



ANÁLISIS TEMPORAL DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN A PARTIR DE IMÁGENES DEL SENSOR MODIS, EN LA CUENCA DEL RÍO SUCIO (CHOCÓ Y ANTIOQUIA)

**Carlos Albeiro Figueroa Ortiz
Pablo Alexander Blanco García**

Universidad Antonio Nariño
Facultad Ingeniería Ambiental
Bogotá, Colombia
2021

ANÁLISIS TEMPORAL DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN A PARTIR DE IMÁGENES DEL SENSOR MODIS, EN LA CUENCA DEL RÍO SUCIO (CHOCÓ Y ANTIOQUIA)

**Carlos Albeiro Figueroa Ortiz
Pablo Alexander Blanco García**

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título
de:

Especialista en Sistemas de información Geográfica

Director (a):

Ph.D., Andrés Felipe Carvajal Vanegas

Línea de Investigación:

PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES

Universidad Antonio Nariño
Facultad Ingeniería Ambiental
Bogotá, Colombia

2021

*La Educación es el pasaporte hacia el futuro,
el mañana pertenece a aquellos que se
preparan para él en el día de hoy.*

Malcolm X

Contenido

	Pág.
Lista de figuras.....	IX
Lista de tablas	XI
Lista de Símbolos y abreviaturas.....	XI
1. Resumen.....	XII
2. Introducción	1
2.1 Objetivo.....	2
2.1.1 Objetivos específicos.....	2
3. Marco teórico y estado del arte.....	3
3.1 Evapotranspiración.....	3
3.1.1 Estimación y medición de la evapotranspiración.....	3
3.1.2 Métodos de determinación de la Evapotranspiración a partir de Sensores Remotos.....	5
▪ Sistema de Balance Energético Superficial (SEBS) - (Su, 2002)	5
▪ Balance de energía superficial (SEBAL) - (Bastiaanssen, et al., 1998a; Bastiaanssen, et al., 1998b).....	6
▪ Mapeo de la evapotranspiración en alta resolución y con calibración internalizada (METRIC) - (Allen et al., 2007).....	7
3.2 Sensores remotos en el análisis del comportamiento de la Evapotranspiración .	7
3.2.1 Misión Landsat	7
▪ Localización de recursos hídricos:	8
▪ Evaluación de la contaminación del agua:	9
▪ Manejo de cuencas hidrográficas.....	9
▪ Asignación de recursos hídricos.	9
3.2.2 Sensor MODIS.....	10
3.3 Casos de estudio.....	10
4. Metodología.....	13
4.1 Área de estudio	13
4.2 Estructuración de la información MYD16A2 (Aqua) MOD16A2 (Terra).....	15
4.3 Caracterización temporal de la Evapotranspiración.....	17
4.3.1 Ciclo diario.....	17
4.3.2 Ciclo mensual	18
5. Resultados y discusión	21
5.1 Serie de tiempo diaria	21

5.1	Serie de tiempo mensual	24
6.	Conclusiones y recomendaciones	31
6.1	Conclusiones	31
6.2	Recomendaciones	31
7.	Bibliografía	33
8.	Anexos.....	37
8.1	Series de Tiempo Diarias.....	37
8.2	Series de Tiempo Mensuales.....	41
8.3	Series de Tiempo Mensuales Multianuales.....	47
8.4	Boxplot de Series de Tiempo Mensuales Multianuales	53

