.

## **3 HIPÓTESIS**

Las estimaciones de evapotranspiración obtenidas mediante el algoritmo MOD16, presentan alta concordancia y correlación con mediciones puntuales mediante covarianza de vórtices (EC) en diferentes ecosistemas de México, por lo que se considera una alternativa de información de ET, para su uso a escala regional.

## 4 REVISIÓN DE LITERATURA

### 4.1 Evapotranspiración

La evapotranspiración comprende todos los procesos mediante los cuales el agua pasa de fase líquido a gas. Estos procesos incluyen: a) evaporación de la superficie de la planta o de la hojarasca (comúnmente conocida como pérdida por interceptación); b) evaporación del suelo; y c) transpiración de la planta. Cuando la nieve constituye una porción significativa de la precipitación total en los pastizales, la sublimación, que es la transferencia de agua del estado sólido al vapor, puede ser sustancial y se incluye en este término (Wilcox, *et. al.*, 2003; Zhang, *et. al.*, 2016).

#### 4.1.1 Pérdida por interceptación

Shaw (1996) define como interceptación a la parte de la precipitación que es almacenada temporalmente sobre la superficie de las hojas y ramas, mientras que pérdida por interceptación corresponde a la evaporación de esa agua almacenada, que también puede considerar al agua almacenada sobre la capa de hojarasca subyacente que posteriormente se evapora, por lo tanto, nunca llega a la superficie del suelo. La cantidad real dependen del carácter de la vegetación (temporalidad, extensión de la cubierta, tamaño y forma de las hojas) y de la precipitación (intensidad y frecuencia). Las tierras secas pierden considerablemente más agua por interceptación que ambientes más húmedos. Las pérdidas por interceptación de los pastizales pueden variar entre 1% y 80% de la precipitación anual, pero generalmente están entre 20% y 40% (Wilcox, *et. al.*, 2003).

#### 4.1.2 Evaporación

La evaporación (E) es el proceso por el cual el agua líquida se convierte en vapor de agua (vaporización) y se retira de la superficie evaporante (remoción de vapor). El agua se

evapora de una variedad de superficies, tales como lagos, ríos, caminos, suelos y la vegetación mojada. La evaporación del suelo desnudo se limita a aproximadamente los 15 cm superiores (Wilcox, *et. al.*, 2003). La fuerza impulsora de la evaporación es la diferencia entre la presión del vapor de agua en la superficie evaporante y la presión de vapor de agua de la atmósfera circundante. A medida que ocurre la evaporación, el aire circundante se satura gradualmente y el proceso se vuelve cada vez más lento. El reemplazo del aire saturado por un aire más seco depende grandemente de la velocidad del viento (Allen *et. al.*, 1998).

#### 4.1.3 Transpiración

La transpiración (T) consiste en la evaporación del agua del sistema vascular de las plantas a la atmósfera, a través de los estomas; comienza con la absorción del agua del suelo por las raíces de las plantas. La cantidad de transpiración depende de la cantidad de agua disponible para la planta, ésta puede extraerse de grandes profundidades, según la profundidad y el desarrollo de las raíces de las plantas. Las raíces de las plantas también pueden redistribuir el agua dentro del perfil eliminando el agua de una área húmeda del suelo y liberándola en un área seca (Wilcox, *et. al.*, 2003). En zonas áridas de China, aproximadamente del 20-40% de la evapotranspiración proviene de los acuíferos poco profundos, lo que refleja la necesidad de agua subterránea para cubrir la demanda de evapotranspiración (Liu, *et. al.*, 2016).

#### 4.2 Medición y/o estimación

En teoría el proceso de evapotranspiración es controlado por procesos físicos y biológicos, que varían en espacio y tiempo. (Zhang, *et. al.*, 2016; Schaffrath y Bernhofer, 2013). Zhang, *et. al.*, (2016) separó los controles físicos en tres factores independientes: 1) demanda

(como una función de la temperatura del aire, humedad y velocidad del viento), 2) suministro (como una función de la precipitación) y 3) energía (como función de la radiación y la nubosidad). Los resultados mostraron que el suministro de agua influye en un 49% sobre todo en zonas áridas y semiáridas. La energía disponible es la influencia dominante en las zonas tropicales húmedas (32%). La demanda atmosférica es el factor controlador de evaporación en el 19%, principalmente en zonas localizadas en montañas altas y altas latitudes.

ET puede ser medida o estimada a escala de una hoja (porómetro, que mide la transpiración), una planta individual (flujo de savia, lisímetro), a escala de parcela (Penman-Monteith, Relación de Bowen (BREB), cintilómetro) y a escala de paisaje (covarianza de vórtices). Para obtener estimaciones a nivel regional o global, se ha recurrido al uso de técnicas de percepción remota. Destacan los métodos que utilizan coeficientes de cultivo ( $K_c$ ), estimado mediante el uso de índices de vegetación (NDVI, principalmente) y ET de referencia ( $E_{To}$ ) y los que se basan en un balance de energía superficial. A continuación se describen las características y principios de algunos métodos de estimación de ET como una sola variable, ya que existen otros métodos que dividen ET en evaporación y transpiración, descritos por Kool, *et. al.*, (2014), los cuales no se abordan en la presente investigación.

#### 4.3 Métodos puntuales

##### 4.3.1 Lisímetro

Los lisímetros se pueden agrupar en tres categorías: 1) no pesaje, tipos de tablas de agua constantes, 2) no pesaje, tipos de percolación (se usan a menudo en áreas de alta precipitación) y 3) de pesaje, si se administran bien, proporcionarán los datos más precisos



para periodos de tiempo cortos. Las medidas del lisímetro representan mediciones de ET de áreas generalmente desde 0.05-40 m<sup>2</sup> (Allen *et. al.*, 2011a).

Los lisímetros de pesaje son bloques aislados de suelo o tanques llenos de suelo y suspendidos en un mecanismo de pesaje en el que la vegetación crece bajo condiciones naturales. La cantidad de agua perdida por evaporación y transpiración se basa en el cambio en la masa del lisímetro. La vegetación dentro y fuera del lisímetro debe ser similar en altura, cobertura e índice de área foliar, se requiere un “fetch” de al menos 50 m (Allen *et. al.*, 2011a). Las medidas de lisímetro de ET son extremadamente sensibles a los factores ambientales y de manejo (Schrader *et. al.*, 2013).

#### 4.3.2 Escintilómetro

Un escintilómetro consiste en un transmisor que emite radiación electromagnética paralela a la superficie y un receptor que detecta las fluctuaciones en el índice de refracción del aire (centelleo), causadas por variaciones de densidad, inducidas por la temperatura, la humedad y la presión. Los escintilómetros ópticos funcionan a longitudes de onda  $\lambda \approx 1 \mu\text{m}$ . Los escintilómetros de apertura grande (LAS) tienen un receptor y una abertura del transmisor  $D > 2F$ , donde  $F = \sqrt{\lambda R}$  y R es la longitud de la trayectoria; detecta remolinos de tamaños  $\approx D$  y es adecuado para aplicaciones de largo recorrido (Wang *et. al.*, 1978). Por otro lado los escintilómetros de microonda (MWS) funcionan a longitudes  $\lambda \approx 10 \mu\text{m}$ . Un LAS detecta las fluctuaciones de temperatura, principalmente y los MWS los centelleos de humedad. Dichas fluctuaciones se relacionan con los flujos de calor sensible y latente, haciendo posible derivar el flujo de calor sensible (H) (Chehbouni, *et. al.*, 1999; Bruin *et. al.*, 2013; Saadi, *et.al.*, 2017).

El escintilómetro es un dispositivo que obtiene flujos superficiales promedio en un área comparable a los derivados con observaciones satelitales, y ofrece un medio confiable de validación. Es especialmente útil para medir H sobre vegetación natural compleja. ET se deriva como residual del balance de energía (Rn-G-H), requiriendo representatividad espacial de las mediciones de radiación neta (Rn) y flujo de calor del suelo (G); sin embargo, cualquier sesgo en radiación neta (Rn) y flujo de calor del suelo (G) se transfiere a la estimación de ET (Allen *et. al.*, 2011a; Chehbouni, *et. al.*, 1999).

#### 4.3.3 Relación de Balance de Energía de Bowen (BREB)

Método micrometeorológico práctico y relativamente confiable, permite resolver la ecuación del balance de energía (Ecuación 4.1) midiendo gradientes simples de temperatura del aire y presión de vapor en la capa de la superficie cercana sobre la superficie de evaporación.

$$R_n = G + H + \lambda E \quad (\text{Ec.4.1})$$

Donde Rn es la radiación neta ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ), G es el flujo de calor del suelo ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ), H es el flujo de calor sensible ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ),  $\lambda E$  es el flujo de calor latente ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ). La técnica fue propuesta inicialmente por Bowen (1926) y expresada en la siguiente relación:

$$\beta = H / \lambda E = \alpha (C_p \Delta T / \lambda \Delta e) \quad (\text{Ec.4.2})$$

Donde  $\beta$  es la relación de Bowen,  $\alpha$  es la relación entre los coeficientes de transferencia turbulenta para calor sensible y vapor de agua ( $K_h/K_w$ ) ambos expresados en  $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ ),  $C_p$  es el calor específico del aire a presión constante ( $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$ ),  $\Delta T$  es el gradiente de temperatura ( $^\circ\text{C}$ ) entre dos alturas sobre la superficie,  $\lambda$  es calor latente de vaporización ( $\text{J}\cdot$

$\text{kg}^{-1}$ ), y  $\Delta e$  es el gradiente de presión de vapor (KPa) entre las mismas dos alturas que T. Usando las ecuaciones anteriores se derivan las estimaciones de evapotranspiración:

$$\lambda E = (R_n - G) / (1 + \beta) \quad (\text{Ec.4.3})$$

Se requieren mediciones representativas de  $R_n$  y  $G$ , que determinan la precisión de las estimaciones de ET. Debido a que  $G$  es bastante sensible al calentamiento de la superficie, las mediciones se deben realizar tanto en partes iluminadas por el sol como a la sombra del suelo, en ambientes húmedos y secos. En sistemas silvestres y heterogéneos se requieren más mediciones. El método funciona mejor cuando el agua del suelo no está limitando la ET. A medida que el agua se vuelve menos disponible, la relación de Bowen aumenta, y el error relativo en ET aumenta (Prueger, *et. al.* 1997; Allen *et. al.*, 2011a).

#### 4.3.4 Penman Monteith

El método de FAO Penman-Monteith se recomienda como el único método estándar para la definición y el cálculo de la evapotranspiración de referencia ( $E_{To}$ ) (Ecuación 4.4). La superficie de referencia es un cultivo hipotético de pasto, con una altura asumida de 0.12 m, con una resistencia superficial fija de  $70 \text{ s}\cdot\text{m}^{-1}$  y un albedo de 0.23, muy similar a una superficie extensa de pasto verde, bien regada, de altura uniforme, creciendo activamente y dando sombra totalmente al suelo, el manual de FAO 56 (Allen *et. al.*, 2006) expresa paso a paso los métodos para medir o estimar cada una de las variables que requiere el método.

$$\lambda E = \frac{\Delta (R_n - G) + \rho C_p \times (e_{\text{sat}} - e) / r_a}{\Delta + \gamma (1 + r_s / r_a)} \quad (\text{Ec.4.4})$$

Donde  $\lambda E$  ( $W \cdot m^{-2}$ ) es el flujo de calor latente,  $R_n$  es la radiación neta ( $W \cdot m^{-2}$ ),  $G$  es el flujo de calor en el suelo ( $W \cdot m^{-2}$ ),  $(e_{sat} - e)$  representa el déficit de presión de vapor del aire (Pa),  $\rho$  es densidad del aire a presión constante ( $kg \cdot m^{-3}$ ),  $C_p$  es la capacidad de calor específico del aire ( $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ),  $\Delta$  es la pendiente de la curva que relaciona la presión de vapor de agua con la temperatura,  $\gamma$  es la constante psicométrica,  $r_a$  ( $s \cdot m^{-1}$ ) es la resistencia aerodinámica y  $r_s$  ( $s \cdot m^{-1}$ ) es la resistencia de la superficie.

#### 4.3.5 Covarianza de vórtices

Los sistemas de covarianza de vórtices (EC) tiene la capacidad de medir en forma conjunta los flujos  $H$ ,  $\lambda E$  y dióxido de carbono  $CO_2$ . Se basa en la covarianza estadística (correlación) entre las mediciones de la velocidad vertical, los movimientos hacia arriba y hacia abajo, y la concentración de la entidad de interés (Ecuación 4.5 y 4.6). Tales medidas requieren una instrumentación muy sofisticada, porque las fluctuaciones turbulentas ocurren muy rápidamente; los cambios en la concentración, densidad o temperatura son pequeños y deben medirse muy rápido y con gran precisión, generalmente a frecuencias de 5-20 Hz (5-20 veces por segundo) usando sensores de respuesta rápida. Las mediciones del flujo de calor latente (LE) y el flujo de calor sensible (H), se obtienen usando las siguientes relaciones (Ham y Heilman, 2003):

$$LE = \overline{Lw' \rho_{ww}'} \quad (Ec.4.5)$$

$$H = \rho_a C_p \overline{w'T_s'} - 0.5Ta \frac{\rho_a C_p}{L} LE \quad (Ec.4.6)$$

Donde  $\rho_a$  y  $C_p$  es la densidad y la capacidad calorífica del aire, respectivamente;  $L$  es el calor de vaporización del agua;  $T_a$  la temperatura del aire. Los productos  $w'\rho_{ww'}$  y  $w'Ts'$  representan la covarianza entre la velocidad vertical del viento ( $w$ ) y la densidad del vapor de agua ( $\rho_{ww}$ ) y la temperatura sónica ( $Ts$ ). La temperatura sónica ( $^{\circ}C$ ) se obtiene de las mediciones de la velocidad del sonido y la velocidad tridimensional del viento. La barra horizontal representa el valor medio del producto de las desviaciones en un intervalo de tiempo.

El método considera suposiciones importantes: 1) las fluctuaciones de densidad son insignificantes; 2) no se producen desvíos o conversiones de flujo; 3) las mediciones en el punto representan un área homogénea; 4) las medidas se realizan dentro de la capa límite de interés, y dentro de la capa de flujo constante; 5) *Fetch* (distancia de terreno homogéneo contra el viento) y *footprint* (área de la superficie en contra del viento) se consideran adecuados para una medición representativa; 6) el flujo es completamente turbulento; 7) el terreno es horizontal y uniforme y 8) los instrumentos utilizados pueden detectar cambios muy pequeños con una frecuencia muy alta.

Dentro de los principales requerimientos del método EC se encuentra un *Fetch* uniforme más profundo que la altura del instrumento, esta relación tienden a seguir la regla de 100: 1 para la superficie de pasto, aunque puede ser superior para superficies más lisas y menos para superficies más rugosas, la altura del instrumento además, debe estar por encima del dosel para reducir las distorsiones y aumentar el tamaño de los remolinos.

El método EC se ha sido utilizado ampliamente para estimar la evapotranspiración, en el noroeste de México, principalmente en cultivos, nogal pecanero (Zermeño, *et. al.*, 2010), chile (Rodríguez *et. al.*, 2011; López *et. al.*, 2015), sandía (Román, *et. al.*, 2017), melón (Munguía, *et. al.*, 2004), vid (Gordillo *et. al.*, 2014); y en el estado de Veracruz, para estimación de ET en plantación de café (Holwerda, *et. al.*, 2013).

#### 4.4 Métodos de sensores remotos (RS)

##### 4.4.1 Métodos de Balance de Energía (SEB, por siglas en inglés)

Fueron los primeros métodos desarrollados para la estimación de evapotranspiración, consisten en la combinación de las expresiones matemáticas de Balance de Energía de la Superficie y las ecuaciones de flujo de calor, con valores de temperatura obtenidos mediante sensores remotos.

$$R_n = \lambda \cdot E + H + G + \Delta H \quad (\text{Ec.4.7})$$

$$R_n = R_{ns} + R_{nl} = (1 - \varepsilon) \cdot R_{s\downarrow} + R_{l\downarrow} - R_{l\uparrow} \quad (\text{Ec.4.8})$$

$$\lambda E = R_n - H - G \quad (\text{Ec.4.9})$$

$$H = \rho_{\text{air}} \cdot C_p \cdot \frac{T_{\text{aero}} - T_a}{r_r} \quad (\text{Ec.4.10})$$

Donde  $R_n$  es la radiación neta, la suma de la radiación neta de onda corta entrante ( $R_{ns}$ ) y la radiación neta de onda larga ( $R_{nl}$ );  $H$  es el calor sensible;  $G$  es el flujo de calor del suelo;  $\Delta H$  es el cambio en el almacenamiento de calor en el espacio de aire de la biomasa y el dosel;  $\varepsilon$  es el albedo de onda corta;  $R_{s\downarrow}$  y  $R_{l\downarrow}$  son la radiación de onda corta y larga entrante;  $R_{l\uparrow}$  es la radiación de onda larga saliente.  $K_v$  y  $K_h$  son los coeficientes de transferencia de vapor de agua y calor;  $\delta q/\delta z$  y  $\delta T/\delta z$  son los gradientes verticales de humedad específica y temperatura a una altura de referencia por encima de la superficie;

$\rho_{\text{air}}$  es la densidad del aire,  $C_p$  es el calor específico del aire,  $T_{\text{aero}}$  es la temperatura de la superficie aerodinámica, reemplazada frecuentemente por  $T_{\text{rad}}$  (temperatura radiativa de la superficie) obtenida mediante sensores remotos,  $T_a$  representa la temperatura del aire a la altura de referencia y  $r_r$  es la resistencia radiométrica convectiva.

El término  $r_r$  se utiliza considerando a la superficie del suelo como si fuese eléctrica, la razón de cambio de una cantidad (calor o masa) entre dos puntos ocurre debido a una diferencia de potencial (temperatura o concentración) y es controlada por un número de resistencias que dependen de propiedades de la atmósfera, vegetación y suelo locales (Kalma *et. al.*, 2008).

Existen diferentes configuraciones que consideran redes de resistencia al calor y vapor de agua. Modelos de una fuente consideran a la superficie del suelo como un todo. Modelos de dos capas dividen la superficie en dos componentes (superficie del suelo y follaje, generalmente) donde los flujos de energía y vapor de agua interactúan entre los componentes; contrario al modelo de dos parches, donde se consideran dos componentes como separados. Las diferentes combinaciones generadas incluyen los modelos multi-parches donde se considera la heterogeneidad espacial dentro de cada celda del grid y los modelos multi-capas que consideran la heterogeneidad vertical.

#### 4.4.1.1 SEB de una fuente

En los modelos de una fuente, la resistencia radiométrica convectiva ( $r_r$ ) es equivalente a la resistencia aerodinámica al calor ( $r_a$ ) y ha sido calculada mediante la expresión:

$$r_a = \frac{\left[ \ln \left( \frac{z-d}{z_{om}} \right) - \Psi_M \right] \cdot \left[ \ln \left( \frac{z-d}{z_{oh}} \right) - \Psi_H \right]}{k^2 \cdot u} \quad (\text{Ec.4.11})$$

Donde  $Z_{om}$  es la longitud de rugosidad para el flujo momentáneo;  $\Psi_M$  y  $\Psi_H$  son funciones de corrección de estabilidad para flujo momentáneo y calor sensible, respectivamente;  $k$  es la constante de Karman;  $u$  es la velocidad del viento a una altura de referencia  $z$ .

Uno de los primeros modelos de una fuente fue el desarrollado por Bastiaanssen *et. al.*, (2005) conocido como SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithm for Land*), en el que más adelante se basaron Allen *et. al.*, (2007) para el diseño de METRIC (*Mapping Evapotranspiration with high Resolution and Internalized Calibration*). Otros modelos fueron desarrollados por Roerink *et. al.*, (2000) quienes formularon el S-SEBI (*Simplified Surface Energy Balance Index*) para estimar  $\lambda E$  instantánea como el producto de la fracción evaporativa (EF) y  $R_n - G$ , para lo cual no es necesario calcular el flujo de calor sensible.

#### 4.4.1.2 SEB de dos fuentes

En los modelos de dos fuentes  $H$  es la suma del calor sensible del follaje ( $H_C$ ) y el calor sensible del suelo ( $H_S$ ), estimados de manera similar que en los modelos de una fuente:

$$r_a = \frac{\left[ \ln \left( \frac{z-d}{Z_{om}} \right) - \Psi_M \right] \cdot \left[ \ln \left( \frac{z-d}{Z_{oh}} \right) - \Psi_H \right]}{k^2 \cdot u} \quad (\text{Ec.4.12})$$

$$H_C = \rho_{air} \cdot C_P \cdot \frac{T_C - T_{ac}}{r_C} \quad (\text{Ec.4.13})$$

$$H_S = \rho_{air} \cdot C_P \cdot \frac{T_S - T_{ac}}{r_S} \quad (\text{Ec.4.14})$$



Donde  $T_C$  y  $T_S$  son la temperatura del follaje y el suelo respectivamente;  $T_{ac}$  es la temperatura de la capa de aire en el follaje.  $T_C$  y  $T_S$  se relacionan con  $T_{rad}$  a través de las siguientes expresiones:

$$T_{rad} = [fc \cdot T_C^4 + (1 - fc) \cdot T_S^4]^{0.25} \quad (\text{Ec.4.15})$$

$$fc = 1 - \exp\left(\frac{-0.5 \cdot \Omega \cdot L_A}{\cos\theta}\right) \quad (\text{Ec.4.16})$$

Donde  $fc$  es la fracción de cobertura del suelo;  $\Omega$  es el factor indicativo del grado de agrupación de la vegetación

#### 4.4.2 Métodos de índices de vegetación

La estimación de la evapotranspiración de cultivos ( $ET_c$ ) (Ecuación 4.18) basada en el coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) (Ecuación 4.17) es uno de los métodos más utilizados para el manejo del agua de riego.  $K_c$  es definido como la relación entre la evapotranspiración del cultivo y la evapotranspiración de referencia ( $ET_o$ ) definida por los datos meteorológicos (Allen, *et. al.*, 1998), depende principalmente de la dinámica de la vegetación, la absorción de la luz por el dosel, la rugosidad del dosel, que afecta la turbulencia, la fisiología de los cultivos, la edad de las hojas y la humedad de la superficie.

$$K_c = \frac{ET_c}{ET_o} \quad (\text{Ec.4.17})$$

$$ET_c = K_c \cdot ET_o \quad (\text{Ec.4.18})$$

Donde  $ET_c$  es la evapotranspiración real del cultivo ( $\text{mm} \cdot \text{dia}^{-1}$ ),  $K_c$  es el coeficiente de cultivo y  $ET_o$  es la evapotranspiración de referencia ( $\text{mm} \cdot \text{dia}^{-1}$ ). La metodología propuesta por Wright (1982) divide el  $K_c$  en dos coeficientes separados:  $K_{cb}$  (coeficiente de cultivo basal) que corresponde a la transpiración del cultivo y  $K_e$  que describe la componente de

evaporación de la ET. Cuando la capa superficial del suelo está húmeda, después del riego o lluvia,  $K_e$  es máximo.

$$ET_c = (K_{cb} + K_e) \cdot ET_o \quad (\text{Ec.4.19})$$

Las similitudes entre la curva del coeficiente del cultivo y un índice de vegetación (VI) derivado del satélite, muestran potencial para modelar un coeficiente del cultivo en función del índice de vegetación (Kamble, *et. al.*, 2013). Esto es posible debido a la correspondencia entre la cantidad de vegetación y la transpiración, a medida que aumenta la cubierta vegetal, aumenta el área foliar y aumenta la transpiración (Glenn *et. al.*, 2011).

Existen diversos índices de vegetación (IVs), los cuales tienen en común el uso de los valores de reflectancia y absorción en las zonas espectrales del rojo e infrarrojo cercano. Cuando la radiación solar choca con las estructuras del cultivo, la luz visible (0.4-0.7  $\mu\text{m}$ ) es fuertemente absorbida por la clorofila para su uso en la fotosíntesis y la luz del infrarrojo cercano (0.7-1.1  $\mu\text{m}$ ) es mayormente reflejada. El índice más usado es el índice de vegetación de diferencia normalizada, NDVI, (*Normalized Difference Vegetation Index*), el cual se define como:

$$NDVI = \frac{IRc - Vis}{IRc + Vis} \quad (\text{Ec.4.20})$$

Donde, IRc son los valores de reflectividad de la banda del infrarrojo cercano y Vis los valores en la banda del rojo.