Lista de figuras

	Pág.
Figura 3-1: Área de estudio	14
Figura 3-2: Cuenca río Sucio, tramos y usos de suelo.....	14
Figura 3-3: Esquema metodológico para la descarga y estructuración de la información	16
Figura 3-4: Esquema metodológica para el preprocesamiento de las imágenes raster ..	16
Figura 3-5: Desagregación temporal de las escenas MODIS de acumulados de 8 días a 1 día	17
Figura 3-6: Estadísticos descriptivos de un archivo raster.	17
Figura 3-7: Transformación de series de tiempo espaciales a series de tiempo discretas.	18
Figura 3-8: Agregación de series de tiempo diarias a mensuales.....	18
Figura 3-9: Agregación de series de tiempo mensuales a promedios mensuales multianuales.	18
Figura 4-1: Series de tiempo diaria de la ET promedio estimada en el Sensor MODIS (Terra Aqua).....	22
Figura 4-2: Series de tiempo diaria de la ETp promedio estimada en el Sensor MODIS (Terra Aqua).....	22
Figura 4-3: Grafico de dispersión entre las series de tiempo de los sensores Terra y Aqua	23
Figura 4-4: Boxplot de series de tiempo mensual de la ETp media areal estimada en el Sensor MODIS (Terra Aqua)	24
Figura 4-5: Series de tiempo mensual de la ET y ETp media estimada en el Sensor MODIS (Terra Aqua)	25
Figura 4-6: Índice ONI	25
Figura 4-7: Series de tiempo promedio mensual multianual de la ET y ETp media estimada en el Sensor MODIS (Terra Aqua)	26
Figura 4-8: Media climatológica de ETp para la estación del IDEAM - FUEMIA [11110030]	27
Figura 4-9: Boxplot de series de tiempo mensual de la ETp media areal estimada en el Sensor MODIS (Terra Aqua)	28
Figura 7-1: Series de tiempo diaria de diferentes estadísticos descriptivos para la ET estimada en el Sensor MODIS Terra.....	37

Figura 7-2: Series de tiempo diaria de diferentes estadísticos descriptivos para la ET estimada en el Sensor MODIS Aqua.....	38
Figura 7-3: Series de tiempo diaria de diferentes estadísticos descriptivos para la ETp estimada en el Sensor MODIS Terra.....	39
Figura 7-4: Series de tiempo diaria de diferentes estadísticos descriptivos para la ETp estimada en el Sensor MODIS Aqua.....	40
Figura 7-5: Series de tiempo mensual de diferentes estadísticos descriptivos para la ET estimada en el Sensor MODIS Terra.....	41
Figura 7-6: Series de tiempo mensual de diferentes estadísticos descriptivos para la ET estimada en el Sensor MODIS Aqua.....	42
Figura 7-7: Series de tiempo mensual de diferentes estadísticos descriptivos para la ETp estimada en el Sensor MODIS Terra.....	43
Figura 7-8: Series de tiempo mensual de diferentes estadísticos descriptivos para la ETp estimada en el Sensor MODIS Aqua.....	45
Figura 7-9: Series de tiempo mensual multianual de diferentes estadísticos descriptivos para la ET estimada en el Sensor MODIS Terra.	47
Figura 7-10: Series de tiempo mensual multianual de diferentes estadísticos descriptivos para la ET estimada en el Sensor MODIS Aqua.....	48
Figura 7-11: Series de tiempo mensual multianual de diferentes estadísticos descriptivos para la ETp estimada en el Sensor MODIS Terra.	50
Figura 7-12: Series de tiempo mensual multianual de diferentes estadísticos descriptivos para la ETp estimada en el Sensor MODIS Aqua.....	51
Figura 7-13: Series de tiempo mensual multianual de diferentes estadísticos descriptivos para la ET estimada en el Sensor MODIS Terra.	53
Figura 7-14: Series de tiempo mensual multianual de diferentes estadísticos descriptivos para la ET estimada en el Sensor MODIS Aqua.....	54
Figura 7-15: Series de tiempo mensual multianual de diferentes estadísticos descriptivos para la ETp estimada en el Sensor MODIS Terra.	56
Figura 7-16: Series de tiempo mensual multianual de diferentes estadísticos descriptivos para la ETp estimada en el Sensor MODIS Aqua.....	57

Lista de tablas

Pág.