Para el cálculo de coeficientes de cultivo es necesario tener mediciones de ET real del cultivo y estimar  $ET_o$  mediante el método de Penman-Monteith (PM), para poder obtener una relación  $K_{cNDVI}$  lineal, cuadrática, cúbico, polinómica, o de otro tipo, para un cultivo

bajo condiciones específicas, que después puede utilizarse como la relación de referencia para estimar la ET del cultivo en otras regiones con condiciones similares.

Otro índice de vegetación ampliamente utilizado es SAVI (*Soil Adjusted Vegetation Index*) (Huete, 1988), que considera los efectos de humedad y color del suelo. El uso de SAVI en cultivos de poca cobertura vegetal, reduce el efecto del fondo del suelo, y mejora la relación entre los parámetros biofísicos y el índice de vegetación.

$$SAVI = \frac{(IRc - Vis) \cdot (1 + L)}{IRc + Vis + L} \quad (Ec.4.21)$$

Donde SAVI es el índice de vegetación ajustado al suelo, L es una constante que generalmente adquiere el valor de 0.5.

En México se han desarrollado relaciones  $K_{CNDVI}$  para el cultivo de trigo (Castañeda, *et. al.*, 2015), chile bell (López, *et.al.*, 2015) y chile banana (Rodríguez, *et. al.*, 2011). En España se ha estudiado la relación  $K_{CNDVI}$  en alfalfa, ajo, trigo, cebada, maíz, cebolla, guisante, remolacha y adormidera (Cuesta, *et. al.*, 2005). Kamble *et. al.* (2013), estudiaron la relación  $K_{CNDVI}$  en el oeste de Estados Unidos para maíz y soya. También se reportan relaciones  $K_{CSAVI}$  para alfalfa y maíz forrajero (Reyes, *et. al.*, 2013) y trigo (Garatuza y Watts, 2003; Castañeda, *et. al.*, 2015).

#### 4.4.3 Métodos de Priestley-Taylor

El modelo de Priestley-Taylor (PT) es una simplificación de la ecuación de PM y se usó originalmente para estimar E en condiciones de baja tensión sin calcular la conductancia aerodinámica y de superficie. La ecuación general de PT se puede expresar como:

$$\lambda \cdot E = f_{\text{stress}} \cdot \alpha \cdot \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \cdot (R_n - G) \quad (Ec.4.22)$$

Donde  $\alpha$  es el parámetro PT con un valor de 1.2-1.3 bajo condiciones de no estrés hídrico,  $f_{\text{stress}}$  es un factor de estrés que se ignora o se establece en 1 en la ecuación PT original y generalmente se calcula como una función de las condiciones ambientales. El método PT se ha adoptado para construir modelos RS E. Fisher *et. al.* (2008) introdujeron la temperatura de la planta y los factores de restricción de humedad en la ecuación PT para calcular la transpiración mensual del dosel y desarrollaron ecuaciones PT revisadas para estimar la evaporación mensual del dosel húmedo y la evaporación del suelo. Miralles *et. al.* (2011) construyeron otro modelo RS E tipo PT llamado Evaporación de la superficie global: la Metodología de Amsterdam (GLEAM), que combina un modelo de intercepción del dosel, un módulo de agua del suelo y un módulo de estrés con la ecuación de PT.

#### 4.4.4 Algoritmo MOD16

El algoritmo original está basado en la revisión del algoritmo propuesto por Cleugh *et. al.* (2007). Que a su vez está basado en la ecuación de Penman-Monteith (Penman, 1965) (Mu *et. al.*, 2007). El algoritmo original fue mejorado y se le reconoce por las siguientes consideraciones 1) simplificar el cálculo de la fracción de cobertura vegetal; 2) el cálculo de ET como la suma de los componentes diurnos y nocturnos; 3) añadir el cálculo de flujo de calor del suelo; 4) la mejora de las estimaciones de la conductancia estomática, la resistencia aerodinámica y la resistencia de la capa límite; 5) que separa la superficie del dosel seca de la húmeda; y 6) que divide la superficie del suelo en superficie húmeda saturada y superficie húmeda (Mu *et. al.*, 2011).

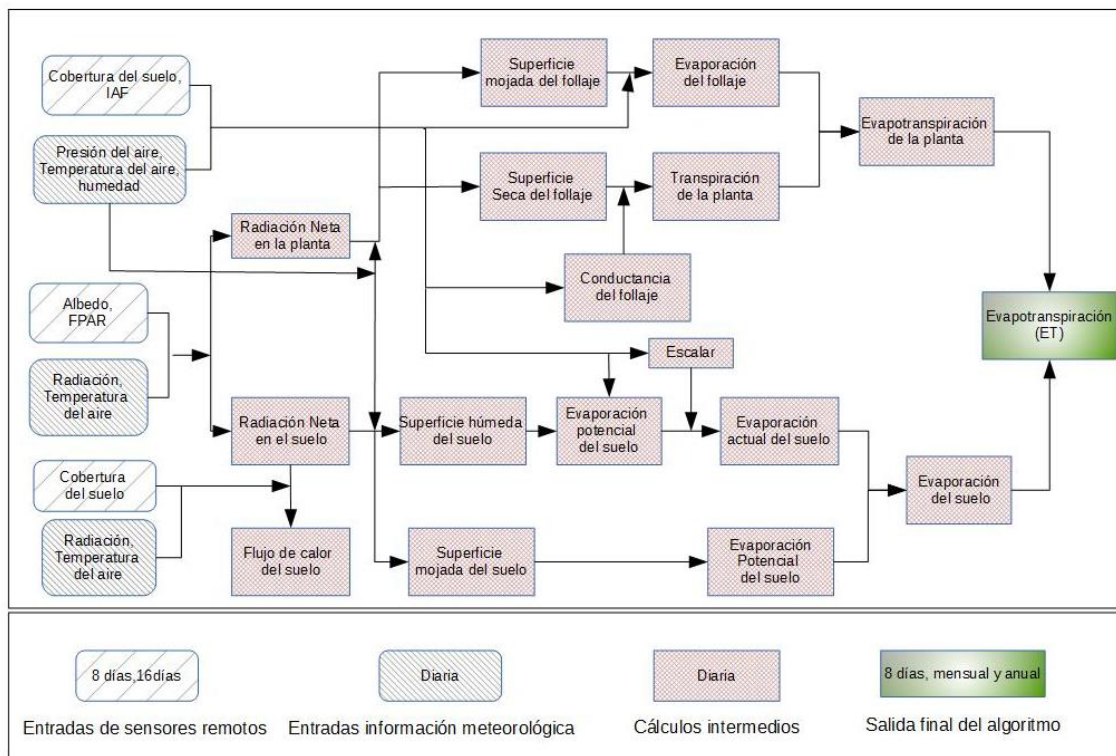
A continuación se describe el proceso del algoritmo MOD16, de acuerdo con lo descrito por Mu *et. al.* (2007 y 2011). En la Figura 4.1, se observa la ruta que se debe seguir si se desea replicar el método de estimación de ET real.

#### 4.4.4.1 ET diurna y nocturna

Evapotranspiración diaria debe ser la suma de ET día y noche. Para obtener la temperatura media del aire durante la noche ( $t_{noche}$ ), se supone que la temperatura del aire media diaria ( $T_{prom}$ ) es el promedio de la temperatura del aire durante el día ( $T_{día}$ ) y ( $T_{noche}$ ).

$$T_{noche} = 2T_{prom} - T_{día} \quad (Ec.4.23)$$

Se asume que la radiación solar neta entrante en la noche es cero, además se considera el cierre estomático completo, por lo tanto la transpiración de la planta por los estomas es cero, no así la transpiración a través de la capa límite de las hojas y la cutícula.



**Figura 4.1.** Proceso del Algoritmo MOD16 (Mu, *et.al.*, 2007).

#### 4.4.4.2 Radiación neta

La radiación neta entrante a la superficie del suelo ( $R_{net}$ ) es calculada mediante las siguientes ecuaciones, de acuerdo con Cleugh *et. al.* (2007):

$$R_{net}=(1-\alpha) \cdot R_{s\downarrow}+(\varepsilon_a-\varepsilon_s) \cdot \sigma \cdot (273.15+T)^4 \quad (\text{Ec.4.24})$$

$$\varepsilon_a=1-0.26\exp^{(-7.77 \cdot 10^{-4} \cdot T^2)} \quad (\text{Ec.4.25})$$

Donde  $\alpha$  es albedo,  $R_{s\downarrow}$  es la radiación entrante de onda corta,  $\varepsilon_s$  la emisividad de la superficie = 0.97,  $\varepsilon_a$  es la emisividad atmosférica y T es la temperatura del aire en °C.

La radiación neta es dividida entre el follaje ( $A_C$ ) y el suelo ( $A_{SOIL}$ ) usando la fracción de cubierta vegetal ( $F_C$ ) como sigue:

$$A_C = F_C \cdot A \quad (\text{Ec.4.26})$$

$$A_{SOIL}=(1-F_C) \cdot A - G \quad (\text{Ec.4.27})$$

Donde A es la parte de radiación neta entrante ( $R_{net}$ ) dividida en flujo de calor sensible y flujo de calor latente. La energía recibida por el suelo ( $A_{SOIL}$ ) es la diferencia entre la radiación particionada sobre la superficie del suelo y el flujo de calor del suelo (G).

#### 4.4.4.3 Fracción cubierta vegetal

La radiación neta se divide entre el follaje y la superficie del suelo basado en el porcentaje de cobertura vegetal ( $F_C$ ). En el algoritmo original,  $F_C$  se calculó utilizando el índice de vegetación EVI, sin embargo se consideró la utilidad del producto satelital MOD15A2 FPAR (fracción de radiación fotosintéticamente activa absorbida) como sustituto, por lo tanto:

$$F_C = \text{FPAR} \quad (\text{Ec.4.28})$$

Donde  $F_c$  es la fracción de cubierta vegetal y  $FPAR$  es la fracción de radiación fotosintéticamente activa absorbida.

#### 4.4.4.4 Flujo de calor del suelo

Clothier *et. al.* (1986) propusieron un método para estimar flujo de calor del suelo a partir de datos de teledetección, expresado por:

$$G_{SOIL} = 0.295 - 0.0133 \cdot \frac{\beta_2}{\beta_1} \cdot A_i \quad (\text{Ec.4.29})$$

Donde  $B_1$  y  $B_2$  son los anchos de banda de los filtros SPOT 610-680  $\mu\text{m}$  y 790-890  $\mu\text{m}$ ,  $A_i$  es la energía disponible de día o de noche (calor latente y flujos de calor sensible). Kustas y Daughtry (1990) mejoraron aún más el método que utiliza  $B_2 / B_1$  y NDVI. Daughtry *et. al.* (1990) compararon el flujo de calor del suelo utilizando diferentes métodos con los datos observados y encontraron que las estimaciones utilizando NDVI en la ecuación anterior tenían el error absoluto más bajo (13%) con un pequeño sesgo positivo. Jacobsen y Hansen (1999) propusieron algunos otros métodos para estimar  $G_{SOIL}$  y es el método utilizado en el algoritmo MOD16:

$$G_{SOIL} = 4.73 \cdot T_i - 20.87 \quad (\text{Ec.4.30})$$

$$G_{SOIL} = (-0.27 \cdot NDVI + 0.39) \cdot A_i \quad (\text{Ec.4.31})$$

$$G = G_{SOIL} \cdot (1 - F_C) \quad (\text{Ec.4.32})$$

Donde  $A_i$  es la energía diurna o nocturna disponible, dividida en flujo de calor latente y sensible,  $T_i$  es la temperatura de día o noche.

#### 4.4.4.5 Fracción de superficie húmeda

La fracción de superficie húmeda ( $F_{wet}$ ) se toma del modelo de Fisher *et. al.* (2008), modificado para ser limitado a cero cuando la humedad relativa (RH) es menor que 70%.

$$F_{wet} = 0.0 \quad RH < 70\%; \quad F_{wet} = RH^4 \quad 70\% \leq RH \leq 100\% \quad (\text{Ec.4.33})$$

Donde RH es la humedad relativa

#### 4.4.4.6 La evaporación de la superficie del dosel mojado

Cuando la vegetación está cubierta con agua (es decir,  $F_{wet}$  no es cero), se producirá la evaporación del agua desde la superficie del dosel húmedo. ET de la vegetación consiste en la evaporación de la superficie del dosel húmedo y la transpiración de tejido de la planta, reguladas por la resistencia aerodinámica y la resistencia de la superficie.

$$r_{hc} = \frac{1.0}{g_{l\_sh} \cdot LAI \cdot F_{wet}} \quad (\text{Ec.4.34})$$

$$r_{rc} = \frac{\rho \cdot C_p}{4.0 \cdot \sigma \cdot T_i^3} \quad (\text{Ec.4.35})$$

$$r_{hrc} = \frac{r_{hc} \cdot r_{rc}}{r_{hc} + r_{rc}} \quad (\text{Ec.4.36})$$

$$r_{vc} = \frac{1.0}{g_{l\_e\_wv} \cdot LAI \cdot F_{wet}} \quad (\text{Ec.4.37})$$

Donde  $r_{hc}$  ( $s \cdot m^{-1}$ ) es la resistencia del dosel húmedo al calor sensible,  $r_{rc}$  ( $s \cdot m^{-1}$ ) es la resistencia a la transferencia de calor por radiación a través del aire;  $g_{l\_sh}$  ( $m \cdot s^{-1}$ ) es la conductancia de la hoja a calor sensible por unidad LAI;  $g_{l\_e\_wv}$  ( $m \cdot s^{-1}$ ) es la conductancia de la hoja a evaporación de agua por unidad LAI,  $\sigma$  ( $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$ ).



#### 4.4.4.7 Transpiración de la planta

##### 4.4.4.7.1 Conductancia de la superficie

En el algoritmo mejorado, se incluye la transpiración tanto del día y la noche. En el caso de transpiración de la planta, la conductancia de la superficie es equivalente a la conductancia de dosel ( $C_C$ ), y por lo tanto la resistencia de la superficie ( $r_s$ ) es la inversa de conductancia del dosel ( $C_C$ ).  $C_L$  está configurado de forma diferente para diferentes biomas (Anexo I).

$$C_s = C_L \cdot m(T_{min}) \cdot m(VPD) \quad (\text{Ec.4.38})$$

$$C_C = C_s \cdot LAI \quad (\text{Ec.4.39})$$

Donde  $C_L$  es el promedio de la conductancia estomática potencial por unidad de área foliar,  $m(T_{min})$  es un multiplicador que limita la conductancia estomatal por temperaturas mínimas y  $m(VPD)$  es un multiplicador que reduce la conductancia cuando VPD es alto, suficiente para inhibir la fotosíntesis.

$$m(T_{min}) = \begin{cases} 1.0 & T_{min} \geq T_{min\_open} \\ \frac{T_{min} - T_{min\_close}}{T_{min\_open} - T_{min\_close}} & T_{min\_close} < T_{min} < T_{min\_open} \\ 0.1 & T_{min} \leq T_{min\_close} \end{cases} \quad (\text{Ec.4.40})$$

Donde *close* indica cercanía a la completa inhibición y *open* indica la no inhibición de la transpiración (Anexo I).

$$m(VPD) = \begin{cases} 1.0 & VPD \leq VPD\_open \\ \frac{VPD_{close} - VPD}{VP_{close} - VPD\_open} & VPD\_open < VPD < VPD\_close \\ 0.1 & VPD \geq VPD\_close \end{cases} \quad (\text{Ec.4.41})$$

En el algoritmo mejorado, se revisó la forma de calcular  $C_c$  ya que fue derivada de la conductancia estomatal y cuticular en paralelo, y ambas en serie con la conductancia de la capa límite de la hoja.

$$r_{\text{corr}} = \frac{1.0}{\frac{101300}{P_a} \cdot \left(\frac{T_i + 273.15}{293.15}\right)^{1.75}} \quad (\text{Ec.4.42})$$

$$G_{s\_day1} = C_L \cdot m(T_{\text{min}}) \cdot m(\text{VPD}) \cdot r_{\text{corr}} \quad (\text{Ec.4.43})$$

$$G_{s\_night1} = 0.0 \quad (\text{Ec.4.44})$$

$$G_{\text{CU}} = g_{\text{CU}} \cdot r_{\text{corr}} \quad (\text{Ec.4.45})$$

$$G_{s2} = gl\_sh \quad (\text{Ec.4.46})$$

$$C_{c_i} = \begin{cases} \frac{G_{s2} \cdot (G_{s\_i1} + G_{\text{CU}})}{G_{s\_i1} + G_{s2} + G_{\text{CU}}} \cdot \text{LAI} \cdot (1 - \text{Fwet}) & \text{LAI} > 0.0, (1 - \text{Fwet}) > 0.0 \\ 0.0 & \text{LAI} = 0.0, (1 - \text{Fwet}) = 0.0 \end{cases} \quad (\text{Ec.4.47})$$

$$r_{s\_i} = \frac{1}{C_{c_i}} \quad (\text{Ec.4.48})$$

Donde el subíndice  $i$  significa el valor de la variable para el día y la noche;  $G_{s\_day1}$  y  $G_{s\_night1}$  son la conductancia estomatal del día y la noche, respectivamente;  $G_{\text{CU}}$  es la conductancia cuticular de la hoja;  $G_{s2}$  es la conductancia de la capa límite de aire que rodea a la hoja;  $g_{\text{cu}}$  es la conductancia cuticular por unidad de IAF, considerada como valor constante =  $0.00001 \text{ (m}\cdot\text{s}^{-1}\text{)}$ , para todos los biomas;  $gl\_sh$  es la conductancia de la hoja a calor sensible por unidad de IAF, considerado como constante para cada bioma (Anexo I),  $r_s$  es la resistencia a la transpiración del follaje seco. Se asume cierre total de estomas durante la noche. La presión atmosférica ( $P_a$ ) es calculada como una función de la elevación (Elev):

$$t_1 = 1 - \frac{LR_{STD} \cdot Elev}{T_{STD}} \quad (\text{Ec.4.49})$$

$$t_2 = \frac{G_{STD}}{T_{STD} \cdot \frac{RR}{MA}} \quad (\text{Ec.4.50})$$

$$P_a = P_{STD} \cdot t_1^2 \quad (\text{Ec.4.51})$$

Donde  $LR_{STD}$ ,  $T_{STD}$ ,  $G_{STD}$ ,  $RR$ ,  $MA$  y  $P_{STD}$  son valores constantes (Cuadro 4.1);  $LR_{STD}$  ( $\text{Km}^{-1}$ ) es la tasa de caída de la temperatura;  $T_{STD}$  (K) es la temperatura estándar a 0.0 m de elevación;  $G_{STD}$  ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ ) es la aceleración gravitacional estándar;  $RR$  ( $\text{m}^3 \cdot \text{Pa} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ) es la constante de la ley de los gases;  $MA$  ( $\text{kg}\cdot\text{mol}^{-1}$ ) es el peso molecular del aire y  $P_{STD}$  (Pa) es la presión estándar a 0.0 m de elevación.

**Cuadro 4.1.** Parámetros para estimación de la presión atmosférica

$LR_{STD}$ ( $\text{K}\cdot\text{m}^{-1}$ )	$T_{STD}$ (K)	$G_{STD}$ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ )	$RR$ ( $\text{m}^3 \cdot \text{Pa} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )	$MA$ ( $\text{kg}\cdot\text{mol}^{-1}$ )	$P_{STD}$ (Pa)
0.0065	288.15	9.80665	8.3143	$28.9644\text{e}^{-3}$	101,325.0

#### 4.4.4.7.2 Resistencia aerodinámica

La transferencia de calor y vapor de agua desde la superficie del dosel seco está determinada por la resistencia aerodinámica ( $r_a$ ), que era una constante de  $20 \text{ s}\cdot\text{m}^{-1}$  en el viejo algoritmo. En el algoritmo mejorado,  $r_a$  se calcula como una resistencia en paralelo de transferencia de calor convectivo ( $rh$ ) y radiativo ( $rr$ ):

$$r_a = \frac{rh \cdot rr}{rh + rr} \quad (\text{Ec.4.52})$$

$$rh = \frac{1.0}{gl\_bl} \quad (\text{Ec.4.53})$$

$$rr = \frac{\rho \cdot C_p}{4.0 \cdot \sigma \cdot T_i^3} \quad (\text{Ec.4.54})$$

Donde  $g_{l\_bl}$  ( $m \cdot s^{-1}$ ) es la conductancia de la capa límite de la hoja a gran escala, cuyo valor es igual a la conductancia de calor sensible por unidad de área foliar ( $g_{l\_sh}$ ) (Anexo I) y  $\sigma$  ( $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$ ) es la constante de Stefan-Boltzmann.

#### 4.4.4.7.3 Transpiración de la planta

La transpiración de la planta se calcula como:

$$\lambda E_{trans} = \frac{\left( s \cdot A_C + \rho \cdot C_p \cdot (e_{sat} - e) \cdot \frac{F_C}{r_a} \right) \cdot (1 - F_{wet})}{s + \gamma \cdot \left( 1 + \frac{r_s}{r_a} \right)} \quad (Ec.4.55)$$

Donde  $r_a$  es la resistencia aerodinámica;  $S$  es la pendiente de la curva que relaciona la presión de vapor de agua ( $e_{sat}$ : Pa) con la temperatura;  $\rho$  es densidad del aire ( $kg \cdot m^{-3}$ );  $C_p$  es la capacidad de calor específico del aire ( $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ).

La presión de vapor a saturación a la temperatura del aire está dada por la siguiente expresión (Allen, *et.al.*, 1998):

$$e^{\circ}(T) = 0.6108 \cdot \exp \left[ \frac{17.27 \cdot T}{T + 237.3} \right] \quad (Ec.4.56)$$

Donde  $e^{\circ}(T)$  es la presión de vapor a la temperatura del aire (KPa);  $T$  es la temperatura del aire ( $^{\circ}C$ ) (Allen, *et.al.*, 1998) y  $e_{sat}$  se obtiene mediante la expresión:

$$e_{sat} = \frac{e^{\circ}(T_{max}) + e^{\circ}(T_{min})}{2} \quad (Ec.4.57)$$

Donde  $e^{\circ}T_{max}$  y  $e^{\circ}T_{min}$  es la presión de vapor a temperatura máxima y mínima, respectivamente.

La presión de vapor real ( $e$ ) se estimó con base en la información disponible de humedad relativa media y la relación existente entre ambas variables, de acuerdo a la siguiente expresión (Allen, *et.al.*, 1998):

$$e = \frac{HR_{media}}{100} e^{\circ}(T_{media}) \quad (Ec.4.58)$$

Donde HR es la humedad relativa (%).

Para estimar la pendiente de la curva que relaciona la temperatura y la presión de saturación de vapor, a una temperatura dada, se utilizó la expresión (Allen, *et.al.*, 1998):

$$s = \frac{4098 \cdot \left[ 0.6108 \cdot \exp \left[ \frac{17.27 \cdot T}{T+237.3} \right] \right]}{(T+237.3)^2} \quad (Ec.4.59)$$

Donde S es la pendiente de la curva en  $KPa \cdot ^\circ C^{-1}$ ; T es la temperatura media del aire ( $^\circ C$ ).

#### 4.4.4.8 La evaporación de la superficie del suelo

La superficie del suelo se divide en la superficie saturada y la superficie húmeda por  $F_{wet}$ .

La evaporación del suelo incluye el potencial de evaporación de la superficie del suelo saturado y evaporación desde la superficie húmeda del suelo. La resistencia aerodinámica total de transporte de vapor ( $R_{tot}$ ) es la suma de la resistencia de superficie ( $r_s$ ) y la resistencia aerodinámica para el transporte de vapor ( $r_v$ ) tal que  $R_{tot} = r_v + r_s$

La evaporación real del suelo ( $\lambda E_{SOIL}$ ) se calcula mediante la evaporación potencial del suelo ( $\lambda E_{SOIL\_POT}$ ) y la función de restricción de la humedad del suelo en el modelo de ET Fisher *et. al.* (2008). Esta función se basa en la hipótesis complementaria de Bouchet (1963), que define las interacciones tierra-atmósfera de VPD del aire y la humedad relativa (HR, %).

$$\lambda E_{\text{wet\_SOIL}} = \frac{(s \cdot A_{\text{SOIL}} + \rho \cdot C_p \cdot (1.0 - F_c) \cdot \frac{\text{VPD}}{r_{\text{as}}}) \cdot F_{\text{wet}}}{s + \gamma \cdot r_{\text{tot}}/r_{\text{as}}} \quad (\text{Ec.4.60})$$

$$\lambda E_{\text{SOILPOT}} = \frac{(s \cdot A_{\text{SOIL}} + \rho \cdot C_p \cdot (1.0 - F_c) \cdot \frac{\text{VPD}}{r_{\text{as}}}) \cdot (1 - F_{\text{wet}})}{s + \gamma \cdot r_{\text{tot}}/r_{\text{as}}} \quad (\text{Ec.4.61})$$

$$\lambda E_{\text{SOIL}} = \lambda E_{\text{wet\_SOIL}} + \lambda E_{\text{SOILPOT}} \cdot \left(\frac{\text{RH}}{100}\right)^{\frac{\text{VPD}}{\beta}} \quad (\text{Ec.4.62})$$

Donde  $\beta$  estaba establecida como 100 en el viejo algoritmo y modificada a 200 en el algoritmo mejorado.

#### 4.5 Antecedentes

Diferentes investigaciones en el mundo tuvieron por objetivo evaluar el producto MOD16 para distintas zonas y ecosistemas, antes y después de las mejoras hechas al algoritmo en el 2011, a continuación se resume lo obtenido por algunas de ellas, para tener un marco de comparación y poder concluir a cerca del desempeño del producto.

Sun *et. al.* (2006), evaluaron el desempeño de MOD16 en un área de 20 km x 20 km, que consiste en una estación experimental agrícola, en el norte de China; compararon los submódulos del algoritmo MOD16: radiación, resistencia del follaje y resistencia aerodinámica, con mediciones de campo; a raíz de lo anterior modificaron el algoritmo de MOD16. Concluyeron que MOD16 modificado tiene aplicaciones potenciales para estimaciones precisas de ET sobre un cultivo de trigo de invierno. Sin embargo, cuando MOD16 se usa como algoritmo para proyectar estimaciones ET, se debe trabajar más, como combinar los productos atmosféricos MODIS para mejorar la estimación de la radiación de onda corta descendente, o desarrollar algoritmos basados en sensores remotos

para estimar la resistencia del follaje, mejorar la estimación de la temperatura del aire y parametrizar la altura del dosel de la vegetación con información de teledetección.

Kim *et. al.* (2012) evaluaron MOD16 para una variedad de condiciones climáticas y tipos de cobertura de la tierra en Asia (bosque tropical, bosque mixto, pastizal de zona árida, plantación de arroz, pastizal alpino, bosque deciduo y bosque perenne), a través de la comparación de conjuntos de datos recogidos de 17 sitios de torres. Se validó la información disponible para el año 2000 hasta 2006. Consideraron buena correlación en cinco lugares ( $r = 0.50-0.76$ ; sesgo:  $-1.42$  a  $1.99 \text{ mm}\cdot 8\text{d}^{-1}$ ; RMSE:  $1.99-8.96 \text{ mm}\cdot 8\text{d}^{-1}$ ). Se observaron las mejores actuaciones del algoritmo MOD16 en lugares con cobertura de bosque continental; el sitio de pastizal en zonas áridas presentó un buen desempeño, considerando el sesgo y el error ( $r=0.12$ , Bias= $-0.04 \text{ mm}\cdot 8\text{d}^{-1}$  y RMSE= $5.76 \text{ mm}\cdot 8\text{d}^{-1}$ ), concluyendo que el producto ET mundial MODIS puede estimar ET real con una precisión razonable.

Ruhoff, *et. al.* (2013), compararon la información de dos torres de covarianza de vórtices, una establecida sobre sabana natural (2000-2002) y otra sobre plantación de caña de azúcar (2001-2002). Encontraron que las estimaciones hechas por el algoritmo MOD16 son más precisas durante la época seca y menos en la época húmeda, también observaron sobrestimaciones de ET en sabana natural, debido principalmente a diferencias en la clasificación de uso del suelo hecha por MODIS en comparación con la clasificación de campo. A escala de cuenca encontraron que MOD16 subestimó en la época húmeda, hasta el 21% anual. Concluyeron que las estimaciones MOD16 muestran mejores resultados a largo plazo, en escalas mensuales y anuales, y en áreas extensas, como las cuencas;

sugieren que el algoritmo MOD16 puede capturar razonablemente bien las respuestas de la vegetación a la variabilidad climática a gran escala.

Por otro lado, Ramoelo *et. al.* (2014), tuvo como objetivo validar el producto MOD16 usando datos de las torres Skukuza y Malopeni, instaladas en una sabana y bosques en el Parque Nacional Kruger, Sudáfrica, respectivamente, para el período de 10 años (2000-2010). Al comparar la información de Skukuza, encontraron valores de  $R^2$  desde 0.26 en 2000 hasta 0.85 en 2005. El sitio de Malopeni logró una comparación más pobre con MOD16 debido a un periodo de medición más corto, ya que se llevó a cabo la validación de datos sólo para el año 2009 ( $R^2=0.23$ ). La comparación inconsistente se atribuye, entre otras cosas, a la parametrización del modelo de Penman-Monteith y posibles errores de medición en la torre de flujo. Concluyeron que para el uso de MOD16 en la gestión del agua de Sudáfrica, es necesario realizar mejoras.

Hu, *et. al.* (2015), compararon MOD16 en una amplia gama de ecosistemas y climas en 15 torres de covarianza de vórtices para el año 2011 ubicadas a lo largo de Europa, ubicados sobre 2 sitios de cultivo con trigo de invierno y cebada de invierno respectivamente, ambos cultivos de temporal, 2 pastizales, 2 matorrales abiertos, 1 sabana y 8 sitios de bosque. Encontraron que MOD16 funciona mejor para los sitios de cultivos ( $R^2=0.81-0.82$ ) y pastizales ( $R^2=0.85-0.90$ ), ubicados en un clima templado y completamente húmedo, mientras que subestima la ET para los sitios de matorrales ( $R^2$  de 0.08-0.18) y sabanas ( $R^2=0.6$ ), ubicados en un clima semiárido.

Alvarado y Orozco (2016), compararon la variable de ET potencial del producto satelital MOD16A3 contra estimaciones de  $ET_o$ , obtenidas mediante el método de Penman Monteith, para 36 estaciones meteorológicas ubicadas en el estado de Quintana Roo,

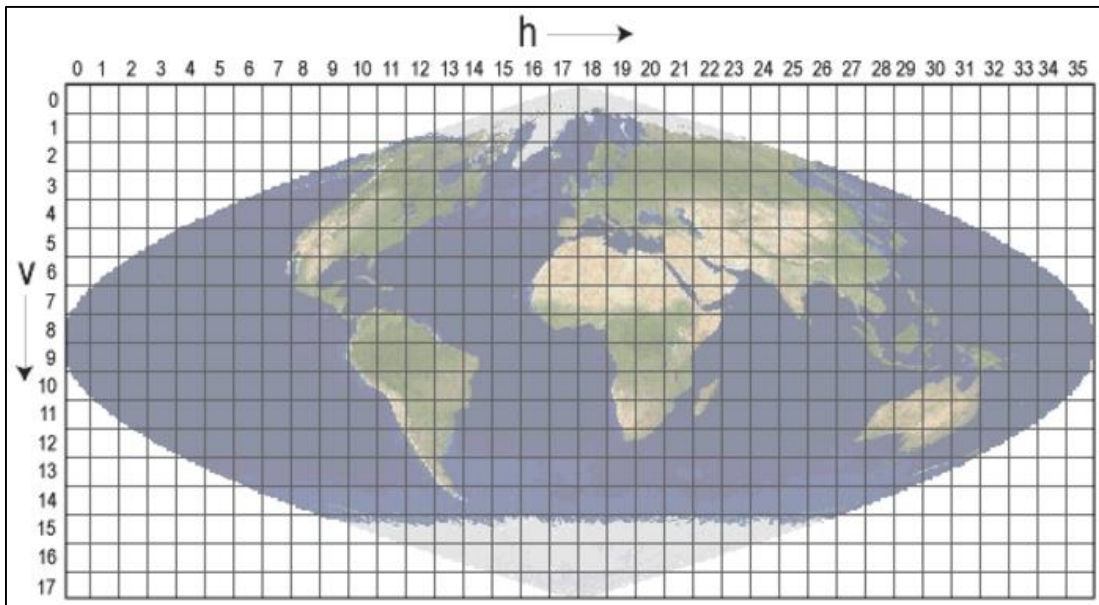


México, en el período de 2000-2012. Tras obtener un coeficiente de correlación de 0.21 ( $R^2=0.04$ ), concluyen que el producto satelital MOD16, no parece ser aplicable a la región de la Península de Yucatán, sugiriendo la modificación del algoritmo MOD16 con parámetros derivados localmente.

## 5 MATERIALES Y MÉTODOS

### 5.1 Estimación de ET mediante el algoritmo MOD16

Con la finalidad de comprender el funcionamiento y la parametrización del algoritmo MOD16, se decidió utilizarlo para estimar la ET en México, seleccionando el mosaico MODIS h08v06 (Figura 5.1), que cubre la parte central del país, además se eligió el mes de enero del año 2008, de acuerdo a la disponibilidad de información satelital. A continuación se describen las características principales de las diferentes entradas utilizadas para la estimación de la evapotranspiración.



**Figura 5.1.** Mosaicos MODIS, proyección sinusoidal

#### 5.1.1 Datos de entrada

Para estimar la evapotranspiración a través de imágenes de satélite se requirió información espacial de cada una de las variables consideradas en el proceso. Se buscó obtener la misma información que los autores utilizaron durante el desarrollo del producto satelital MOD16.

### 5.1.1.1 MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*)

MODIS es un instrumento a bordo de los satélites Aqua y Terra del sistema de observación terrestre de la NASA, el cubrimiento total de la superficie terrestre por parte de estos dos satélites se realiza en un período de 1 a 2 días, capturando datos en 36 diferentes bandas espectrales. Adquiere datos en tres resoluciones espaciales, 250 m, 500 m y 1,000 m y escala temporal diaria, 8 días, 16 días, mensual, trimestral y anual. Para descargar cualquier producto de interés, que esté incluido en la tabla de productos MODIS (Figura 5.2) ([https://lpdaac.usgs.gov/dataset\\_discovery/modis/modis\\_products\\_table](https://lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/modis/modis_products_table)), es necesario dar click sobre el nombre, para ser redireccionado al sitio con la descripción del producto seleccionado, las características de las capas que contiene, la documentación sobre el producto y en herramientas se especifica cómo acceder a la información para descarga, en la presente investigación se accedió a través de *Data Pool*; la descarga de estos datos requiere un nombre de usuario y contraseña de inicio de sesión en *Earthdata* de la NASA (<https://lpdaac.usgs.gov/>).

Find a DAAC

**LP DAAC**  
LAND PROCESSES DISTRIBUTED ACTIVE ARCHIVE CENTER

Home About Dataset Discovery Citing Our Data Tools User Resources User Services Site Search Login with Earthdata

Home > Dataset Discovery > MODIS > MODIS Products Table

## MODIS Products Table

These links will direct you to specific information and access points for each of the MODIS Land Products distributed from LP DAAC.

- ✦ Radiation Budget Variables
- ✦ Ecosystem Variables
- ✦ Land Cover Characteristics

Full List

Version 4 - 5.5 Version 6

Search:

Name	Dataset	Product	Pixel Size	Temporal Granularity
<a href="#">MCD15A2H</a>	Combined MODIS	Leaf Area Index and Fractional Photosynthetically Active Radiation	500	Composites
<a href="#">MCD15A3H</a>	Combined MODIS	Leaf Area Index and Fractional Photosynthetically Active Radiation	500	Composites

**Tools**

**Data Access**

- [Data Pool](#)
- [DAAC2Disk](#)
- [NASA Earthdata Search](#)

**Figura 5.2.** Vista de la plataforma en línea para descarga de productos MODIS

#### 5.1.1.1.1 Land Cover Type Yearly L3 Global 500 m SIN Grid (MCD12Q1)

El producto MODIS Land Cover Type proporciona datos de cinco sistemas de clasificación de la cubierta terrestre global (Anexo II), además de una evaluación del tipo de cobertura del suelo e información de control de calidad. Existe información con temporalidad anual para el período 2001-2013, con resolución espacial de 500 metros en mosaicos de ~1200 km x 1200 km (~10°x10°). Disponible en proyección Sinusoidal, en formato HDF-EOS.

#### 5.1.1.1.2 Global 1-km<sup>2</sup> MODIS Collection 5 FPAR/LAI (MOD15A2)

El índice de área foliar (IAF) y la fracción de radiación fotosintéticamente activa (0.4 -0.7 μm) absorbida por la vegetación (FPAR) caracterizan el funcionamiento del follaje y la capacidad de absorción de energía. La variable IAF define el número de capas equivalentes de hojas en relación con una unidad de área del suelo, mientras que FPAR mide la proporción de radiación disponible en las longitudes de onda fotosintéticamente activas.

El producto MOD15A2 contiene las capas de información de IAF y FPAR. La resolución temporal es de 8 días, con cobertura desde el año 2000 hasta la actualidad; resolución espacial de 1 km, en mosaicos de ~1200 km x1200 km (~10°x10°).

#### 5.1.1.1.3 Albedo 16-Day L3 Global 1km (MCD43B3)

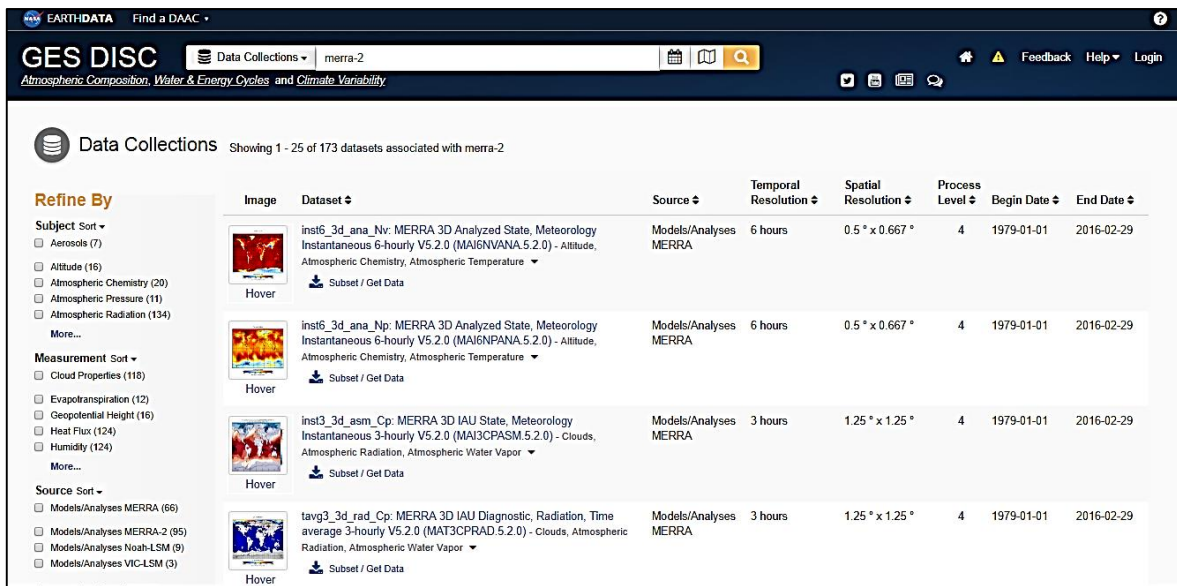
El producto de albedo, la décima capa de *White Sky Albedo*, se utilizó para calcular la radiación solar reflejada y por lo tanto la radiación solar neta entrante. El producto contiene información con resolución espacial de 1km y resolución temporal de 16 días, en mosaicos de ~10°x10°, con una cobertura temporal del año 2000 a la actualidad.

#### 5.1.1.1.4 Land Surface Temperature and Emissivity 8-Day L3 Global 1 km Grid SIN V006 (MOD11A2)

La información de temperatura de la superficie del suelo (LST) diurna y nocturna ( $^{\circ}$  K) se obtuvo del producto MOD11A2 versión 6, el cual corresponde a un promedio de 8 días para cada píxel de 1 km, en mosaicos de  $\sim 1200$  km x 1200 km. Al igual que otros productos MODIS utilizados, la cobertura temporal disponible es del año 2000 a la actualidad.

#### 5.1.1.2 GMAO (*Global Modeling and Assimilation Office*)

GMAO genera y distribuye una serie de productos que hacen un uso extensivo de las observaciones satelitales de la NASA, brindan apoyo a misiones satelitales y campañas de campo o ayudan con la planificación de nuevas misiones. MERRA (*Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications*) se publicó en 2009. Se basa en una versión del sistema de asimilación de datos atmosféricos GEOS-5 que se congeló en 2008. La versión 2 (MERRA-2) proporciona datos que comienzan en 1980. Los productos satelitales están disponibles para descarga (Figura 5.3), conociendo el nombre del producto de interés o realizando una búsqueda a través de filtros por variable, resolución espacial o temporal, etc. (<https://disc.sci.gsfc.nasa.gov/datasets?page=1&keywords=merra-2>).



**Figura 5.3.** Vista de plataforma para descarga de productos satelitales MERRA-2

Para descargar cualquier producto es necesario dar *click* sobre el nombre para ser redireccionado a la página que contiene la descripción del producto, el resumen de las características y en el extremo derecho las opciones de descarga (archivos en línea o servicios web), para lo que es necesario el mismo usuario y contraseña *Earthdata* de la NASA.

#### 5.1.1.2.1 MERRA-2 tavg1\_2d\_rad\_Nx: 2d, 1-Hourly, Time-Averaged, Single-Level, Assimilation, Radiation Diagnostics V5.12.4

La información de radiación solar entrante de onda corta (*swgdn*, por siglas en inglés), se obtuvo del producto satelital M2T1NXRAD (nombre corto), de entre 36 capas de información que contiene el producto. Se encuentra con resolución espacial de  $0.5^\circ \times 0.625^\circ$  y escala temporal horaria, para cada día del año. El formato del archivo es NetCDF, formato de archivo destinado a almacenar datos científicos multidimensionales (variables).

#### 5.1.1.3 CM SAF (*The Satellite Application Facility on Climate Monitoring*)

Para tener acceso a los productos de CM SAF y solicitarlos, se proporciona el enlace en el que el usuario puede hacerlo (<https://wui.cmsaf.eu/safira/action/viewProduktSearch>). Los productos se distribuyen a través de FTP (*Files Transfer Protocol*), un protocolo mediante el cual, el usuario tiene acceso a la información a través de carpetas de archivos; o mediante correo electrónico. Es posible hacer una conversión de archivos CM SAF HDF5 en formato NetCDF, interpolar a una cuadrícula de latitud/longitud regular y/o seleccionar subproductos. Es necesario estar registrado como usuario.

##### 5.1.1.3.1 HLW-Humedad relativa, vapor de agua y temperatura

La información de humedad relativa es un producto difícil de obtener, puesto que es una variable estimada, y sólo puede ser medida puntualmente. Se tuvo acceso al producto HLW versión 300. La información está basada en el procesamiento de los datos de la sonda acústica vertical TIROS avanzada (ATOVS) a bordo de los satélites NOAA y MetOp para recuperar los perfiles de humedad y temperatura y los productos integrados en la columna total (HSH, HLW y HTW) que proporciona el promedio mensual, en proyección cilíndrica, con resolución espacial 90 km x 90 km. ([http://www.cmsaf.eu/EN/Data\\_Access/Data\\_Access\\_node.html;jsessionid=89A35C18D24145E819A03B03C7E38098.live21303](http://www.cmsaf.eu/EN/Data_Access/Data_Access_node.html;jsessionid=89A35C18D24145E819A03B03C7E38098.live21303)).



**Figura 5.4.** Vista del navegador de productos de CM SAF

#### 5.1.1.4 INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática)

##### 5.1.1.4.1 CEM\_V3\_R120\_Nacional

El Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0) es un producto que representa las elevaciones del territorio continental mexicano, mediante valores que indican puntos sobre la superficie del terreno (X, Y) a las que se le integran valores que representan las elevaciones (Z) en metros. Se utilizó la resolución espacial de 120 m (<http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/descarga.aspx>).

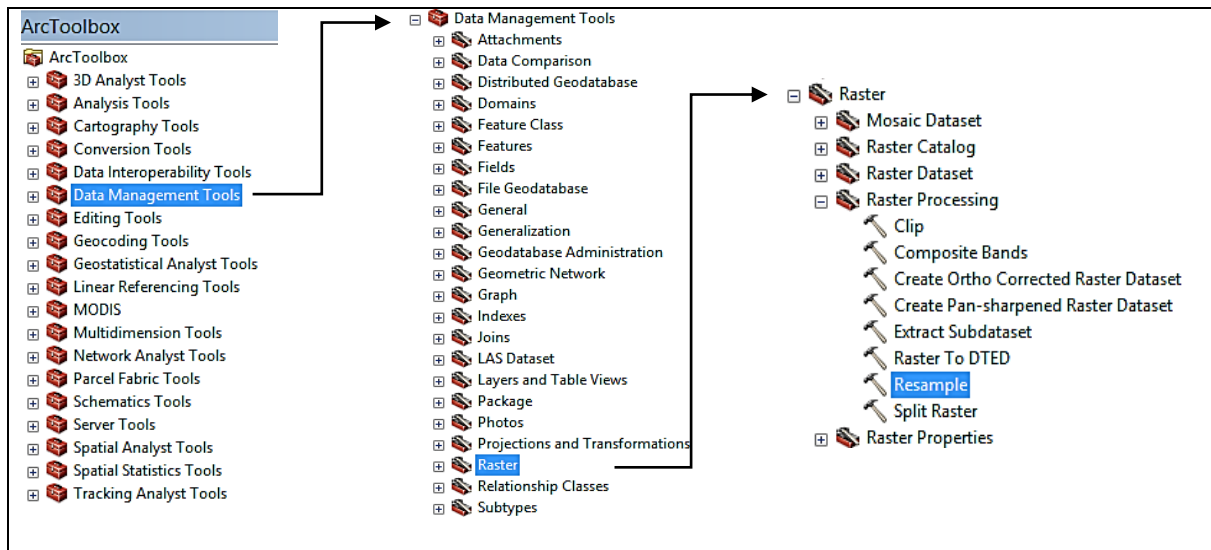




**Figura 5.5.** Vista del sitio de descarga del Continuo de Elevaciones Mexicano

### 5.1.2 Procesamiento de la información

Los productos satelitales MODIS se encuentran disponibles para descarga en las distintas plataformas mencionadas anteriormente, sin embargo antes de utilizar cada producto fue necesario aplicar un factor de escala que viene especificado una vez que se tiene acceso a él, mediante una multiplicación simple. Además, fue necesario definir la resolución espacial para estimar la ET, ya que las entradas al algoritmo van desde 120 m en el caso del Continuo de Elevaciones Mexicano, hasta 90 km en el producto satelital de humedad relativa, por lo que se recurrió al remuestreo (*resample*, en inglés), es decir, el cambio de tamaño de pixel, mediante el uso de herramientas en el software de gestión de sistemas de información geográfica, remuestreando cada producto a resolución espacial de 1 km<sup>2</sup>. Los productos satelitales cada 8 días o 16 días se promediaron para obtener un valor único para el mes; la radiación solar entrante se obtuvo a escala temporal diaria, mediante la suma de 24 horas, para el día medio del mes de enero (día 15).



**Figura 5.6.** Ubicación de herramienta *Resample*, en ArcGis.

Una vez que se aplicaron cada una de las ecuaciones especificadas en el apartado 4.4.4, sobre el algoritmo MOD16, se obtuvo una nueva imagen de satélite, que representa la ET en el mes de enero del año 2008, misma que se comparó con el producto original obtenido de la plataforma de la USGS. Para mejorar la apreciación de las imágenes satelitales y compararlas visualmente, se recurrió a la reclasificación de ambos productos, (herramienta *reclass*, utilizando las mismas clases para ambas imágenes y el método de intervalo geométrico, considerado como un método de equilibrio entre intervalo de igualdad, cortes naturales (*Jenks*) y cuantil, métodos estándar de Arcgis (Esri, 2018).