Tabla 4-1. Funciones de densidad de probabilidad ajustadas a los valores de ET y ETp promedio	29
---	----

Lista de Símbolos y abreviaturas

Símbolo	Término	Unidad SI
ET	Evapotranspiración	mm
ET_O	Evapotranspiración del cultivo de referencia	mm
ET_C	Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar	mm
$ET_{C_{aj}}$	Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar	mm

Abreviaturas

Abreviatura Término

gf	Sin datos faltantes (Gap-Filled en inglés)
----	--

1. Resumen y Abstract

El presente trabajo de grado pretende determinar la variabilidad temporal de la evapotranspiración a partir de imágenes obtenidas con el sensor MODIS, en la cuenca hidrográfica del río Sucio (Chocó y Antioquia); para ello se utilizaron las series históricas de evapotranspiración (ET) recopiladas para los satélites Terra y Aqua, en una ventana de tiempo desde 2001 a 2019 con una resolución temporal de 8 días para las variables “ET Total” y “ET Potencial Total” , se pasó de una serie de tiempo temporal a una serie de tiempo discreta, a continuación se realizó una caracterización temporal de la evapotranspiración en un ciclo diurno y mensual, con los resultados obtenidos se realizó un análisis estadístico en donde la variable principal fue el promedio, entre los resultados principales esta que para la cuenca hidrográfica del río Sucio la evaporación (ET) mensual promedio entre los años 2001 y 2019 es de 77 mm mientras que la evapotranspiración potencial (ETp) es de 97 mm; entre otras conclusiones se puede decir que los sensores remotos permiten realizar un cálculo de evapotranspiración a nivel regional de esta forma sirven de apoyo para determinar cantidades de agua necesarios en el riego de cultivos y contribuyen en la elaboración de modelos que permitan controlar fenómenos naturales como las inundaciones.

Palabras claves: Evapotranspiración, evapotranspiración potencial, sensores remotos, cuenca hidrográfica del río Sucio, sensor Modis.

This degree work aims to determine the temporal variability of evapotranspiration from images obtained from MODIS sensor, in the Sucio river basin (Chocó and Antioquia); For this, the historical evapotranspiration (ET) series collected from Terra and Aqua satellites were used, in a time window from 2001 to 2019 with a temporal resolution of 8 days for the variables "Total ET" and "Total Potential ET". A temporal time series was changed to a discrete time series, then a temporal characterization of evapotranspiration was carried out in a diurnal and monthly cycle, with the results obtained a statistical analysis was carried out where the main variable was the average. Among the main results is that for the Sucio river basin, the average monthly evaporation (ET) between the years 2001 and 2019 is 77 mm while the potential evapotranspiration (ETp) is 97 mm. In conclusion, it can be said that remote sensors allow a calculation of evapotranspiration to be carried out at the regional level in this way they serve as support to determine the amounts of water necessary in the irrigation of crops and contribute to the development of models that allow controlling natural phenomena such as floods.

Key words: Evapotranspiration, Potential evapotranspiration, Remote sensing, Sucio river basin, MODIS sensor.

2. Introducción

Para de Santa Olalla Mallas & Lopez, (2005), se considera la evapotranspiración una variable importante de las ciencias de la tierra; incluye dos variables, la evaporación y la transpiración; el primero hace referencia a la cantidad de agua que se evapora de la superficie del suelo y el segundo a la transpiración de la cobertura vegetal; así las cosas, se puede identificar que la evapotranspiración sirve de apoyo para realizar balances hídricos de una zona afectada por inundaciones o determinar por ejemplo, la cantidad de agua necesaria en el riego de un cultivo.

La forma clásica de hallar la evapotranspiración es usando técnicas de correlación de Eddy, relación de Bowen, lisímetros de pesada, estos métodos sirven para determinar valores puntuales, sin embargo, existen otros métodos que pueden ayudar a determinarla de una forma regional usando para ello imágenes satelitales.