### 5.1.3 Validación de la ET estimada

Con la finalidad de comparar las imágenes satelitales, ET MOD16 (original) contra ET estimada, se recurrió a la comparación estadística, mediante la herramienta *multivariate* de Arcgis, se obtuvieron los estadísticos de la colección de bandas (las imágenes a comparar), los valores de media aritmética, desviación estándar, valor mínimo y máximo de cada imagen, así como la matriz de covarianza y correlación ( $r$ ); éste último indicó el grado de relación entre las imágenes de satélite, comparando pixel por pixel, sus valores pueden ir de

-1 a 1, mientras más se acerque a 1 se considera que se obtuvo la mejor aproximación de ET original, relación positiva o negativa.

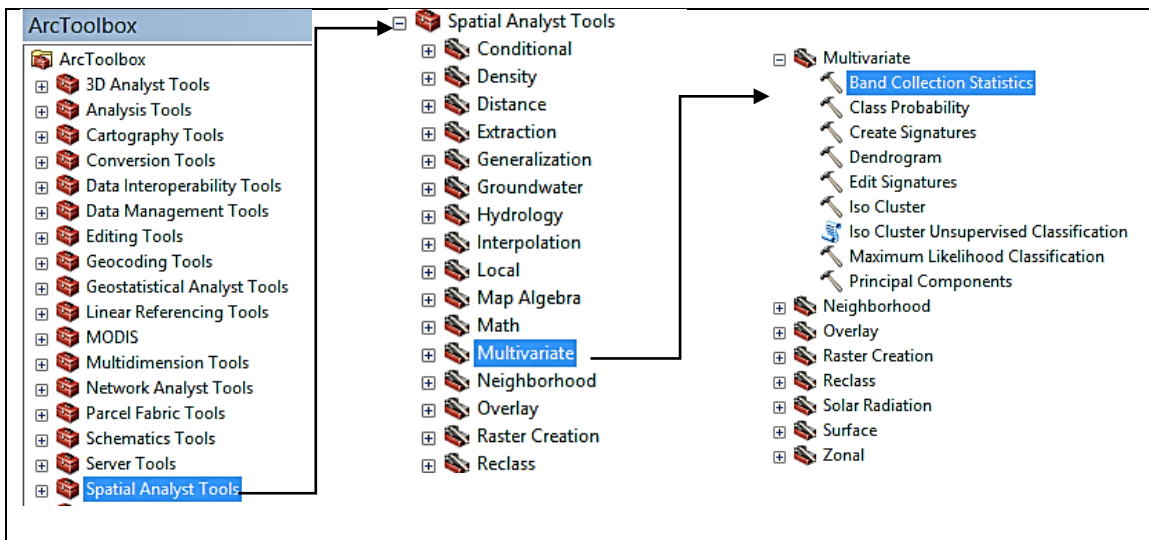


Figura 5.7. Ubicación de herramienta *Multivariate*, en ArcGis.

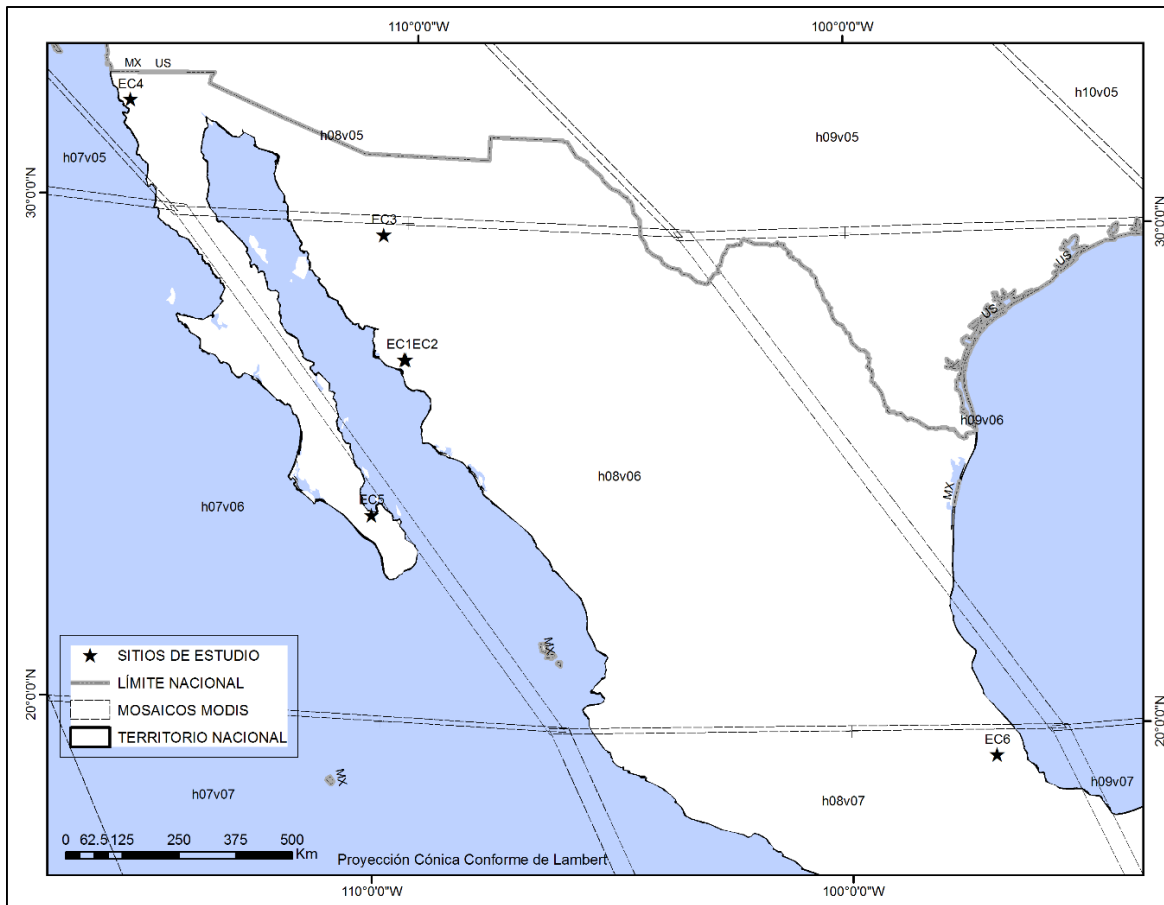
## 5.2 Sitios de Covarianza de vórtices

Se revisaron diferentes fuentes de información en busca de los resultados de mediciones de flujos de energía, mediante sistema de covarianza de vórtices, que se han llevado a cabo en México, por diferentes instituciones, investigadores o proyectos, durante el período de 2000 a 2014 (Cuadro 5.1), mismo periodo de información de MOD16 al que se tuvo acceso, a fin de compararlos.

**Cuadro 5.1.** Sitios de estudio

Sitio <sup>1</sup>	Nombre	Vegetación	Estado	Referencia
EC1	Valle de Yaqui	Cultivo: trigo	Sonora	Rodríguez, <i>et. al.</i>
EC2	Valle de Yaqui	Cultivo: trigo	Sonora	Castañeda
EC3	Rayón	Matorral	Sonora	Villareal, <i>et. al.</i>
EC4	El Mogor	Matorral	Baja California Norte	Villareal, <i>et. al.</i>
EC5	La Paz	Matorral	Baja California Sur	AmeriFlux
EC6	La Orduña	Plantación de café	Veracruz	Howerda, <i>et. al.</i>

<sup>1</sup>Sitios con instalación de sistema de covarianza de torbellinos (EC)



**Figura 5.8.** Ubicación geográfica de los sitios de medición Covarianza de vórtices (EC)

Se utilizaron los datos reportados por mediciones de 6 torres EC (Figura 5.8). Las torres EC 1 y 2 fueron ubicadas en el distrito de riego Valle del Yaqui, en el estado de Sonora; Las torres EC3, EC4 y EC5, ubicadas en ecosistemas naturales cubiertos por matorrales; y la torre EC6 instalada sobre una plantación de café. A continuación se describe brevemente las características climáticas de los sitios.

En el ciclo invierno-primavera de los años 2007-2008 se realizaron mediciones micro-meteorológicas para determinar el consumo de agua en trigo (EC1 y EC2) y otros cultivos sobre una superficie de 1,600 ha en el Valle del Yaqui, México; dichas mediciones se llevaron a cabo durante la fase experimental del Proyecto PLEIADeS (Participatory Multi-Level EO-Assisted Tools for Irrigation Water Management and Agricultural Decision-

Support) (Palacios *et. al.*, 2011). Es una zona que posee clima semiárido, con temperatura promedio de 22 °C y precipitación media anual es de 261 mm, con lluvias en verano (julio-octubre), aunque solo en los meses de agosto y septiembre sobrepasa la demanda evaporativa (Castañeda, 2013).

EC3. El sitio Rayón se encuentra al borde de la cordillera de la Sierra Madre Occidental (29.741 °N y 110.5337 °W), a 4 km al noreste de la ciudad de Rayón en Sonora, México. Este sitio tiene un clima cálido y seco, con veranos calurosos y húmedos e inviernos fríos. La temperatura media anual es de 21 °C y la precipitación anual media es de 487 mm·año<sup>-1</sup>. Cerca del 70% de la lluvia ocurre en el verano (julio- septiembre). El sitio está equipado con una torre T45 de 9 m de altura que soporta el sistema de eddy-covariance. Las mediciones de flujo se llevaron a cabo en la parte superior de la torre con un analizador de gases infrarrojos de vía abierta (IRGA, LI-7500, LI-COR) y un anemómetro sónico tridimensional (CSAT 3, Campbell Scientific).

EC4. El Mogor (dominado por la precipitación invernal) matorral ubicado a 406 m sobre el nivel del mar (msnm) en el Valle de Guadalupe, Baja California, México (32.03017 °N y 116.604219 °W) y corresponde a la asociación de matorral mediterráneo. Este sitio presenta un clima mediterráneo con veranos cálidos y secos e inviernos frescos y húmedos. Las precipitaciones ocurren durante los inviernos (noviembre-abril). El sistema de medición de flujo consistió en un analizador de gases infrarrojo de vía abierta (IRGA; LI-7500, LI-COR) y un anemómetro sónico tridimensional (81000V, Young, Traverse City, EE. UU.) ubicado a 3.5 m sobre el nivel del suelo.

EC5. Ubicado al oeste de la ciudad de La Paz, Baja California Sur, México (24'07 "N, 110'26" W) dentro de la reserva experimental del Centro de Investigaciones Biológicas del

Noroeste (CIBNOR), a 21 msnm. Consiste en un matorral abierto, dominado por la presencia de cardón de 5-7 m. Presenta un clima seco desértico. La precipitación anual es variable, ocurriendo la mayoría de eventos en los meses de agosto-septiembre, con un promedio anual de 182 mm y con una temperatura media anual de 23.6 °C, siendo julio y septiembre los meses con temperaturas más altas y abril-agosto los de mayor radiación. El sistema de medición de flujos consiste en un anemómetro-termómetro sónico tridimensional (Wind Master Pro, Gill Instruments, Lymington, UK) y un analizador de gases de vía abierta (LI-7500; LI-COR, Lincoln, NE, EE. UU.) montados en una torre a 13 metros sobre la superficie (Bell, 2012).

EC6. La Orduña es una plantación de café, localizada cerca de Coatepec, Veracruz (19°28' N y 96° 56' W) a 1210 msnm. Se pueden diferenciar dos estaciones climáticas, una estación húmeda (mayo-octubre) y otra estación seca (noviembre-abril). La temperatura media anual reportada por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) es de 19.5°C y la precipitación media anual de 1,765 mm. El sistema de medición de flujos fue instalado sobre una torre de 16 m.

### 5.3 Datos Covarianza de vórtices

Se utilizaron las mediciones de flujos de energía (flujo de calor latente LE) o ET que se reportan en los sitios de estudio descritos anteriormente. Para el caso de EC1 y EC2 se cuenta con valores de ET a escala diaria, utilizados para obtener el promedio por 8 días, para al menos tres meses del año. Por otro lado, para los sitios EC3 y EC4 se tiene acceso a las estimaciones de ET diarias para el período de 2008-2010 (Villareal, 2016), con lo que también fue posible obtener el promedio de 8 días; para EC5 se cuenta con las mediciones de LE cada 30 minutos, para el período de 2004-2006 (Ameriflux, 2017), dichos valores se

promediaron para obtener un valor medio diario, considerando como válidos los días con más de 40 mediciones y después se transformaron a valores de ET ( $\text{mm}\cdot\text{día}^{-1}$ ) utilizando el valor de  $2.45 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$  que es la energía requerida para evaporar 1 mm de agua; además fue posible obtener el promedio de ET para 8 días. Finalmente para EC6 se tiene acceso a valores de ET mensual para el año 2006 y 2007.

#### 5.4 Datos MOD16

La información satelital de MOD16ET se puede obtener mediante la herramienta creada en 2015 por el equipo de hidrología de ESRI (ESRI, 2015), la cual permite importar los datos de evapotranspiración con resolución espacial de  $1 \text{ km}^2$  y escala temporal diaria, es decir el promedio diario ( $\text{mm}\cdot\text{día}^{-1}$ ) para cada mes; del proyecto MODIS Evapotranspiración Global, de la Universidad de Montana (NTSG, 2017), se tiene acceso a la suma total de ET a nivel mensual ( $\text{mm}\cdot\text{mes}^{-1}$ ), a través del NTSG (*Numerical Terradynamic Simulation Group*) ([http://files.ntsug.umt.edu/data/NTSG\\_Products/MOD16/](http://files.ntsug.umt.edu/data/NTSG_Products/MOD16/)); el producto satelital MOD16A2, consiste en la versión más reciente de MOD16 a escala temporal de 8 días (promedio de 8 días) y resolución espacial de 500 metros (Running, 2017), dichas imágenes están disponibles en formato HDF-EOS, cada imagen cubre aproximadamente  $1200 \text{ km} \times 1200 \text{ km}$ , que corresponde a los mosaicos MODIS ([https://modis-land.gsfc.nasa.gov/MODLAND\\_grid.html](https://modis-land.gsfc.nasa.gov/MODLAND_grid.html)), los sitios de estudio se encuentran dentro de tres mosaicos (h08v06, h08v05 y h07v06). De cada uno de los archivos MOD16 ET se extrajo la capa ráster correspondiente a la variable LE, se multiplicó por el factor de escala correspondiente y el factor de equivalencia para obtener los valores promedio de ET en  $\text{mm}\cdot\text{día}^{-1}$  (el promedio de 8 días) para cada pixel correspondiente a los sitios EC, usando ArcGis 10x.

## 5.5 Análisis comparativo MOD16 contra EC

Para evaluar el desempeño de MOD16 en relación con las mediciones obtenidas mediante covarianza de vórtices (EC), se utilizaron tres parámetros de comparación de datos: 1) RMSE, la raíz del error cuadrático medio, mide la variación de los valores calculados respecto a los observados; 2) El sesgo (Bias) mide la tendencia promedio de los valores calculados, pudiendo ser valores positivos (sobreestimación) o valores negativos (subestimación), sobre los observados; 3) El índice de concordancia (d), propuesto por Willmott, representa la relación del error cuadrado medio y el error potencial. Dichos parámetros fueron calculados con las siguientes ecuaciones:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum (\text{EC} - \text{MOD16})^2}{N}} \quad (\text{Ec.5.1})$$

$$\text{Bias} = \frac{\sum (\text{MOD16} - \text{EC})}{N} \quad (\text{Ec.5.2})$$

$$d = 1 - \frac{\sum (\text{MOD16} - \text{EC})^2}{\sum (|\text{EC} - \overline{\text{MOD16}}| + |\text{MOD16} - \overline{\text{MOD16}}|)^2} \quad (\text{Ec.5.3})$$

Con la finalidad de estimar valores reales de evapotranspiración (EC) dados los valores obtenidos del producto satelital MOD16, en periodos de tiempo que no se tengan, se calcularon los estimados  $b_0$  y  $b_1$  de un modelo de ajuste para los sitios EC3, EC4 y EC5 utilizando dos años de información para calibrar y un tercero para evaluar el desempeño del modelo empírico de la recta de regresión ajustada (Walpole, 2012), dada por:

$$\hat{y} = b_0 + b_1 x \quad (\text{Ec.5.4})$$

Donde  $\hat{y}$  es el valor estimado o ajustado (EC) en función de  $x$  (MOD16). Para ello se calcularon los estimados de los coeficientes de regresión ( $b_0$  para la intersección y  $b_1$  para



la pendiente), mediante el método de mínimos cuadrados (ecuación 5.5 y 5.6), y se utilizó el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) como medida de la calidad de ajuste, entendida como la proporción de la variabilidad explicada por el modelo ajustado (ecuación 5.7).

$$b_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (\text{MOD16}_i - \overline{\text{MOD16}})(\text{EC}_i - \overline{\text{EC}})}{\sum_{i=1}^n (\text{MOD16}_i - \overline{\text{MOD16}})^2} \quad (\text{Ec.5.5})$$

$$b_0 = \overline{\text{EC}} - b_1 \overline{\text{MOD16}} \quad (\text{Ec.5.6})$$

$$R^2 = \left[ \frac{\sum (\text{MOD16} - \overline{\text{MOD16}})(\text{EC} - \overline{\text{EC}})}{\sqrt{\sum (\text{MOD16} - \overline{\text{MOD16}})^2} \sqrt{\sum (\text{EC} - \overline{\text{EC}})^2}} \right]^2 \quad (\text{Ec.5.7})$$

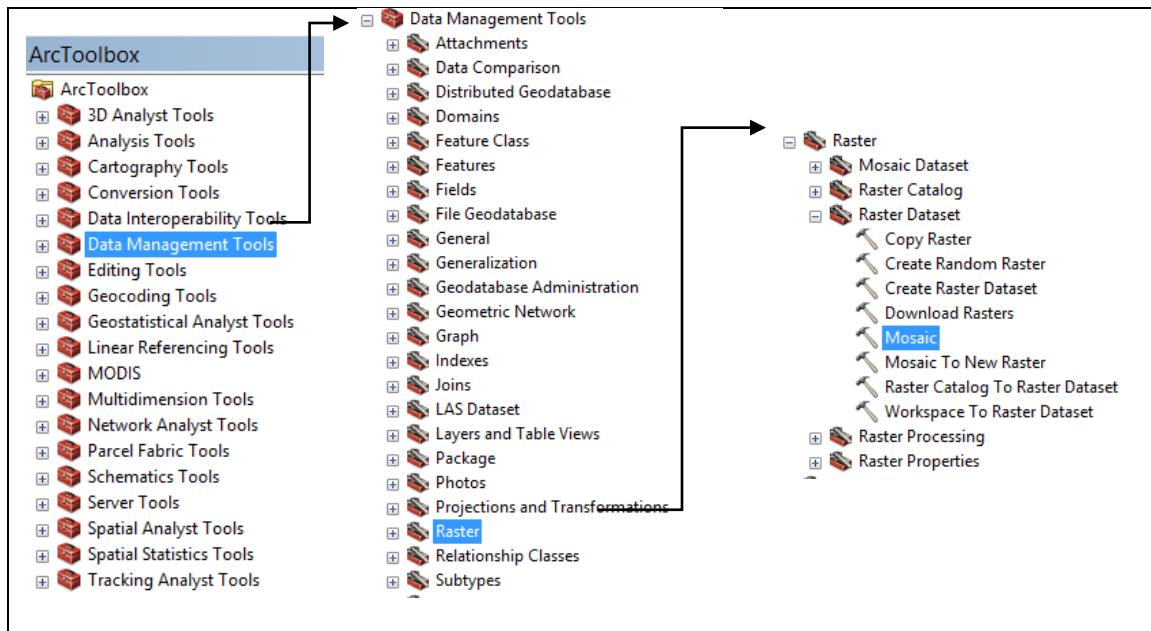
## 5.6 Generación de productos espaciales

Mediante la herramienta Plus de ArcGis es posible sumar los valores de cada pixel de dos o más imágenes de satélite. Se recurrió a la herramienta *Plus* para la obtención del promedio de la ET para 15 años (2000-2014). Para optimizar el proceso se recurrió a la ventana de *Python*, donde se ingresó un código parecido al que se muestra en la Figura 5.9, modificado para cada mes y cada uno de los 9 mosaicos, para procesar 1,620 imágenes.

```
import arcpy
... from arcpy import env
... from arcpy.sa import *
... env.workspace = "C:/modis_et/CCL/junio/h08v07"
... outPlus = ((Raster("jun_2000_h08v07_ProjectRaste.tif") +
Raster("jun_2001_h08v07_ProjectRaste.tif")+ Raster("jun_2002_h08v07_ProjectRaste.tif")+
Raster("jun_2003_h08v07_ProjectRaste.tif")+ Raster("jun_2004_h08v07_ProjectRaste.tif")+
Raster("jun_2005_h08v07_ProjectRaste.tif")+ Raster("jun_2006_h08v07_ProjectRaste.tif")+
Raster("jun_2007_h08v07_ProjectRaste.tif")+ Raster("jun_2008_h08v07_ProjectRaste.tif")+
Raster("jun_2009_h08v07_ProjectRaste.tif")+ Raster("jun_2010_h08v07_ProjectRaste.tif")+
Raster("jun_2011_h08v07_ProjectRaste.tif")+ Raster("jun_2012_h08v07_ProjectRaste.tif")+
Raster("jun_2013_h08v07_ProjectRaste.tif")+ Raster("jun_2014_h08v07_ProjectRaste.tif"))/15)
... outPlus.save("C:/modis_etp/CCL/SUMA/6_JUN/jun_h08v07.tif")
```

**Figura 5.9.** Ejemplo de código en *Python*, para obtener el promedio de ET

Para facilitar el manejo de la información se generó un mosaico, resultado de unir los 9 mosaicos MODIS, en una sola imagen, que cubriera el territorio de México, para ello se recurrió a la herramienta *Mosaic*, para obtener primeramente el mosaico de ET en  $\text{mm}\cdot\text{día}^{-1}$ , ET en  $\text{mm}\cdot\text{mes}^{-1}$  y ET en  $\text{mm}\cdot\text{año}^{-1}$ .

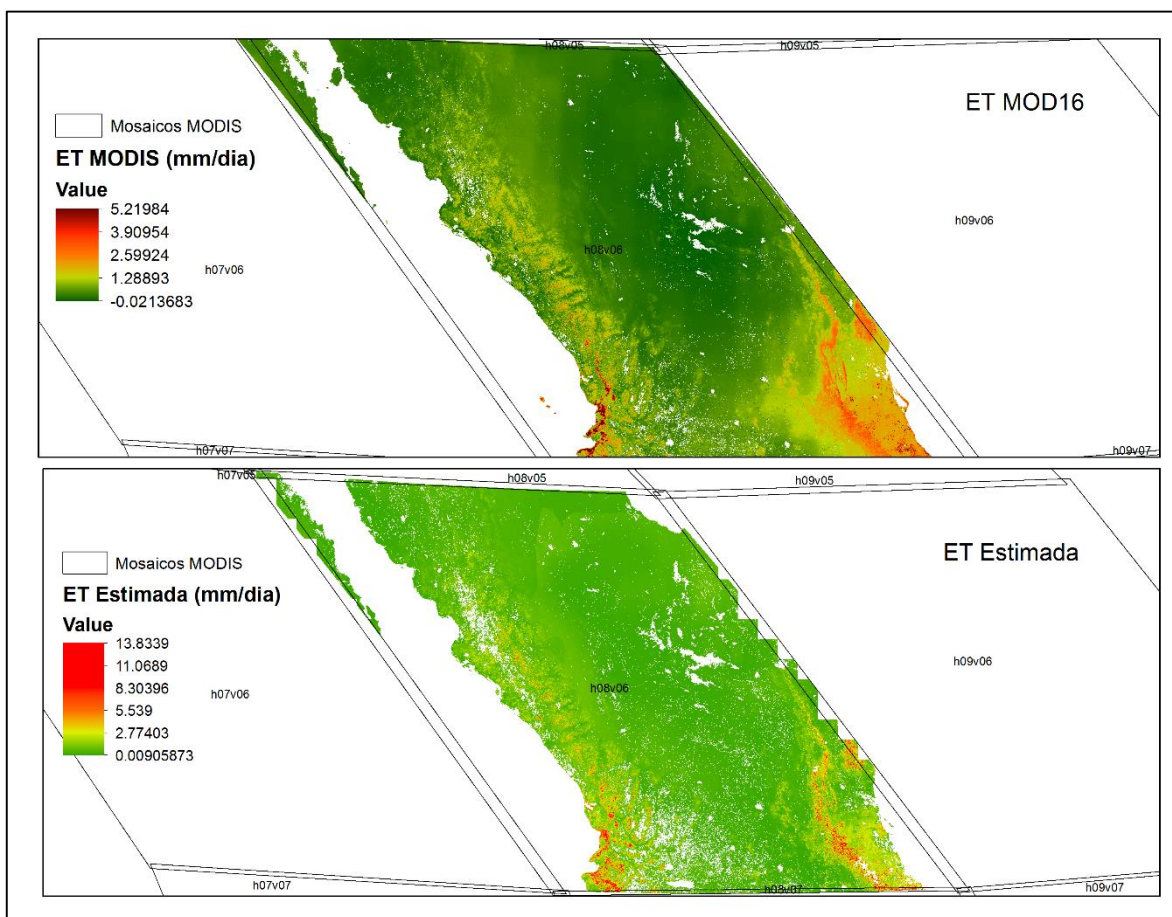


**Figura 5.10.** Ubicación de herramienta *Mosaic*, en ArcGis.

## 6 RESULTADOS

### 6.1 Estimación de la ET mediante el algoritmo MOD16

Se estimó la ET en  $\text{mm}\cdot\text{día}^{-1}$ , para el mes de enero de 2008, en el mosaico MODIS h08v06, que cubre el centro de México (Figura 6.1), de acuerdo con el algoritmo MOD16 (Mu *et. al.*, 2011), descrito en el apartado 4.4.4 de la presente investigación, para su posterior validación, con respecto al producto satelital disponible en la plataforma de la USGS.



**Figura 6.1.** Visualización de ET MOD16 contra ET Estimada

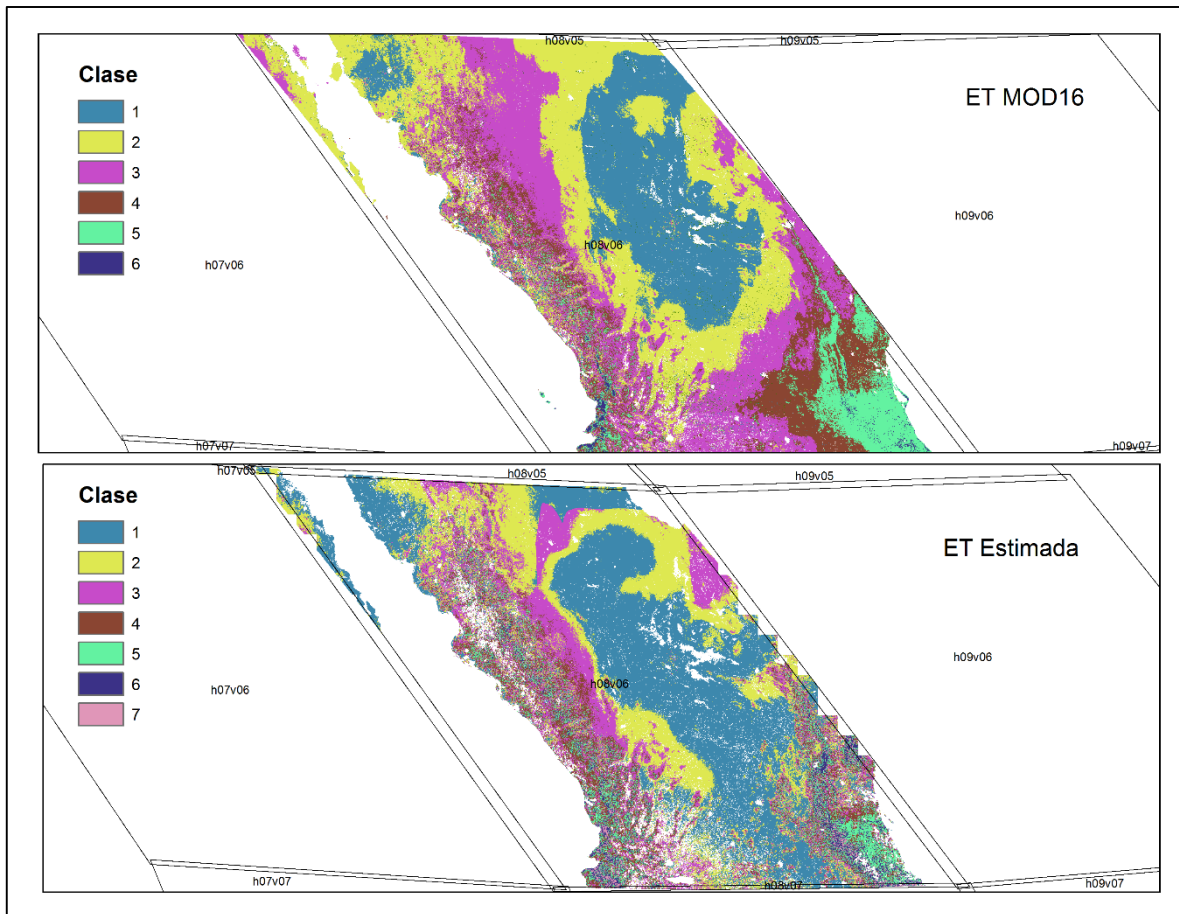
Para mejorar la apreciación de las imágenes satelitales y poder ser comparadas visualmente, se reclasificaron ambos productos, utilizando las mismas primeras 6 clases, con la diferencia que en el inicio de la clase 1, se consideraron los valores mínimos para ET MODIS ( $-0.021 \text{ mm}\cdot\text{día}^{-1}$ ) y ET Estimada ( $0.009 \text{ mm}\cdot\text{día}^{-1}$ ); en el caso de la ET estimada

(resultado de replicar el algoritmo), se incluyó una séptima clase que abarcó desde el valor máximo de MOD16 ( $5.219843 \text{ mm}\cdot\text{dia}^{-1}$ ) hasta el valor máximo estimado ( $13.8339 \text{ mm}\cdot\text{dia}^{-1}$ ), como se muestra en el Cuadro 6.1.

**Cuadro 6.1.** Clases de ET ( $\text{mm}\cdot\text{dia}^{-1}$ ) para reclasificación

Clase	Valores ET ( $\text{mm}\cdot\text{dia}^{-1}$ )
1	Mínimo -0.351713
2	0.351713-0.554098
3	0.554098-0.92718
4	0.92718-1.614927
5	1.614927-2.882735
6	2.882735-5.219843
7	5.219843-13.83391

Una vez aplicada la reclasificación, se puede observar de mejor forma el comportamiento de la ET y la distribución en el área estimada, observando la mayor similitud en la zona norte (Chihuahua, Coahuila, Durango y Sinaloa) y las evidentes diferencias en Baja California, donde se observa que los valores de ET Estimada son menores a los valores de MOD16, lo mismo que ocurrió en la zona central de San Luis, Zacatecas, Aguascalientes y Guanajuato (Figura 6.2).



**Figura 6.2.** Reclasificación de la ET MOD16 y ET Estimada

## 6.2 Validación de la ET Estimada

A partir de la comparación estadística, pixel por pixel, de las imágenes satelitales original y estimada, mediante la herramienta *multivariate* de Arcgis, se obtuvieron los estadísticos de la colección de bandas (Cuadro 6.2), donde se observa que la ET Estimada tiene una mayor dispersión con respecto a la media aritmética; el coeficiente de correlación ( $r = 0.69$ ), que indica una alta relación entre los valores estimados, a pesar de que se siguió el procedimiento de estimación de MOD16, no fue posible obtener los mismos productos satelitales de entrada, por lo que se atribuye no obtener el 100% de correlación principalmente al producto de humedad relativa y radiación solar entrante, así como a los

procesos de remuestreo y relleno de datos faltantes, éste último no se llevó a cabo en el proceso de estimación.

**Cuadro 6.2.** Estadísticos de correlación de imágenes de satélite

Imagen	Mínimo	Máximo	Media	Desviación estándar	R
ET Estimada	0.0091	13.8339	0.7371	1.0187	0.69956
ET MOD16	-0.0214	5.2198	0.7205	0.5409	

### 6.3 Comparación de pares de datos

Para evaluar el desempeño de MOD16, se compararon pares de datos de ET, a escala diaria y mensual, obtenidos de sitios de medición mediante covarianza de vórtices (EC), considerados como los valores reales (y) y la información del pixel correspondiente en la imagen de satélite, como la variable estimada (x).

#### 6.3.1 Evapotranspiración ( $\text{mm}\cdot\text{día}^{-1}$ )

En el sitio EC1, el promedio de ET MOD16 fue de  $2.76\pm 1.29 \text{ mm}\cdot\text{día}^{-1}$ , mientras que lo reportado por EC fue de  $2.65\pm 0.97 \text{ mm}\cdot\text{día}^{-1}$ . Para el sitio EC2, el promedio MOD16 fue de  $2.65\pm 1.8 \text{ mm}\cdot\text{día}^{-1}$ , pero el reportado por EC fue de  $4.01\pm 1.44 \text{ mm}\cdot\text{día}^{-1}$ . En EC3, en el año 2008, el promedio de ET obtenido de MOD16 fue de  $1.28\pm 1.06 \text{ mm}\cdot\text{día}^{-1}$ , mientras que el promedio de ET mediante EC fue de  $1.85\pm 1.42 \text{ mm}\cdot\text{día}^{-1}$ . Para el año 2009 del mismo sitio, la ET promedio de MOD16 fue de  $0.61\pm 0.78 \text{ mm}\cdot\text{día}^{-1}$ , mientras que el promedio de ET de EC fue de  $0.92\pm 1.09 \text{ mm}\cdot\text{día}^{-1}$ , y para el tercer año de estudio de EC3, el promedio de ET obtenido de MOD16 fue de  $0.75\pm 0.87 \text{ mm}\cdot\text{día}^{-1}$  mientras que para EC de  $1.32\pm 0.87 \text{ mm}\cdot\text{día}^{-1}$ . En el sitio EC4, se analizaron tres años, para el año 2008, el promedio de ET de MOD16 fue de  $0.87\pm 0.41 \text{ mm}\cdot\text{día}^{-1}$ , y de  $0.85\pm 0.47 \text{ mm}\cdot\text{día}^{-1}$  reportado por EC; en el año 2009 se encontró que el promedio reportado por MOD16 fue de  $0.79\pm 0.309 \text{ mm}\cdot\text{día}^{-1}$  mientras que el obtenido mediante EC fue de  $0.88\pm 0.55 \text{ mm}\cdot\text{día}^{-1}$ ; en el tercer año de

estudio de EC4 se obtuvo un promedio de  $1.11 \pm 0.41 \text{ mm} \cdot \text{día}^{-1}$  y para EC se encontró un promedio de  $1.16 \pm 0.51 \text{ mm} \cdot \text{día}^{-1}$ . Finalmente en el sitio EC5, para el año 2004, MOD16 reportó un promedio de ET de  $0.64 \pm 0.23 \text{ mm} \cdot \text{día}^{-1}$ , mientras que EC  $0.87 \pm 0.45 \text{ mm} \cdot \text{día}^{-1}$ ; en el año 2005 se encontró un promedio de ET para MOD16 de  $0.53 \pm 0.14 \text{ mm} \cdot \text{día}^{-1}$  y para EC de  $0.57 \pm 0.25 \text{ mm} \cdot \text{día}^{-1}$ ; para el tercer año, 2006, MOD16 promedió la ET en  $0.49 \pm 0.24 \text{ mm} \cdot \text{día}^{-1}$  mientras que EC reportó  $0.76 \pm 0.63 \text{ mm} \cdot \text{día}^{-1}$ .

Para los sitios EC1 y EC2, correspondientes a cultivo de trigo, se cuenta con apenas la tercera y quinta parte de información de los períodos de 8 días durante el año (Cuadro 6.3), la mayor deficiencia con respecto al RMSE se observó en el sitio con menor número de datos ( $\text{RMSE}=1.85 \text{ mm} \cdot \text{día}^{-1}$ ), a pesar de mostrar un índice aceptable de concordancia ( $d=0.72$ ), se explica solo el 58% de la variabilidad ( $R^2=0.58$ ), mucho menor que en EC1 donde se tiene el doble de mediciones y se observa un mejor desempeño ( $d=0.90$  y  $R^2=0.72$ ). Para el caso de los sitios cubiertos por matorrales, EC3 y EC4 presentan el mejor desempeño en 2009, ya que se observa el menor error y el mayor índice de concordancia entre los datos ( $\text{RMSE}=0.58 \text{ mm} \cdot \text{día}^{-1}$ ,  $d=0.90$  y  $\text{RMSE}=0.37 \text{ mm} \cdot \text{día}^{-1}$ ,  $d=0.79$  respectivamente) aunque en el caso de EC4, sólo se explica el 60% de la variabilidad en los datos comparado con el 84% que se logra en EC3. En el sitio EC5, se observó un deficiente desempeño de MOD16 para los tres años en estudio, siendo el mejor año el 2006, a pesar de mostrar el mayor error ( $\text{RMSE}=0.52 \text{ mm} \cdot \text{día}^{-1}$ ), se encontró la mejor concordancia ( $d=0.65$ ) y el mayor coeficiente de determinación ( $R^2=0.69$ ); en este sitio se observó una gran variabilidad en la información, que en el año 2005 se explica apenas en un 4%, convirtiendo a ese año en el más bajo desempeño de MOD16. De manera general MOD16

subestimó los valores de ET, excepto en EC1 y EC4 en el año 2008, donde apenas sobreestimó la ET (BIAS=0.11 mm·dia<sup>-1</sup>, BIAS=0.02 mm·dia<sup>-1</sup> respectivamente).

**Cuadro 6.3.** Evaluación del desempeño de MOD16 en relación con EC (mm·dia<sup>-1</sup>)

Sitio	Nombre	Año	Número de	RMSE	BIAS	d	R <sup>2</sup>
			Datos <sup>1</sup>	mm·dia <sup>-1</sup>	mm·dia <sup>-1</sup>		
EC1	Valle Yaqui	2008	15	0.68	0.11	0.90	0.72
EC2	Valle Yaqui	2008	8	1.85	-1.48	0.72	0.58
EC3	Rayón	2008	19	0.85	-0.57	0.88	0.93
		2009	42	0.58	-0.31	0.90	0.84
		2010	43	0.88	-0.56	0.86	0.88
EC4	El Mogor	2008	39	0.41	0.02	0.74	0.30
		2009	40	0.37	-0.09	0.79	0.60
		2010	41	0.38	-0.04	0.81	0.46
EC5	La Paz	2004	32	0.42	-0.23	0.62	0.41
		2005	34	0.26	-0.04	0.48	0.04
		2006	37	0.52	-0.27	0.65	0.69

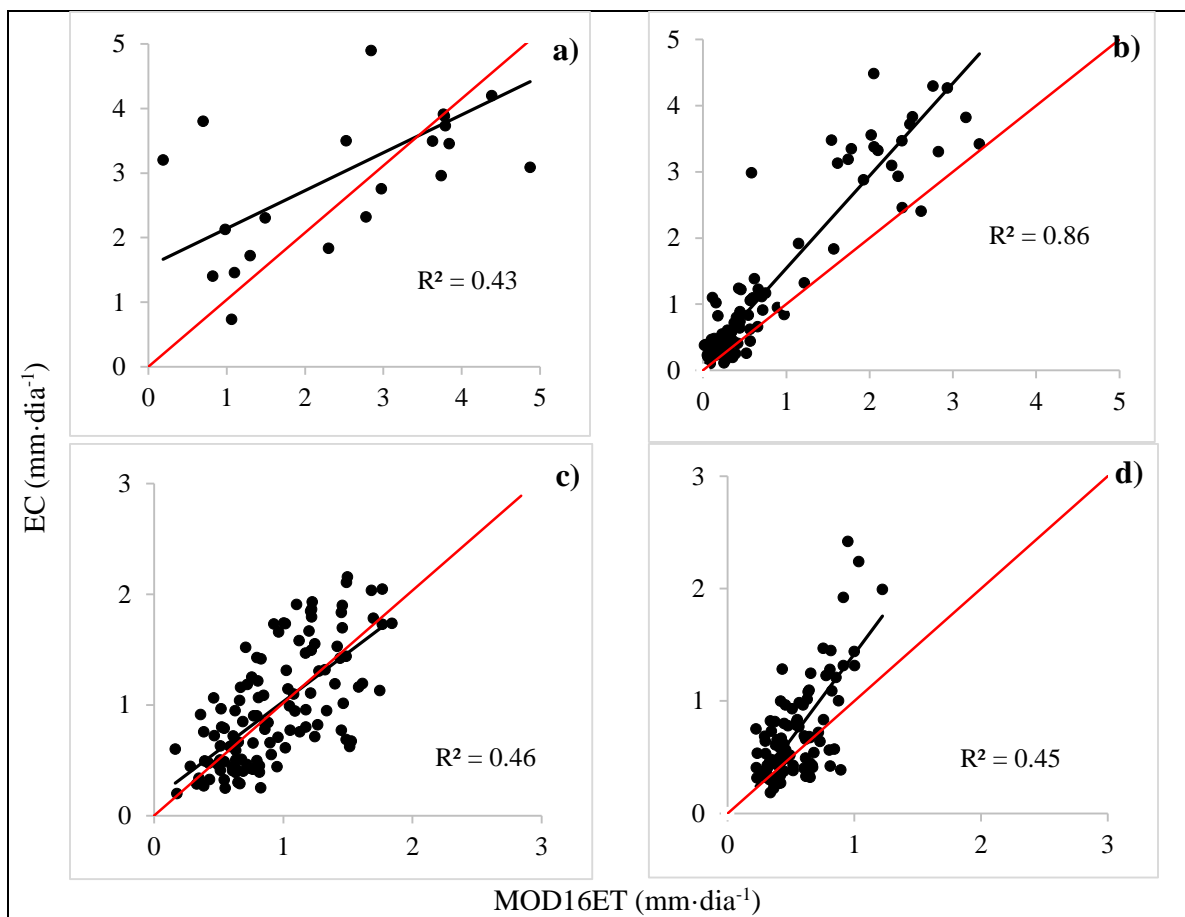
<sup>1</sup> Un año completo de información MOD16, consiste en 45 datos del promedio ET (mm·dia<sup>-1</sup>).

Al analizar el desempeño de MOD16 agrupando los sitios EC1 y EC2 en comparación con EC3, EC4 y EC5, considerando la totalidad de datos de ET, es decir EC3 y EC4 de 2008-2010 y EC5 de 2004-2006, se encontró que el promedio dado por MOD16 en los sitios EC1 y EC2, fue de 2.69±1.45 mm·dia<sup>-1</sup> y lo reportado por EC fue un promedio de 3.13±1.31 mm·dia<sup>-1</sup>; en el sitio EC3, se obtuvo un promedio de ET de 0.79±0.89 mm·dia<sup>-1</sup>, reportado por MOD16, mientras que EC estimó un promedio de 1.25±1.35 mm·dia<sup>-1</sup>; en el sitio EC4 se obtuvo un promedio de 0.93±0.4 mm·dia<sup>-1</sup>, para MOD16, mientras que para EC fue de 0.97±0.52 mm·dia<sup>-1</sup>; finalmente en el sitio EC5 se obtuvo un promedio de 0.55±0.21 mm·dia<sup>-1</sup>, mientras que EC reportó un promedio de 0.73±0.48 mm·dia<sup>-1</sup>.

se observó el mejor desempeño en EC3, a pesar de presentar un error alto (RMSE =0.77 mm·día<sup>-1</sup>) mostró los más altos índices de concordancia y coeficiente de determinación (d=0.88 y R<sup>2</sup>=0.86) EC4 y EC5 presentaron errores y coeficientes de determinación



cercanos entre sí ( $RMSE=0.39 \text{ mm}\cdot\text{día}^{-1}$ ,  $R^2=0.46$  y  $RMSE=0.42 \text{ mm}\cdot\text{día}^{-1}$ ,  $R^2=0.45$ , respectivamente) aunque los datos presentaron mayor concordancia en EC4 ( $d=0.80$ ) que en EC5 ( $d=0.62$ ), además de mostrar una distribución diferente (Figura 6.3). El desempeño más pobre se observó al agrupar EC1 y EC2, sitios ubicados en cultivo de trigo ( $RMSE=1.22 \text{ mm}\cdot\text{día}^{-1}$ ,  $BIAS= -0.44 \text{ mm}\cdot\text{día}^{-1}$ ,  $d=0.78$ ). En todos los casos MOD16 subestimó los valores de ET. En la Figura 6.3 se observa la dispersión que existe entre los datos, MOD16 como la variable estimada (x) y EC como los valores reales (y), así como la línea de ajuste del modelo y la línea 1:1: a) Valle del Yaqui (agrupación EC1 y EC2), b) Rayón (EC3), c) El Mogor (EC4) y d) La Paz (EC5).



**Figura 6.3.** Dispersión de ET ( $\text{mm}\cdot\text{día}^{-1}$ ) MOD16 contra EC

### 6.3.2 Evapotranspiración ( $\text{mm}\cdot\text{mes}^{-1}$ )

Para los sitios EC1 y EC2, correspondientes a cultivo de trigo, se cuenta con apenas la tercera parte de información mensual, para el año correspondiente Cuadro 6.4), lo mismo ocurre en EC6, para el año 2006. En el sitio EC3 se tiene la mitad de los datos para el año 2008 y 2/3 partes de los datos posibles en EC6 para el año 2008. Se observaron los más altos coeficientes de determinación en los sitios y años con menor número de datos, sin embargo se debe tomar con reserva. Para los sitios de cultivo de trigo, EC1 presentó un coeficiente de determinación de 0.93, pero con un dato más, EC2 presentó un coeficiente de apenas 0.85. El mejor desempeño con respecto al RMSE se observó en el sitio EC5, en el año 2005 ( $\text{RMSE}=8.29 \text{ mm}\cdot\text{mes}^{-1}$ ), pero mostró el índice de concordancia y el coeficiente de determinación más bajos ( $d=0.52$ ,  $R^2=0.59$ ). Para el caso de los sitios cubiertos por matorrales, con datos completos y considerando más de un parámetro, EC3 presentó el mejor desempeño en 2009, ya que se observó el mayor índice de concordancia ( $d=0.92$ ) y se explica el 93% de la variabilidad en los datos. En el sitio EC4, se observó un deficiente desempeño de MOD16 para los tres años en estudio, siendo el más bajo en el año el 2008, a pesar de mostrar el menor sesgo ( $\text{BIAS}=-5.24 \text{ mm}\cdot\text{mes}^{-1}$ ), se encontró la menor concordancia ( $d=0.74$ ) y el menor coeficiente de determinación ( $R^2=0.51$ ). De manera general MOD16 subestimó los valores de ET, excepto en EC6, donde evidentemente MOD16 sobreestimó la ET, para los tres años de estudio.

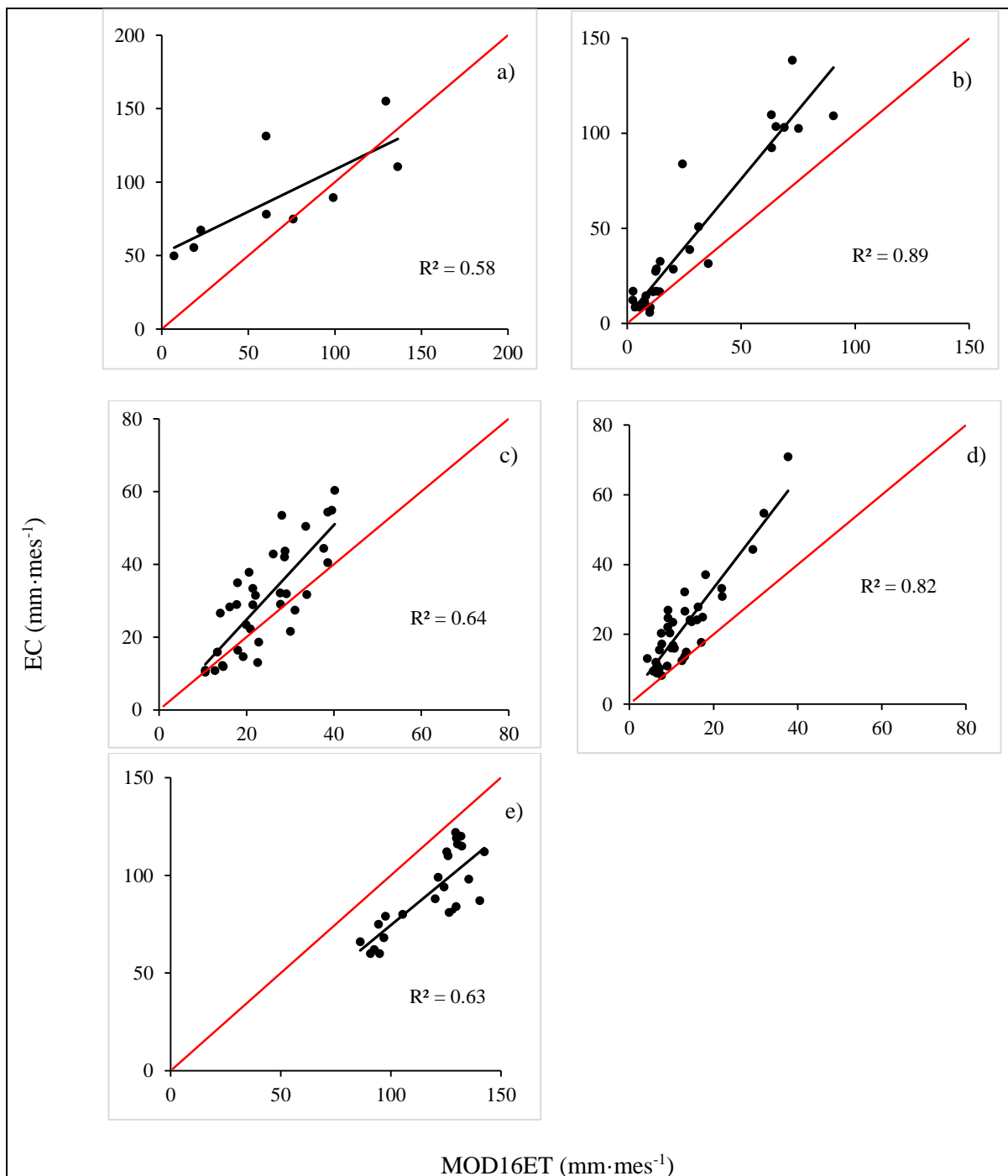
**Cuadro 6.4.** Evaluación del desempeño de MOD16 en relación con EC ( $\text{mm}\cdot\text{mes}^{-1}$ )

SITIO	NOMBRE	Año	Datos <sup>1</sup>	RMSE	BIAS	d	R <sup>2</sup>
				$\text{mm}\cdot\text{mes}^{-1}$	$\text{mm}\cdot\text{mes}^{-1}$		
EC1	Valle Yaqui	2008	4	24.18	-6.69	0.85	0.93
EC2	Valle Yaqui	2008	5	43.79	-34.78	0.76	0.66
EC3	Rayón	2008	6	20.12	-16.52	0.93	0.97
		2009	12	15.53	-9.09	0.92	0.93
		2010	12	30.57	-21.03	0.79	0.91
EC4	El Mogor	2008	12	10.59	-5.24	0.74	0.51
		2009	12	11.29	-6.36	0.76	0.68
		2010	12	10.21	-6.68	0.78	0.67
EC5	La Paz	2004	12	12.55	-10.87	0.66	0.70
		2005	12	8.29	-6.26	0.52	0.49
		2006	12	13.63	-11.01	0.79	0.93
EC6	La Orduña	2006	4	19.11	18.81	0.79	0.97
		2007	12	31.84	29.42	0.61	0.62
		2008	8	29.96	26.69	0.61	0.59

<sup>1</sup> Un año completo de información MOD16, consiste en 12 datos de la suma de ET ( $\text{mm}\cdot\text{mes}^{-1}$ ).

Al analizar el desempeño de MOD16 agrupando los sitios EC1 y EC2 en comparación con EC3, EC4, EC5 y EC6 considerando la totalidad de datos, es decir EC3 y EC4 de 2008-2010, EC5 de 2004-2006 y EC6 de 2006-2008, se observó el mejor desempeño en EC3, a pesar de presentar un error alto ( $\text{RMSE}=23.48 \text{ mm}\cdot\text{mes}^{-1}$ ) mostró los más altos índices de concordancia y coeficiente de determinación ( $d=0.89$  y  $R^2=0.89$ ), seguido de EC4 ( $\text{RMSE}=10.70 \text{ mm}\cdot\text{mes}^{-1}$ ,  $\text{BIAS}=-6.09 \text{ mm}\cdot\text{mes}^{-1}$ ,  $d=0.78$  y  $R^2=0.64$ ) y EC5 ( $\text{RMSE}=11.72 \text{ mm}\cdot\text{mes}^{-1}$ ,  $\text{BIAS}=-9.38 \text{ mm}\cdot\text{mes}^{-1}$ ,  $d=0.74$  y  $R^2=0.82$ ). El desempeño más pobre se observó al agrupar EC1 y EC2, sitios ubicados en cultivo de trigo ( $\text{RMSE}=36.40 \text{ mm}\cdot\text{mes}^{-1}$ ,  $\text{BIAS}=-22.30 \text{ mm}\cdot\text{mes}^{-1}$ ) aunque presentó un índice de concordancia aceptable ( $d=0.78$ ), seguido de EC6, con el menor índice de concordancia ( $d=0.63$ ) y de los más altos errores y sesgo ( $\text{RMSE}=29.44 \text{ mm}\cdot\text{mes}^{-1}$ ,  $\text{BIAS}=-26.74 \text{ mm}\cdot\text{mes}^{-1}$ ). En el sitio EC6, correspondiente a plantación de café, se observó que MOD16 subestimó la ET. En la Figura 6.4 se observa la dispersión que existe entre los datos, MOD16 como la variable estimada (x) y EC como los

valores reales (y), así como la línea de ajuste del modelo y la línea 1:1: a) Valle del Yaqui (agrupación EC1 y EC2), b) Rayón (EC3), c) El Mogor (EC4), d) La Paz (EC5) y e) La Orduña (EC6).



**Figura 6.4.** Dispersión de ET (mm·mes<sup>-1</sup>) MOD16 contra EC

## 6.4 Análisis de regresión

### 6.4.1 Evapotranspiración ( $\text{mm}\cdot\text{día}^{-1}$ )

Se calcularon los estimados  $b_0$  y  $b_1$  de un modelo de ajuste lineal para los sitios EC3, EC4 y EC5 (Cuadro 6.5) promediando los valores de ET reportados por MOD16 y EC para el año 1 y el año 2, excepto en EC3, ya que se descartó el uso del año 1 debido a la falta de datos. El mayor ajuste de modelo se observa en EC3, sin embargo ninguno de los tres modelos logró explicar más del 70% de la variabilidad de la información. Los estimados  $b_1$  muestran claramente la subestimación de MOD16 en los tres modelos.

**Cuadro 6.5.** Estimados de intersección y pendiente de modelo de ajuste de la ET ( $\text{mm}\cdot\text{día}^{-1}$ )

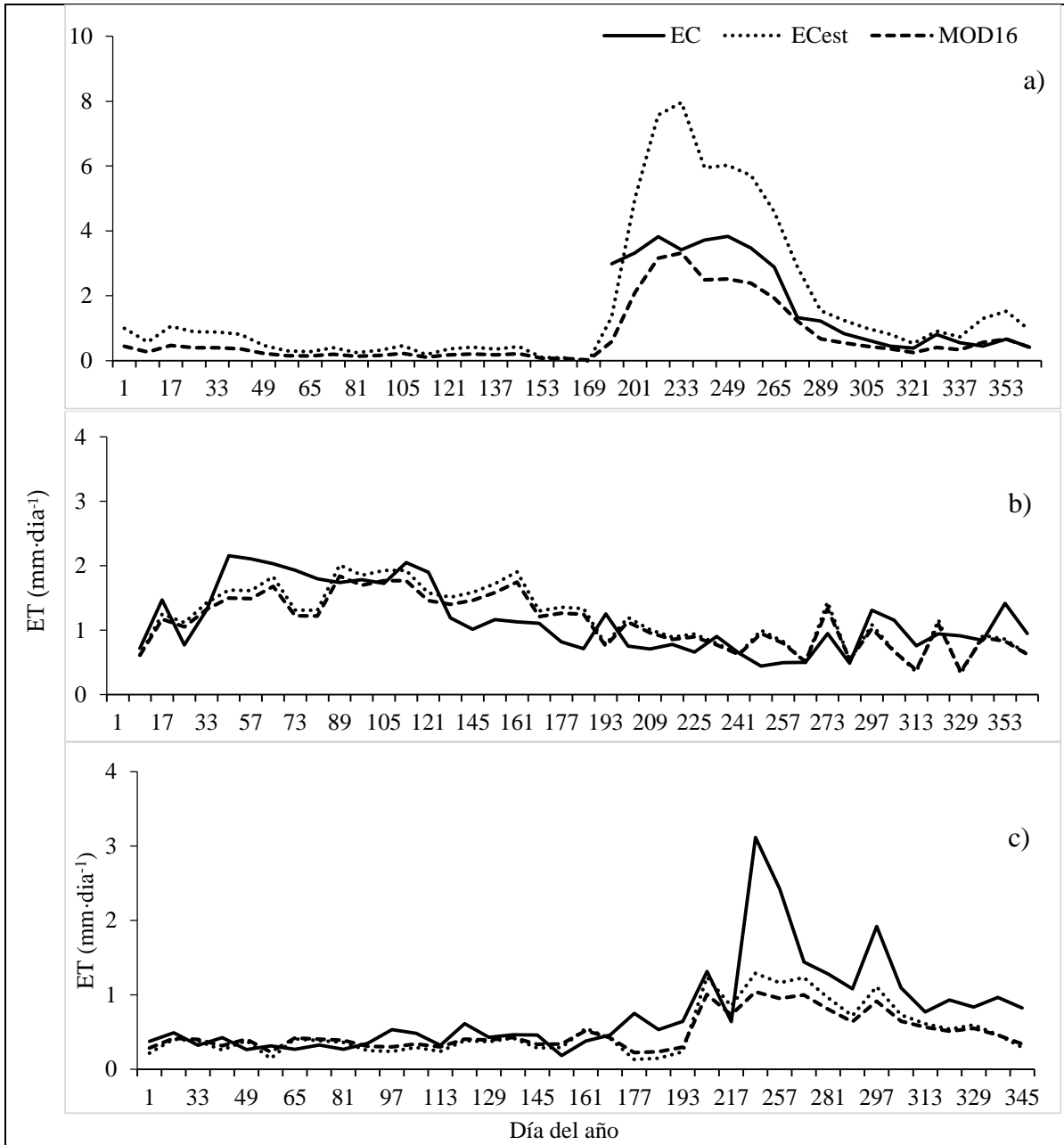
Sitio	Nombre	Número de Datos <sup>1</sup>	Año	$b_0$	$b_1$	$R^2$
EC3	Rayón	36	2009-2010	-0.18	2.58	0.71
EC4	El Mogor	33	2008-2009	-0.08	1.14	0.69
EC5	La Paz	23	2004-2005	-0.19	1.42	0.69

<sup>1</sup>Pares de datos promediados

Los modelos generados se aplicaron para estimar valores de EC (ECest), para el año 2008 en Rayón (EC3), año 2010 en El Mogor (EC4) y el año 2006 en La Paz (EC5) y se compararon con los valores reales de EC. Se observó el mejor desempeño del modelo aplicado en EC4, considerando el error, sesgo y el índice de concordancia (Cuadro 6.6), observando solo el RMSE, el desempeño más pobre se observa en el sitio EC3, ya que comparado con los otros dos sitios, el error es muy alto ( $\text{RMSE}=1.82 \text{ mm}\cdot\text{día}^{-1}$ ), sin embargo al observar la serie de tiempo (Figura 6.5a) es evidente que es en la época de lluvia (verano) donde el modelo sobreestimó la ET en mayor medida, debido a que MOD16 tuvo un pobre desempeño en ese periodo, contrario a lo que sucedió en EC5 (Figura 6.5c), donde en la época de lluvia (verano) el modelo subestimó la ET; por otro lado en EC4 no se observó ningún patrón definido durante todo el año (Figura 6.5b).

**Cuadro 6.6.** Evaluación del desempeño de los modelos de ajuste de la ET ( $\text{mm}\cdot\text{día}^{-1}$ )

Sitio	Nombre	Año	RMSE $\text{mm}\cdot\text{día}^{-1}$	BIAS $\text{mm}\cdot\text{día}^{-1}$	d
EC3	Rayón	2008	1.82	1.18	0.79
EC4	El Mogor	2010	0.39	0.03	0.82
EC5	La Paz	2006	0.46	-0.25	0.77



**Figura 6.5.** Series de tiempo de la Evapotranspiración ( $\text{mm}\cdot\text{día}^{-1}$ )

#### 6.4.2 Evapotranspiración ( $\text{mm}\cdot\text{mes}^{-1}$ )

Se calcularon los estimados  $b_0$  y  $b_1$  de un modelo de ajuste lineal para los sitios EC3, EC4 y EC5 (Cuadro 6.7) promediando los valores de ET reportados por MOD16 y EC para el año 1 y el año 2, excepto en EC3, ya que se descartó el uso del año 1 debido a la falta de datos. En el caso de EC6 solo se utilizó la información de un año completo. El mayor ajuste de modelo se observa en EC3, explicando el 95% de la variabilidad; el desempeño más pobre se encontró en EC6. Los estimados  $b_1$  muestran claramente la subestimación de MOD16 en EC1, EC2 y EC3, así como la sobreestimación en EC6.

**Cuadro 6.7.** Estimados de intersección y pendiente de modelo de ajuste de la ET ( $\text{mm}\cdot\text{mes}^{-1}$ )

Sitio	Nombre	Número de datos	Año <sup>1</sup>	$b_0$	$b_1$	$R^2$
EC3	Rayón	12	2009-2010	0.78	1.68	0.95
EC4	El Mogor	12	2008-2009	-2.94	1.4	0.72
EC5	La Paz	12	2004-2005	-1.19	1.72	0.82
EC6	La Orduña	12	2007	-18.53	0.91	0.62

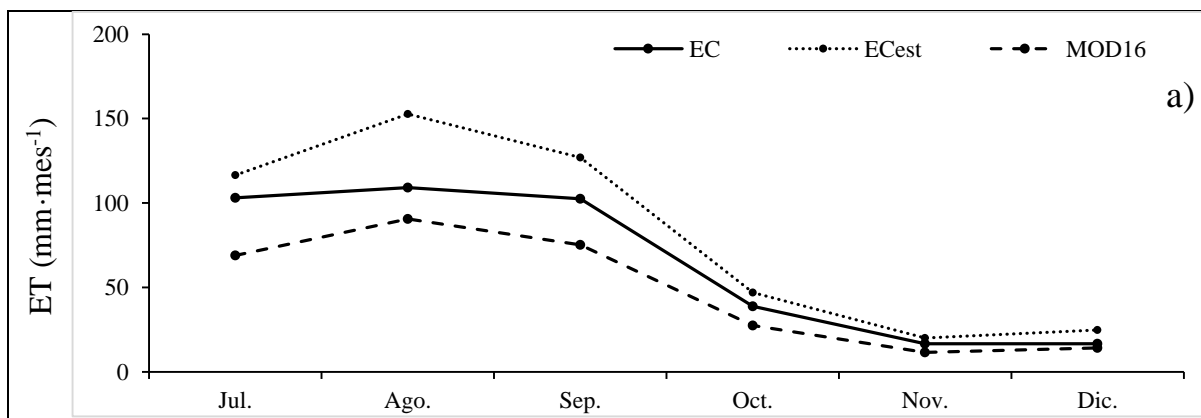
<sup>1</sup>Información promediada

Los modelos generados se aplicaron para estimar valores de EC (ECest) a escala mensual, para el año 2008 en EC3, 2010 en EC4 y 2006 en EC5 y se compararon con los valores reales de EC, mediante los parámetros error (RMSE), sesgo (BIAS) y el índice de concordancia (d). Se encontraron buenos acuerdos en los cuatro sitios (Cuadro 6.8). Considerando el RMSE y d, se observó el mejor desempeño en EC5. El desempeño más pobre se observó en La Orduña, en el que se estimaron valores para un período del año 2006 (septiembre-diciembre) y otro del año 2008 (enero-agosto), utilizando solo el modelo generado para el año 2007.

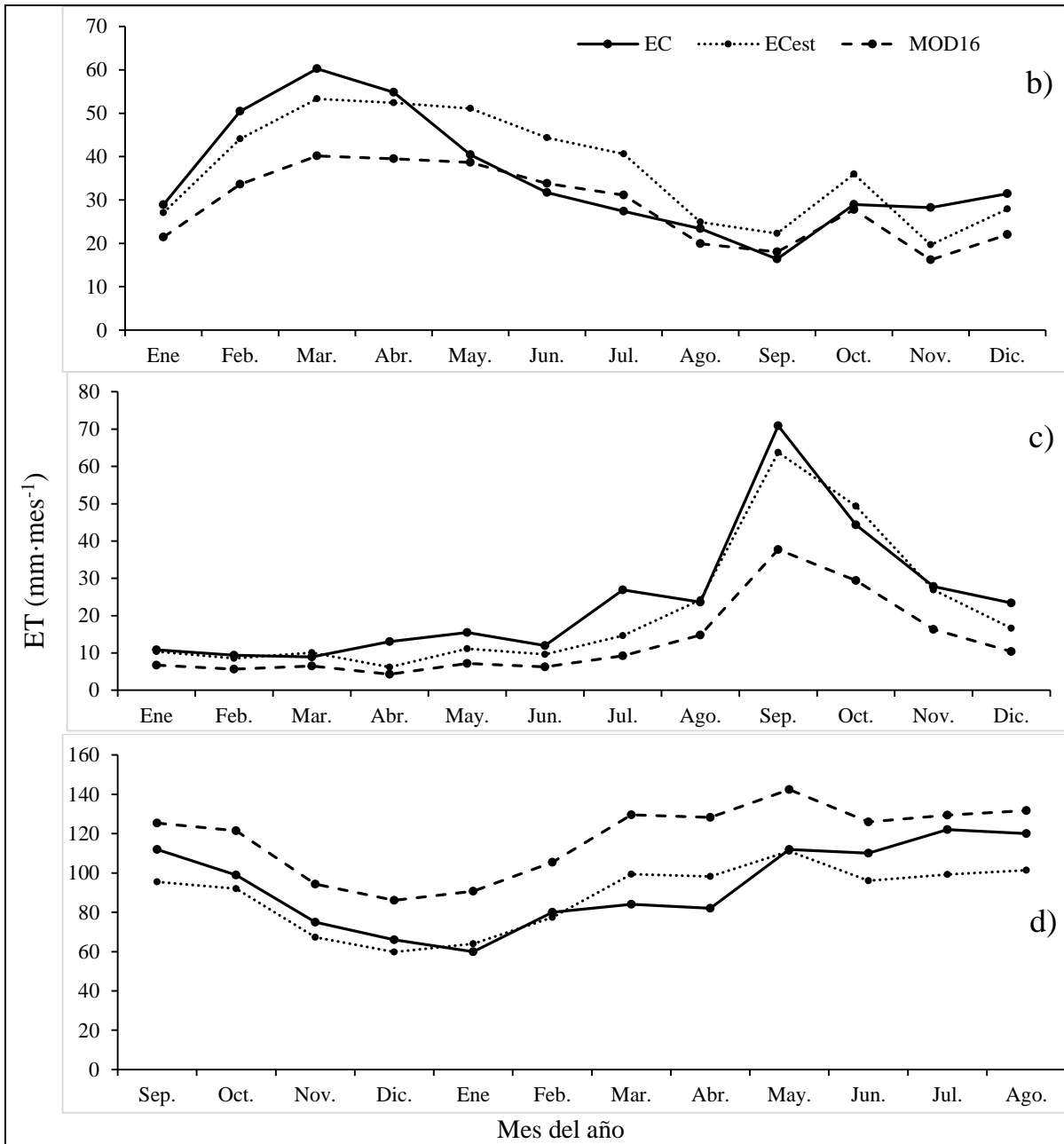
**Cuadro 6.8.** Evaluación del desempeño de los modelos de ajuste de la ET ( $\text{mm}\cdot\text{mes}^{-1}$ )

Sitio	Nombre	Año	RMSE $\text{mm}\cdot\text{mes}^{-1}$	BIAS $\text{mm}\cdot\text{mes}^{-1}$	d
EC3	Rayón	2008	21.71	16.87	0.95
EC4	El Mogor	2010	7.75	1.78	0.90
EC5	La Paz	2006	5.39	-2.94	0.98
EC6	La Orduña	2006-2008	12.91	-5.05	0.87

Al observar las series de tiempo para los años en que se evaluó el desempeño de los modelos de ajuste, es evidente que MOD16 subestimó la ET en EC3 (Figura 6.6a), sobretodo en la época de mayor humedad (julio-septiembre), y el modelo de ajuste sobreestimó; En EC4 (Figura 6.6b) se observó la misma tendencia de MOD16 que subestimó la ET en la época húmeda (noviembre-abril), el modelo ajustó con mejor desempeño en el período de enero-abril. En el sitio EC5 (Figura 6.6c) se observó que MOD16 subestimó la ET durante todo el año, sin embargo fue en el mes más húmedo (septiembre) donde ese fenómeno fue más evidente, sin embargo el modelo de ajuste mostró un buen desempeño, incluso en ese mes. Finalmente en EC6 (Figura 6.6d) MOD16 sobreestimó la ET durante todo el año y el modelo de ajuste presentó el mejor desempeño en el período de septiembre a febrero.





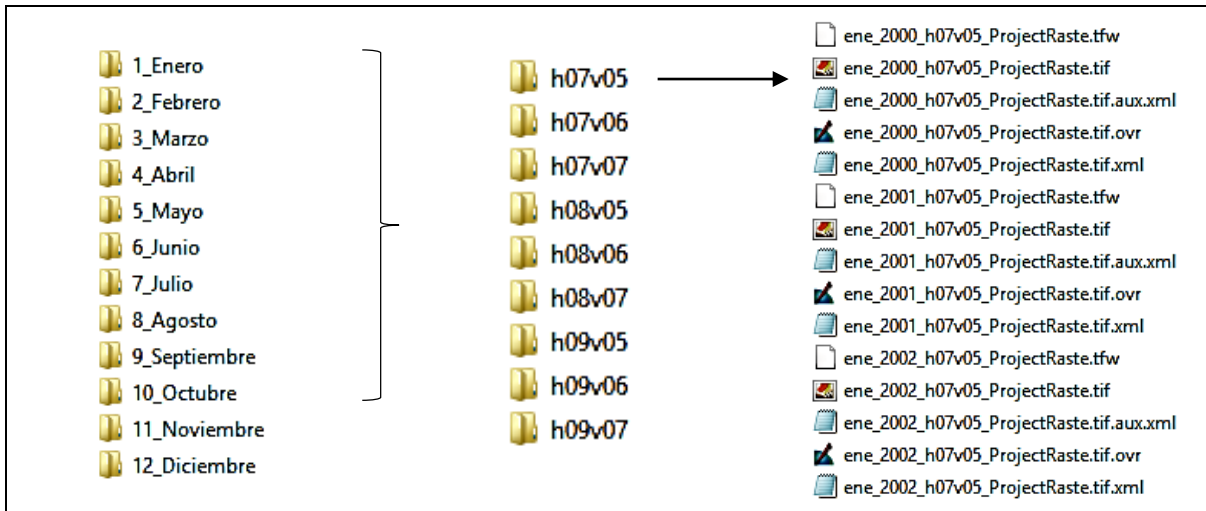


**Figura 6.6.** Series de tiempo de la Evapotranspiración

### 6.5 Generación de productos espaciales

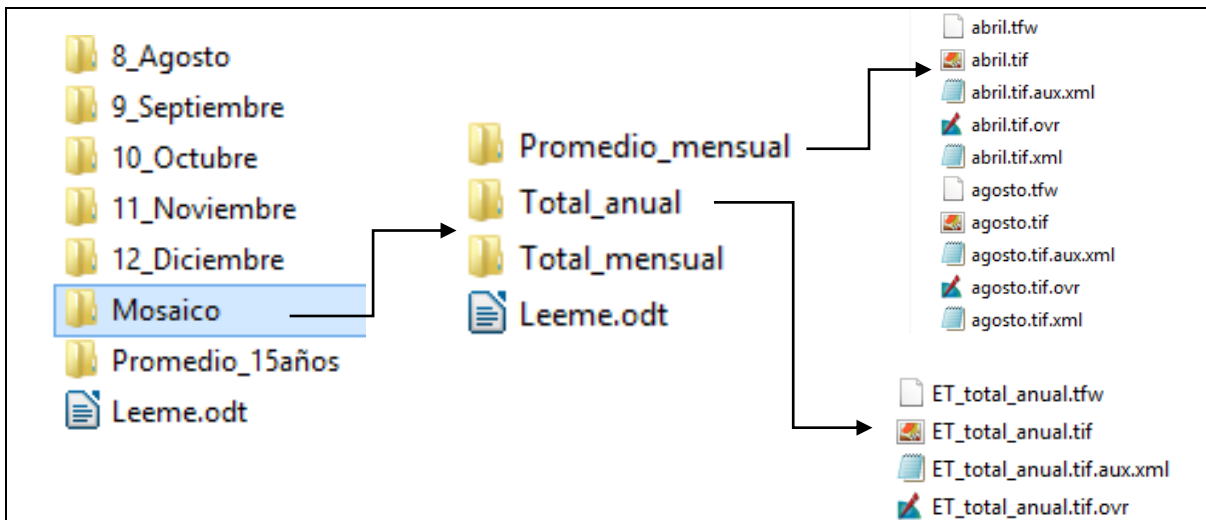
Como resultado del procesamiento de las imágenes de satélite, obtenidas mediante la aplicación de MODIS para ArcGIS, con información de ET ( $\text{mm} \cdot \text{dia}^{-1}$ ), se crearon archivos ráster con formato TIFF (270 KB), presentados por mosaicos MODIS, para cada uno de los

años (2000-2014) y cada mes del año, así como el promedio de los 15 años de información, presentados en la carpeta Promedio\_15años (Figura 6.8).



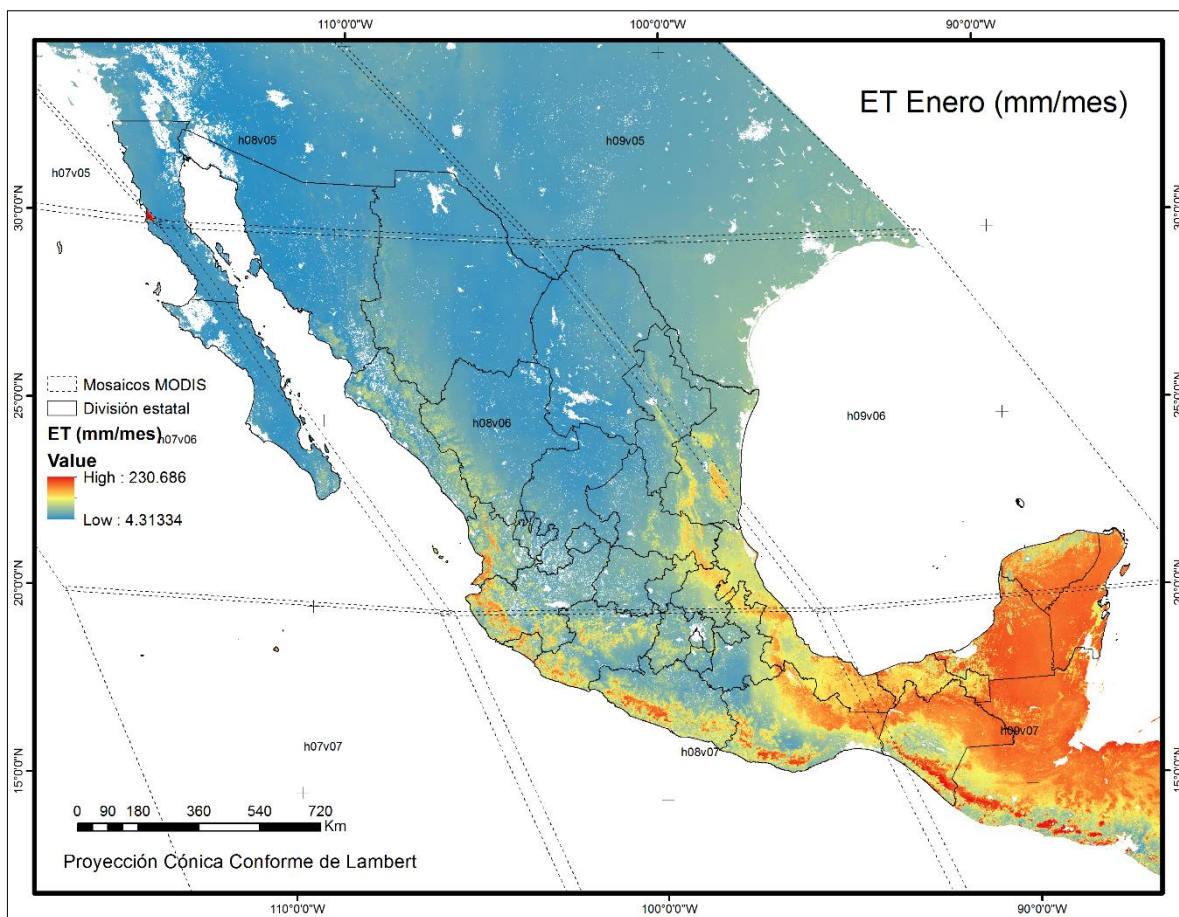
**Figura 6.7.** Organización de la información de ET ( $\text{mm}\cdot\text{día}^{-1}$ ) para descarga.

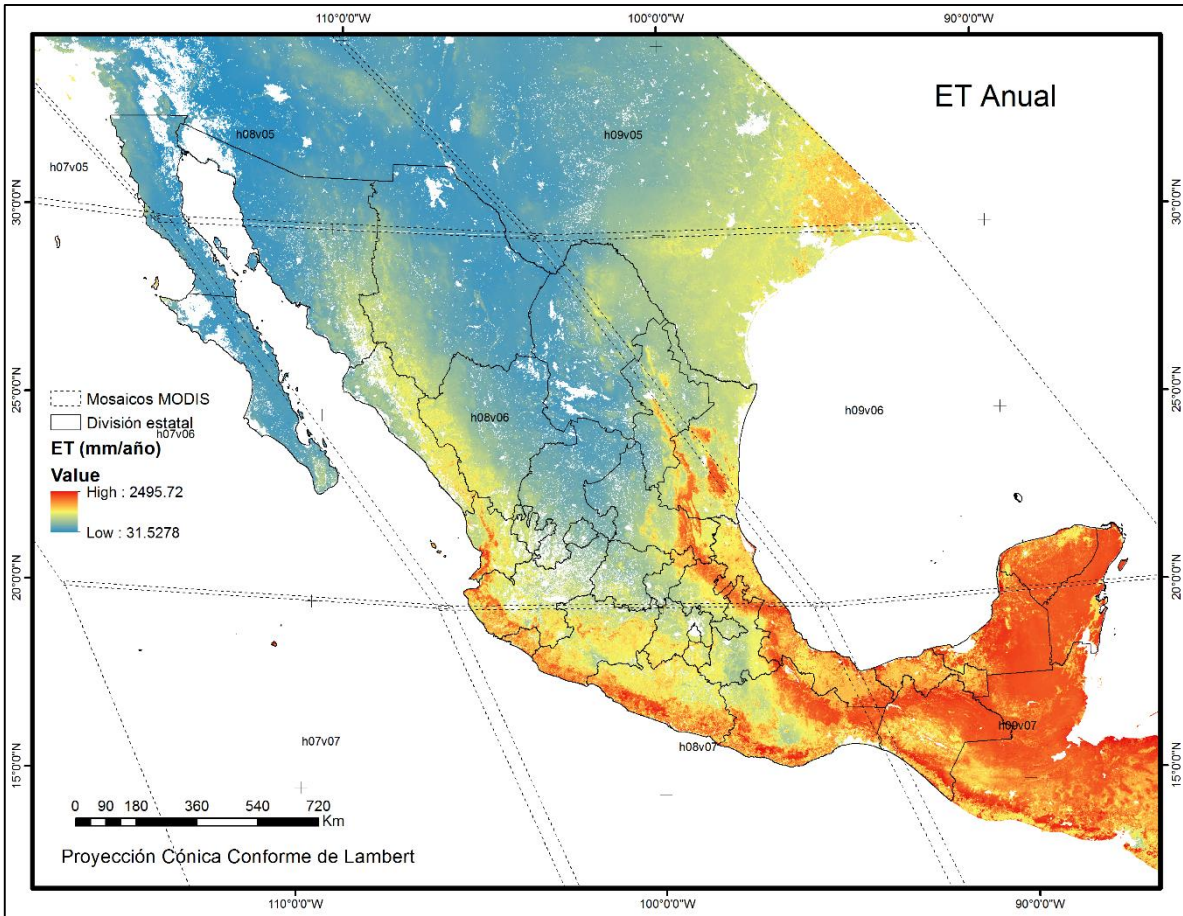
Además se incluyó un mosaico a nivel nacional, donde cada pixel de los archivos ráster contiene información de ET a nivel diario (condición promedio para todos los días del mes), a escala mensual (suma de la ET de los días del mes) y escala anual (suma de la ET mensual), como un promedio de los 15 años de información,



**Figura 6.8.** Organización de los mosaicos con información de ET a nivel nacional.

La información se organizó en una carpeta que es posible descargar vía internet ([https://drive.google.com/drive/folders/1\\_I2F15zpXK0tmw21NBdiqYpkQ29QIGeE?usp=sharing](https://drive.google.com/drive/folders/1_I2F15zpXK0tmw21NBdiqYpkQ29QIGeE?usp=sharing)), si se requiere descargar la información de ET para un mes o mosaico específico, es necesario obtener el archivo TIFF, que contiene la información de ET, el archivo TFW de la información de georreferenciación, el archivo OVR de las capas de pirámides del ráster y uno o dos archivos XML, que son archivos de metadatos, todos estos tienen el mismo nombre y lo que los identifica es la extensión (.tif, .tfw, .ovr, .xml). El usuario podrá visualizar y reprocesar la información en cualquier software de gestión de sistemas de información geográfica, de acuerdo a sus necesidades, pudiendo crear como mínimo, representaciones como las siguientes:





## 7 DISCUSIÓN

En México existe una pobre o escasa socialización de la información, puesto que a pesar de que se reportan establecimientos de sitios de covarianza de vórtices, los resultados no son visibles o son de difícil acceso; por esa razón, para el presente estudio se utilizaron solo seis sitios, de los cuales se tuvo información suficiente y útil para los objetivos planteados, sin embargo es necesario comparar MOD16 en zonas con diferentes condiciones ambientales en México, un país con una gran variabilidad climática.

El presente estudio se enfocó en evaluar el desempeño del producto satelital MOD16A3, en zonas áridas del norte de México, en sitios correspondientes a cultivo de trigo y matorrales así como en un sitio de plantación de café en la zona centro sur, mediante la comparación de los valores de ET estimados por el algoritmo MOD16 contra los valores estimados mediante sistemas EC, a escala diaria y mensual, encontrando diferencias entre ambos; dichas diferencias pueden ser atribuidas a múltiples factores, estudiadas desde la generación del algoritmo (Mu, *et. al.*, 2007), de manera general pueden ser atribuidas primero a la parametrización del algoritmo MOD16 (entradas) y a las consideraciones acerca de procesos físicos que influyen en la ET, en segundo lugar a las mediciones EC, consideradas como “reales” y en tercer lugar a la escala espacial y temporal utilizada en ambos métodos.

La parametrización del algoritmo MOD16 juega un papel importante en el control de la exactitud de ET (Mu, *et. al.*, 2007). La humedad del suelo tiene gran influencia sobre la resistencia del follaje y la resistencia de la superficie del suelo, parametrizaciones esenciales en el algoritmo; el ecosistema en zonas áridas y semi-áridas es conducido por la humedad en el suelo (Makkeasorn, *et. al.*, 2006), sin embargo no está considerada directamente en el algoritmo (Su-Chuang, *et. al.*, 2015), debido a que es muy difícil de

obtener en una gran área por la variedad de valores de permeabilidad del suelo y texturas asociadas (Makkeasorn, *et. al.*, 2006) en su lugar se asume una relación entre el déficit de presión de vapor (VPD) y la humedad relativa (RH) (Bouchet, 1963) altamente cuestionable (Mu, *et. al.*, 2007), sin mencionar que la información meteorológica GMAO re-análisis es validada a escala global y para insertarse en el algoritmo MOD16 se requirió remuestrear de ~110 km a 1km, proceso que sugiere la introducción de incertidumbre en la información de ET. Otros productos que pueden introducir errores significativos son: la clasificación de la cobertura y uso del suelo (MOD12Q1) y LAI/fpar (MOD15A2). Ruhoff *et. al.*, (2013) encontró diferencias al comparar el uso de suelo clasificado en el producto MODIS, con la clasificación hecha en campo, a diferencia de este estudio, donde coinciden las clasificaciones de bosque perenne de hoja ancha para EC6, matorrales en EC3, EC4 y EC5, cultivo en EC1 y EC2; sin embargo, MOD16 considera propiedades constantes para un mismo bioma, por lo que las diferencias fenológicas y de estructura de los matorrales no son captadas, repercutiendo en las estimaciones de ET. Se ha encontrado que al comparar MOD16 con estimaciones de Evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) en el sureste de México, zonas de mayor humedad, existe un coeficiente de correlación de 0.21, sugiriendo que es necesario parametrizar el algoritmo con datos derivados localmente (Alvarado y Orozco, 2016), contrario con lo observado en el presente estudio, donde se encontraron correlaciones mayores.

En segundo lugar, las incertidumbres asociadas a las mediciones EC pueden deberse primeramente a la calibración de los instrumentos, a las "correcciones" necesarias en las mediciones de flujo y al problema de cierre de balance de energía, elementos que no fueron considerados para el presente estudio. Un requisito fundamental es una superficie

homogénea sin interrupciones entre la superficie y la altura del instrumento (Kool, *et.al.*, 2014), que frecuentemente no se cumple, pues se recomienda un Fetch 100:1 con respecto a la altura del instrumento, superior para superficies más lisas y menor para superficies rugosas. Dicha altura es desconocida para el caso de los sitios ubicados en cultivo de trigo, sin embargo se ha demostrado que con una altura de 2 m se puede representar un área homogénea de 1.5-2.5 ha dependiendo de la dirección y velocidad del viento, así como de la estabilidad atmosférica; en el caso de Rayón, al tratarse de una superficie rugosa, con la altura del instrumento a 9 m se requiere un Fetch de al menos 900m, requisito que se cumple fácilmente, por el tipo de cobertura que representa; en el caso del Mogor, la altura a la que se colocó el instrumento de medición, 3.5 m, requiere un Fetch de mínimo 350 m y en La Paz la altura de 13 m puede representar fácilmente un Fetch de 1300 m. Incertidumbres asociadas con las mediciones de las torres de flujo pueden influir en los indicadores sesgo, el error y coeficiente de determinación (Su-Chuang, *et. al.*, 2015). La ventaja de tener mediciones completas de intervalos cada 8 días, fue evidente en la mejoría de la relación entre las torres de flujo y MOD16 correspondiente en los sitios con el mayor número de datos (Ramoelo, *et.al.*, 2014), comparable con lo que se observó en EC1 y EC2 del presente estudio.

Tanto la magnitud como la definición de los diferentes componentes del balance hídrico, dependen en gran medida de la escala (Wilcox, 2003). Existen lapsos de tiempo entre las estimaciones de ET para muchos sistemas satelitales, especialmente aquellos que tienen alta resolución espacial, donde las imágenes se obtienen solo periódicamente para una ubicación específica, 8 días en el caso de MODIS; por lo tanto, efectos de la evaporación de los eventos de precipitación que ocurren entre los pasos del satélite, o el procesamiento de

las imágenes "húmedas" de eventos recientes de precipitación, puede sesgar las estimaciones estacionales (Burba, 2013). Las estimaciones de EC, utilizadas para evaluar el algoritmo MOD16 representan una zona homogénea de menor superficie que la escala espacial de MOD16, en el caso del cultivo de trigo y los sitios el Mogor. Los píxeles satelitales sobre sistemas de vegetación angosta o pequeñas áreas de cultivo pueden superponer amplias mezclas de tipos y densidades de vegetación, de modo que las señales de temperatura superficial se mezclan y las recuperaciones de ET son difíciles de interpretar (Burba, 2013), lo que sucede con MOD16 es que asume un valor promedio de un área heterogénea, como si fuese un área homogénea, insertando sesgo en la información y en la comparación con EC.

Es posible implementar el algoritmo MOD16, de acuerdo con el procedimiento reportado por Mu, *et. al.*, 2011, obteniendo correlación de hasta el 70%, atribuyendo las diferencias a los productos de entrada que no se especifican y los procesos de interpolación usados originalmente, reemplazados por entradas de más fácil acceso y procesos estándar de interpolación.



## 8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En la presente investigación se compararon los valores de ET obtenidos en sitios de covarianza de torbellinos (EC) contra la información satelital estimada mediante el algoritmo MOD16, en seis sitios ubicados en el noroeste y centro de México, sobre cultivo de trigo, matorrales y plantación de café, ubicados en zonas áridas, semiáridas y húmedas, con la finalidad de estimar incertidumbres asociadas a la información satelital y tener referencias para la toma de decisiones en cuanto al uso o aplicación de la información satelital puesta al público, para el período del 2000-2014.

### Conclusiones

- Es posible implementar el algoritmo MOD16, de acuerdo con el procedimiento reportado por Mu, *et. al.*, 2011, obteniendo correlación de hasta el 70%.
- Es necesario comparar MOD16 en diferentes condiciones ambientales a las estudiadas en la presente investigación, para poder recomendarlo o no a nivel nacional.
- Se considera a los productos MOD16 como una alternativa de información de ET en sistemas naturales, escala regional, en zonas áridas, semiáridas y boscosas, a nivel diario y mensual, donde no se cuente con sistemas de medición más precisos.
- No se cuenta con información suficiente para determinar el uso de MOD16 en cultivos, sin embargo, en zonas de monocultivo de trigo, de gran extensión, la información satelital puede ser útil, cuando no se cuente con otra tipo de información de ET.
- Se cuenta con información procesada de ET ( $\text{mm}\cdot\text{dia}^{-1}$ ,  $\text{mm}\cdot\text{mes}^{-1}$  y  $\text{mm}\cdot\text{año}^{-1}$ ) para el territorio de México, para facilitar su manipulación fue puesta a disposición de

cualquier persona que cuente con acceso a internet y a un software de gestión de sistemas de información geográfica.

#### Recomendaciones

- El ajuste a modelos de regresión, que expliquen al menos el 70% de la variabilidad de la ET en una zona, y reducir el sesgo en la información de ET, como los que se generaron en la presente investigación.
- Generar un *Web Map Server* (WMS) mediante un componente de software que produce mapas a partir de datos georeferenciados, en el que no se accede a los datos en sí mismos, sino a una representación gráfica de ellos a través de la red (Ortega y Zambrano, 2008).
- La parametrización local del algoritmo MOD16, utilizando entradas a escala local, a resolución espacial mayor, introducir capas de información del suelo (humedad).
- Analizar el desempeño de MOD16 modificado, para los sitios de EC utilizados en la presente investigación y otras mediciones realizadas en campo, mediante diferentes métodos, en distintos ecosistemas, con la finalidad de obtener información de ET más acorde a las condiciones de nuestro país.
- Implementar una red de información (datos), de los resultados de investigación de cualquier índole, realizados en México, para la socialización de la misma.

## 9 LITERARUTA CITADA

- Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Raes, D.; Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements In: United Nations FAO, Irrigation and Drainage Paper 56. **1998**, 300, 1-15. Rome, Italy.
- Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Howell, T.A.; Jensen, M.E. Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy. *Agric. Water Manag.* **2011a**, 98, 899–920, DOI. [10.1016/j.agwat.2010.12.015](https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.12.015).
- Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Howell, T.A.; Jensen, M.E. Evapotranspiration information reporting: II recommended documentation. *Agric. Water Manage.* **2011b**, 98, 921-929, DOI. [10.1016/j.agwat.2010.12.016](https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.12.016).
- Allen, R.G.; Tasumi, M.; Trezza, R. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)—Model. *J. Irrig. Drain. Eng.* **2007**, 133, 380–394, DOI. [10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2007\)133:4\(380\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:4(380)).
- Alvarado, B.S.; Orozco, M.I. Comparison of satellite-derived potential evapotranspiration (MOD16A3) with in situ measurements from Quintana Roo, Mexico. Conference paper. **2016**, 13-17. DOI: [10.1109/CNCG.2016.7985078](https://doi.org/10.1109/CNCG.2016.7985078)
- Ameriflux Download data. Disponible en línea: <http://ameriflux.lbl.gov/data/download-data/> (Fecha de consulta 08/06/2017).
- Bastiaanssen, W.G.M.; Bos, M.G. Irrigation performance indicators based on remotely sensed data: a review of literature. *Irrig. Drain. Syst.* **1999**, 13, 291–311, DOI. [10.1023/A:1006355315251](https://doi.org/10.1023/A:1006355315251).
- Bastiaanssen, W.G.M.; Noordman, E.J.M.; Pelgrum, H.; Davids, G.; Thoreson, B.P.; Allen, R.G. SEBAL model with remotely sensed data to improve water-resources management under actual field conditions. *J. Irrig. Drain. E.* **2005**, 131, 85-93, DOI. [10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2005\)131:1\(85\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2005)131:1(85)).
- Bell, T.W.; Menzer, O.; Troyo-Diequez, E.; Oechel, W.C. Carbon dioxide exchange over multiple temporal scales in an arid shrub ecosystem near La Paz, Baja California Sur, Mexico. *Glob. Change Biol.* **2012**, 18, 2570-2582, DOI:[10.1111/j.1365-2486.2012.02720.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2012.02720.x).
- Bouchet, R. J. Evapotranspiration réelle, evapotranspiration potentielle, signification climatique. *Int. Assoc. Sci. Hydrol. Evaporation.* **1963**, 2, 134-142.
- Bowen, I.S. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. *Phys. Rev.* **1926**, 27, 779–787, DOI.[10.1103/PhysRev.27.779](https://doi.org/10.1103/PhysRev.27.779).
- Bruin, H. A. R. De; Kroonenberg, A. C. Van Den; Bange, J.; Allen, R. On scintillometry: a brief review. *Remote Sens. Hydrol.* **2013**, 15, 4504.

- Burba, G. Eddy Covariance Method for Scientific, Industrial, Agricultural, and Regulatory Applications: A Field Book on Measuring Ecosystem Gas Exchange and Areal Emission Rates. LI-COR Biosciences, Lincoln. NE, USA, 2013; 331.
- Castañeda, I. Estimación de la evapotranspiración mediante un balance de energía utilizando sensores remotos. Tesis Maestría. Colegio de Postgraduados, Montecillo. México. 2013. 123 p.
- Castañeda, I.; Carlos, R.; Martínez, M.M.; Pascual, R.; Fermín; Flores, M.; Héctor; Fernández, R.; Demetrio, S.; Esparza-Govea, Salvador. ESTIMACIÓN DE COEFICIENTES DE CULTIVO MEDIANTE SENSORES REMOTOS EN EL DISTRITO DE RIEGO RÍO YAQUI, SONORA, MÉXICO. *Agrociencia*. **2015**, *49*, 221-232.
- Chehbouni, A.; Kerr, Y. H.; Watts, C.; Hartogensis, O.; Goodrich, D.; Scott, R.; Schieldge, J.; Lee, K.; Shuttleworth, W. J.; Dedieu, G.; De Bruin, H. A. R. Estimation of area-average sensible heat flux using a large-aperture scintillometer during the Semi-Arid Land-Surface-Atmosphere (SALSA) experiment. *Water Resour. Res.* **1999**, *35*, 2505–2511, DOI.10.1029/1999WR900111.
- Cleugh, H.A.; Leuning, R.; Mu, Q.; Running, S.W. Regional evaporation estimates from flux tower and MODIS satellite data. *Remote Sens. Environ.* **2007**, *106*, 285–304, DOI. [10.1016/j.rse.2006.07.007](https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.07.007).
- Clothier, B.E; Clawson, K.L; Pinter, P.J.; Jr., Moran, M.S.; Reginato, R.J.; Jackson, R.D. Estimates of soil heat flux from net radiation during the growth of alfalfa. *Agr. Forest. Meteorol.* **1986**, *37*, 319-329, DOI.10.1016/0168-1923(86)90069-9.
- Cuesta, A.; Montoro, A.; Jochum, A. M.; López, P.; Calera, A. Metodología operativa para la obtención del coeficiente de cultivo desde imágenes de satélite. *ITEA Inf. Tec. Econ. Agrar.* **2005**, *101*, 212–224.
- Daughtry, C.S.T.; Kustas, W.P.; Moran, M.S.; Pinter, P.J. Jr.; Jackson, R. D.; Brown, P. W. Spectral estimates of net radiation and soil heat flux. *Remote Sens. Environ.* **1990**, *32*, 111-124, DOI.10.1016/0034-4257(90)90012-B.
- Doble, R.C.; Crosbie, R.S. Review: Current and emerging methods for catchment-scale modelling of recharge and evapotranspiration from shallow groundwater. *Hydrogeol J.* **2017**, *25*, 3–23, DOI.10.1007/s10040-016-1470-3.
- Esri, 2015. MODIS Toolbox. Disponible en línea: <http://www.arcgis.com/home/item.html?id=5fe74de4ec254bc09515e562abe994e1> (Fecha de consulta 01/02/2017).
- Esri, 2018. Métodos de clasificación estándar en ArcGIS. Disponible en línea: <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/help/mapping/symbols-and-styles/data-classification-methods.htm> (Fecha de consulta 08/01/2018).

- Fisher, J. B.; Tu, K. P.; Baldocchi, D. D. Global estimates of the land-atmosphere water flux based on monthly AVHRR and ISLSCP-II data, validated at 16 FLUXNET sites. *Remote Sens. Environ.* **2008**, *112*, 901-919, DOI.10.1016/j.rse.2007.06.025.
- Garatuza-Payan, J.; Watts, C. The use of remote sensing for estimating ET in NW Mexico. ICID Workshop on Remote Sensing of ET for Large Regions. 2003.
- Glenn, E. P.; Neale, C. M. U.; Hunsaker, D. J.; Nagler, P. L. Vegetation index-based crop coefficients to estimate evapotranspiration by remote sensing in agricultural and natural ecosystems. *Hydrol. Process.* **2011**, *25*, 4050–4062, DOI.10.1002/hyp.8392.
- Gordillo, S.V.M.; Magdaleno, H. F.; Tijerina, L.; Arteaga, R. Estimation of evapotranspiration using energy balance and satellite images. *Rev. Mex. Ciencias Agrícolas*, **2014**, *5*, 143–155, DOI.10.29312/remexca.v5i1.1017.
- Ham, J. M. and J. L. Heilman. Experimental test of density and energy-balance corrections on carbon dioxide flux as measured using open-path eddy covariance. *Agron. J.* **2003**, *95*, 1393-1403, DOI.10.2134/agronj2003.1393.
- Hernández, P. J.M.; Landeros, S.C.; Martínez, D. J.P.; López, R. G.; Platas, R.D.E.; Nikolskii, G.I. Valoración de la evapotranspiración real estimada y rendimiento de caña de azúcar en Veracruz, México. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* **2017**, *8*, 1013-1019.
- Holwerda, F.; Bruijnzeel, L. A.; Barradas, V. L.; Cervantes, J. The water and energy exchange of a shaded coffee plantation in the lower montane cloud forest zone of central Veracruz, Mexico. *Agric. For. Meteorol.* **2013**, *173*, 1–13, DOI.10.1016/j.agrformet.2012.12.015.
- Hu, G.; Jia, L.; Menenti, M. Comparison of MOD16 and LSA-SAF MSG evapotranspiration products over Europe for 2011. *Remote Sens. Environ.* **2015**, *156*, 510-526, DOI. [10.1016/j.rse.2014.10.017](https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.10.017).
- Huete, A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sens. Environ.* **1988**, *25*, 295-309, DOI.10.1016/0034-4257(88)90106-X.
- Jacobsen, A.; Hansen, B. U. Estimation of the soil heat flux/net radiation ratio based on spectral vegetation indexes in high-latitude Arctic areas. *Int. J. Remote Sens.* **1999**, *20*, 445-461, DOI.10.1080/014311699213532.
- Jetse, D.K.; Tim, R.M.; Matthew, F.M. Estimating Land Surface Evaporation: A Review of Methods Using Remotely Sensed Surface Temperature Data. *Surv Geophys.* **2008**, *29*, 421–469, DOI.10.1007/s10712-008-9037-z.
- Jia, Z. Liu, S.; Xu, Z.; Chen, Y.; Zhu, M. Validation of Remotely Sensed Evapotranspiration over the Hai River Basin, China. *J. Geophys. Res.* **2012**, *117*, 2156–2202, DOI: [10.1029/2011JD017037](https://doi.org/10.1029/2011JD017037).
- Kalma, J.; McVicar, T.; McCabe, M. Estimating land surface evaporation: a review of methods using remotely sensed surface temperature data. *Surv Geophys.* **2008**, *29*, 421–469, DOI.10.1007/s10712-008-9037-z.

- Kamble, B.; Kilic, A.; Hubbard, K. Estimating crop coefficients using remote sensing-based vegetation index. *Remote Sens.* **2013**, *5*, 1588–1602, DOI. 10.3390/rs5041588.
- Kim, H. W.; Hwang, K.; Mu, Q.; Lee, S. O.; Choi, M. Validation on MODIS 16 Global Terrestrial Evapotranspiration Products in various Climates and Land Cover Types in Asia. *KSCE J. Civ. Eng.* **2012**, *16*, 229–238, DOI.10.1007/s12205-012-0006-1.
- Kool, D.; Agam, N.; Lazarovitch, N.; Heitman, J.L.; Sauer, T.J.; Ben-Gal, A. A review of approaches for evapotranspiration partitioning. *Agric. For. Meteorol.* **2014**, *184*, 56–70, DOI. [10.1016/j.agrformet.2013.09.003](https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.09.003).
- Kustas, W.P.; Daughtry, C.S.T. Estimation of the soil heat flux/net radiation ratio from spectral data. *Agr. Forest Meteorol.* **1990**, *49*, 205-223, DOI.10.1016/0168-1923(90)90033-3.
- Liu, Z.; Chen, H.; Huo, Z.; Wang, F.; Shock, C. C. Analysis of the contribution of groundwater to evapotranspiration in an arid irrigation district with shallow water table. *Agric. Water Manag.* **2016**, *171*, 131–141, DOI.10.1016/j.agwat.2016.04.002.
- López, A. J. E.; Díaz, V.T.; Watts, T.C.; Rodríguez, J. C.; Villegas, C.A. E.; Ruvalcaba, P.L.; Alcaraz, V. T. de J. Evapotranspiración y coeficientes de cultivo de chile bell en el Valle de Culiacán, México. *Terra Latinoam.* **2015**, *33*, 209–219.
- López, A.J.E.; Díaz, V.T.; Watts, T.C.; Rodríguez, J.C.; Velázquez, A.T.D.J.; Partida R. L. Use of MODIS satellite data and energy balance to estimate evapotranspiration. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* **2017**, *8*, 773-784.
- Makkeasorn, A.; Chang, N.B.; Beaman, M.; Wyatt, C.; Slate, C. Soil moisture estimation in a semiarid watershed using RADARSAT-1 satellite imagery and genetic programming. *Water Resour. Res.* **2006**, *42*, 1-15, DOI: [10.1029/2005WR004033](https://doi.org/10.1029/2005WR004033).
- Miralles, D.G.; Holmes T.R.H.; De Jeu, R.A.M.; Gash, J.H.; Meesters, A.G.C.A.; Dolman, A.J. Global land-surface evaporation estimated from satellite-based observations. *Hydrol Earth Syst Sci.* **2011**, *15*, 453–469, DOI.10.5194/hess-15-453-2011.
- MOD16A2: MODIS/Terra Net Evapotranspiration 8-Day L4 Global 500 m SIN Grid V006. Disponible en línea: [https://lpdaac.usgs.gov/dataset\\_discovery/modis/modis\\_products\\_table/mod16a2\\_v006](https://lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/modis/modis_products_table/mod16a2_v006) (Fecha de consulta 20/07/2017).
- MODIS Global Evapotranspiration Project (MOD16). Disponible en línea: <https://www.nts.gov/project/modis/mod16.php> (Fecha de consulta 01/02/2017).
- MODIS Toolbox. Disponible en línea: <http://www.arcgis.com/home/item.html?id=5fe74de4ec254bc09515e562abe994e1> (Fecha de consulta 01/02/2017).

- Monteith, J.L. Evaporation and environment. *Sym. Soc. Exp. Biol.* **1965**, *19*, 205-224.
- Mu, Q., Heinsch, F. A.; Zhao, M.; Running, S.W. Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data. *Remote Sens. Environ.* **2007**, *111*, 519-536, DOI.10.1016/j.rse.2007.04.015.
- Mu, Q; Zhao, M; Running, S.V. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm. *Remote Sens. Environ.* **2011**, *115*, 1781-1800, DOI. 10.1016/j.rse.2011.02.019.
- Munguia, J.; Zermeño, A.; Quezada, R.; Rosa, M. D. La; Ibarra, L. Relación entre los componentes del balance de energía y la resistencia estomática en el cultivo de melón bajo acolchado plástico: (con 2 figuras y 1 cuadro). *Phyton (B. Aires) [en línea]*. **2004**, *73*, 181-192.
- NTSG, Universidad de Montana. MODIS Global Evapotranspiration Project (MOD16). Disponible en línea: <https://www.ntsug.umt.edu/project/modis/mod16.php> (Fecha de consulta 01/02/2017).
- Ortega, A.S.C.; Zambrano, P.M.C. Elaboración de un tutorial, instalación y uso de MapServer. Tesis de Licenciatura. Universidad del Azuay. Cuenca, Ecuador. 2008.
- Palacios, E.; Palacios, J.; Palacios, L. Agricultura de riego asistida con satélites. *Tecnol. cienc. agua*. **2011**, *2*, 69-81.
- Prueger, J. H.; Hatfield, J. L.; Aase, J. K.; Pikul, J. L. Bowen-ratio comparisons with lysimeter evapotranspiration. *Agron. J.* **1997**, *89*, 730-736, DOI.10.2134/agronj1997.00021962008900050004x.
- Ramoelo, A.; Majazi, N.; Mathieu, R.; Jovanovic, N.; Nickless, A.; Dziki, S. Validation of Global Evapotranspiration Product (MOD16) using Flux Tower Data in the African Savanna, South Africa. *Remote sens.* **2014**, *6*, 7406-7423, DOI. 10.3390/rs6087406.
- Reyes, G.A.; Martínez, R.J.G.; Palomo R. M.; Salgado, A. A.; Rivera G. M. Use of Remote Sensing to Estimate Crop Evapotranspiration in the Region Lagunera. *Agrofaz*, **2013**, *13*, 23-31.
- Rodríguez, J.; Watts, C.; Garatuza-Payan, J.; Rivera, M.; Lizárraga-Celaya, C.; Lopez, J.; Ochoa, A.; Moreno, S.; Rentería, M. EVAPOTRANSPIRACIÓN Y COEFICIENTE DE CULTIVO EN CHILE BANANA (*Capsicum annuum* L) EN EL VALLE DEL YANQUI, MÉXICO. *Biotecnia*. **2011**, *13*, 28-35, DOI. 10.18633/bt.v13i3.97.
- Roerink, G.J.; Su, Z.; Menenti, M. S-SEBI: a simple remote sensing algorithm to estimate the surface energy balance. *Phys. Chem. Earth.* **2000**, *25*, 147-157. DOI. 10.1016/S1464-1909(99)00128-8.

- Román, L. R.; Valdés, T. D.; Enrique, J.; Avendaño, L.; Watts, C.; Bautista, F. C.; Rodríguez, J.; Cesar, J. Evapotranspiración del cultivo de sandía (*Citrullus lanatus*) en la costa de Hermosillo, Sonora, México. *Terra Latinoamericana*, **2017**, *35*, 41–49, DOI.10.28940/terra.v35i1.240.
- Ruhoff, A.L.; Paz, A.R.; Aragao, L.E.O.C.; Mu, Q.; Malhi, Y.; Collischonn, W.; Rocha, H.R.; Running, S.W. Assessment of the MODIS global evapotranspiration algorithm using eddy covariance measurements and hydrological modelling in the Rio Grande basin. *Hydrolog. Sci. J.* **2013**, *58*, 1-19, DOI. [10.1080/02626667.2013.837578](https://doi.org/10.1080/02626667.2013.837578).
- Running, S.; Mu, Q.; Zhao, M. MOD16A2: MODIS/Terra Net Evapotranspiration 8-Day L4 Global 500 m SIN Grid V006. 2017. Disponible en línea: [https://lpdaac.usgs.gov/dataset\\_discovery/modis/modis\\_products\\_table/mod16a2\\_v006](https://lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/modis/modis_products_table/mod16a2_v006) (Fecha de consulta 20/06/2017).
- Saadi, S.; Boulet, G.; Bahir, M.; Brut, A.; Mougenot, B.; Fanise, P.; Simonneaux, V.; Chabaane, Z.L. Assessment of actual evapotranspiration over a semi-arid heterogeneous land surface by means of coupled low resolution remote sensing data with energy balance model: comparison to extra Large Aperture Scintillometer measurements. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* **2017**, *22*, 2187-2209. DOI.10.5194/hess-2017-454.
- Santini A.D.; Ruhoff, A.L.; Rocha, H.R.Da. Sensibilidade do algoritmo de evapotranspiração MODIS aos dados de entrada meteorológicos em biomas tropicais. XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. 2017 Available from: [https://www.researchgate.net/publication/322661427\\_Sensibilidade\\_do\\_algoritmo\\_de\\_evapotranspiracao\\_MODIS\\_aos\\_dados\\_de\\_entrada\\_meteorologicos\\_em\\_biomas\\_tropicais](https://www.researchgate.net/publication/322661427_Sensibilidade_do_algoritmo_de_evapotranspiracao_MODIS_aos_dados_de_entrada_meteorologicos_em_biomas_tropicais) [Fecha de consulta 10/02/2018].
- Schaffrath, D.; Bernhofer, C. Variability and distribution of spatial evapotranspiration in semi arid Inner Mongolian grasslands from 2002 to 2011. *Springerplus*, **2013**, *2*, 1–17, DOI.10.1186/2193-1801-2-547.
- Schrader, F.; Durner, W.; Fank, J.; Gebler, S.; Pütz, T.; Hannes, M.; Wollschläger, U. Estimating precipitation and actual evapotranspiration from precision lysimeter measurements. *Procedia Environm, Sciences*, **2013**, *19*, 543–552. DOI. 10.1016/j.proenv.2013.06.061.
- Shaw, E.M. Hydrology in practice. Chapman y Hall, London, 1996. 569 p.
- Su-Chuang, D.; Zhao-Liang, L.; Tang, R.; Wu, H.; Tang, B.H.; Lu, J. Integrating two layers of soil moisture parameters into the MOD16 algorithm to improve evapotranspiration estimations. *Int. J. Remote Sens.* **2015**, DOI. [10.1080/01431161.2015.1040136](https://doi.org/10.1080/01431161.2015.1040136).
- Sun, Z.; Wang, Q.; Ouyang, Z.; Watanabe, M.; Matsushita, B.; Fukushima, T. Evaluation of MOD16 algorithm using MODIS and ground observational data in winter wheat field in North China Plain. *Hydrol. Process.* **2007**, *21*, 1196–1206, DOI.10.1002/hyp.6679.



- UNESCO. 1981. Methods for Water Balance Computation. Instituto de Hidrología de España. España. Disponible en línea: <http://unesdoc.unesco.org/images/0013/001377/137771so.pdf>
- Verstraeten, W.W.; Veroustraete, F.; Feyen, J. Assessment of Evapotranspiration and Soil Moisture Content Across Different Scales of Observation. *Sensors*. **2008**, *8*, 70-117, DOI. 10.3390/s8010070.
- Villarreal, S.; Vargas, R.; Yepez, A.; Acosta, S.; Castro, A.; Escoto-Rodríguez, M.; Lopez, E.; Martínez-Osuna, J.; Rodríguez, J.C.; Smith, S.V.; Vivoni, E.R.; Watts, C.J. CMS: Evapotranspiration and Meteorology, Water-Limited Shrublands, Mexico, 2008-2010. ORNL DAAC, Oak Ridge, Tennessee, USA. 2016.
- Villarreal, S.; Vargas, R.; Yepez, E.A.; Acosta, J.S.; Castro, A.; Escoto-Rodríguez, M.; Lopez, E.; Martínez-Osuna, J.; Rodríguez, J.C.; Smith, S.V.; Vivoni, E.R.; Watts, C.J. Contrasting precipitation seasonality influences evapotranspiration dynamics in water-limited shrublands. *J. Geophys. Res. Biogeosci.* **2016**, *121*, 494-508, DOI.10.1002/2015JG003169.AND
- Walpole, R.E.; Myers, S.L.; Ye, K. Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencia. 9na ed. Pearson Educación, México. 2012. Pp. 816. ISBN: 978-607-32-1417-9.
- Wang T.I, Ochs G.R, Clifford S.F Saturation-resistant optical scintillometer to measure Cn2. *J. Opt. Soc. Amer.* **1978**, *68*,334-338, DOI.10.1364/JOSA.68.000334.
- Wilcox, B.P., Breshears, D.D., Seyfried, M.S. Water balance on rangelands. In: Stewart, B.A., Howell, T.A. (Eds.), Encyclopedia of Water Science. Marcel Dekker, Inc., **2003**, New York, pp. 791–794.
- Willmott, C. J.; Ackleson, S. G.; Davis, R. E.; Feddema, J. J.; Klink, K. M.; Legates, D. R.; O’Donell, J.; Rowe, C. M. Statistics for the evaluation and comparison of models. *J. Geophys. Res.* **1985**, *90*, 8995-9005, DOI.10.1029/JC090iC05p08995.
- Wright J.L. New Evapotranspiration Crop Coefficients, *J Irr. Drain Div-Asce.* **1982**, *108*, 57-74.
- Yuan, W., S. Liu, G. Yu, J. Bonnefond, J. Chen, K. Davis, A. R. Desai, A. H. Goldstein, D. Gianelle, F. Rossi, A. E. Suyker, and S. B. Verma. 2010. “Global Estimates of Evapotranspiration and Gross Primary Production Based on MODIS and Global Meteorology Data. *Remote Sens. Environ.* **2010**, *114*, 1416–1431, DOI.10.1016/j.rse.2010.01.022.
- Zermeño-González, A.; Flores-Guerrero, J. A.; Munguía-López, J. P.; Gil-Marín, J. A.; Rodríguez-García, R.; Catalán-Valencia, E. A.; Ibarra-Jiménez, L.; Zermeño-González, H. Evapotranspiración y su relación con la evapotranspiración a equilibrio de una huerta de nogal pecanero (*Carya illinoensis*) del norte de México. *Agrociencia*, **2010**, *44*, 885–893.

Zhang, K.; Kimball, J.S.; Running, S.W. A review of remote sensing based actual evapotranspiration estimation. *WIREs Water*. **2016**, *3*, 834–853, DOI. [10.1002/wat2.1168](https://doi.org/10.1002/wat2.1168).

## 10 ANEXOS

ANEXO I. EL BPLUT (*The Biome Properties Look-Up Table*) para MODIS

Clase	Clasificación (Tipo 2)*	Clave	gl_sh (ms <sup>-1</sup> )	gl_e_wv (ms <sup>-1</sup> )	CL (ms <sup>-1</sup> )
0	Agua	WAT			
1	Bosque perenne de aciculadas	ENF	0.04	0.04	0.0032
2	Bosque de hoja ancha perenne	EBF	0.01	0.01	0.0025
3	Bosque caducifolio de aciculadas	DNF	0.04	0.04	0.0032
4	Bosque caducifolio de hoja ancha	DBF	0.01	0.01	0.0028
5	Bosques mixtos	MF	0.04	0.04	0.0025
6	Matorrales cerrados	CSH	0.04	0.04	0.0065
7	Matorrales abiertos	OSH	0.04	0.04	0.0065
8	Savanas arboladas	WL	0.08	0.08	0.0065
9	Savana	Wgrass	0.08	0.08	0.0065
10	Pastizales	Grass	0.02	0.02	0.0070
12	Tierras de cultivo	Crop	0.02	0.02	0.0070
13	Urbano y urbanizado	Grass	0.02	0.02	0.0070
16	Esteril o vegetacion escasa	Grass	0.02	0.02	0.0070

\*Clasificación 2 del producto satelital MCD12Q1

Clase	Clasificación (Tipo 2)*	Clave	Tmin_ open(°C)	Tmin_ close(°C)	VPD_ close(Pa)	VPD_ open(Pa)
0	Agua	WAT				
1	Bosque perenne de aciculadas	ENF	8.31	-8	2500	650
2	Bosque de hoja ancha perenne	EBF	9.09	-8	3900	930
3	Bosque caducifolio de aciculadas	DNF	10.44	-8	3500	650
4	Bosque caducifolio de hoja ancha	DBF	9.94	-6	2800	650
5	Bosques mixtos	MF	9.5	-7	2700	650
6	Matorrales cerrados	Cshrub	8.61	-8	3300	650
7	Matorrales abiertos	Oshrub	8.8	-8	3700	650
8	Savanas arboladas	WL	11.39	-8	3300	650
9	Savana	Wgrass	11.39	-8	3600	650
10	Pastizales	Grass	12.02	-8	3900	650
12	Tierras de cultivo	Crop	12.02	-8	3800	650
13	Urbano y urbanizado	Grass	12.02	-8	3900	650
16	Esteril o vegetacion escasa	Grass	12.02	-8	3900	650

\*Clasificación 2 del producto satelital MCD12Q1

ANEXO II. Sistemas de clasificación de uso de suelo MCD12Q1

Clase	IGBP (Tipo 1)	UMD (Tipo 2)	LAI/fPAR (Tipo 3)	NPP (Tipo 4)	PFT (Tipo 5)
0	Agua	Agua	Agua	Agua	Agua
1	Bosque perenne de aciculadas	Bosque perenne de aciculadas	Grasses/Cereal crops	Vegetación perenne de hoja aciculada	Árboles perennes de aciculadas
2	Bosque de hoja ancha perenne	Bosque de hoja ancha perenne	Arbustos	Vegetación de hoja ancha perenne	Vegetación perenne de hoja ancha
3	Bosque caducifolio de aciculadas	Bosque caducifolio de aciculadas	Cultivos de hoja ancha	Vegetación caducifolia de aciculadas	Árboles caducifolios de aciculadas
4	Bosque caducifolio de hoja ancha	Bosque caducifolio de hoja ancha	Savana	Vegetación caducifolia de hoja ancha	Árboles caducifolios de hoja ancha
5	Bosques mixtos	Bosques mixtos	Bosque perenne de hoja ancha	Vegetación anual de hoja ancha	Arbusto
6	Matorrales cerrados	Matorrales cerrados	Bosque caducifolio de hoja ancha	Pastizal anual	Pastizal
7	Matorrales abiertos	Matorrales abiertos	Bosque perenne de aciculadas	suelo desnudo	Cultivos de cereales
8	Savanas arboladas	Savanas arboladas	Bosque caducifolio de aciculadas	Urbano	Cultivos de hoja ancha
9	Savana	Savana	Sin vegetación		Urbano
10	Pastizales	Pastizales	Urbano		Hielo y nieve
11	Humedales permanentes				Vegetación estéril o escasa
12	Tierras de cultivo	Tierras de cultivo			
13	Urbano y urbanizado	Urbano y urbanizado			
14	Tierras de cultivo/mosaico de vegetación natural				
15	Hielo y nieve				
16	Vegetación estéril o escasa	Barren or sparsely vegetated			
254	No clasificado	No clasificado	No clasificado	No clasificado	No clasificado
255	Valor de relleno	Valor de relleno	Valor de relleno	Valor de relleno	Valor de relleno