El presente proyecto pretende determinar la evapotranspiración (ET) y evapotranspiración potencial (ETp) de la subcuenca hidrográfica del río Sucio (Choco y Antioquia) usando el sensor remoto MODIS (Aqua/Terra), para ello se usaron una serie de datos complementados (M*D16A2GF), es importante mencionar que en los últimos meses la subcuenca hidrográfica ha presentado inundaciones en los pueblos aledaños y de acuerdo con la información que se tiene por parte del IDEAM no existen suficientes estaciones climatológicas que permitan realizar la medición completa de la evapotranspiración.

La característica principal de usar imágenes satelitales es que permite determinar variables como la evapotranspiración de una forma regional, de esta forma se tiene cobertura de toda la subcuenca; con el fin de cuantificar y realizar un análisis temporal; se pasaran una serie de datos espaciales a datos descriptivos, es decir estadísticos como valor máximo, valor mínimo, promedio y sumatoria, sin embargo, el más relevante será el promedio, con

el que se harán graficas que permitan visualizar la evapotranspiración en una ventana de tiempo entre los años 2001 y 2019.

2.1 Objetivo

Determinar la variabilidad temporal de la evapotranspiración a partir de imágenes obtenidas con el sensor MODIS, en la cuenca hidrográfica del río Sucio (Chocó y Antioquia).

2.1.1 Objetivos específicos

- Identificar el comportamiento de la evapotranspiración en la cuenca hidrográfica del río Sucio.
- Analizar la variabilidad temporal de la evapotranspiración de la cuenca hidrográfica del río Sucio.

3. Marco teórico y estado del arte

En el presente capítulo se describe el estado del arte en cuanto a las investigaciones realizadas a nivel nacional e internacional con relación al estudio y aplicación de la Evapotranspiración calculada a partir de Sensores Remotos, tanto a nivel espacial como a nivel temporal; igualmente, se presentan algunos de los métodos y técnicas empleadas para tal fin.

3.1 Evapotranspiración

La evapotranspiración es definida según Allen et al., (1998) como una fusión de dos procesos, evaporación y transpiración, una hace referencia a la pérdida de agua del suelo y otra a la transpiración de la cobertura vegetal.

Sin embargo, esta es una definición general del proceso, existen definiciones específicas que se presentan a continuación por Sánchez, (2017):

- Evapotranspiración potencial (ET_P): Es aquella que se da si la cobertura vegetal y la humedad del suelo están en condiciones óptimas.
- Evapotranspiración Real o Actual (ET_R): Es aquella que se da en condiciones reales para cada caso.
- Evapotranspiración de referencia (ET_o): Es aquella que se da en un cultivo específico, por ejemplo, si hablamos de pasto altura de 0.12 m, albedo de 0.23 y una resistencia superficial fija de 70 s/m.

3.1.1 Estimación y medición de la evapotranspiración

Según Rana & Katerji, (2000) es importante agrupar la forma de medición de la ET, donde *“el enfoque o método principal dependa de conceptos de hidrología, micrometeorología y*

fisiología vegetal así como su forma de estimación a partir de aproximaciones analíticas o enfoques empíricos, como se muestra a continuación:

MEDICIÓN

- Enfoques hidrológicos
 - Balance hídrico del suelo
 - Lisímetros
- Enfoques micrometeorológicos
 - Balance energético y Razón de Bowen
 - Métodos aerodinámicos
 - Covarianza de remolinos
- Enfoques de fisiología vegetal
 - Método de flujo de savia
 - Sistema de cámaras

ESTIMACIÓN

- Aproximación analítica
 - Modelo de Penman-Monteith
- Enfoque empírico
 - Métodos basados en el enfoque del coeficiente de cultivo
 - Métodos basados en la modelización del balance hídrico del suelo.

Uno de los métodos más empleados en la medición de la ET es la implementación de Lisímetros los cuales son definidos por Gonzalez et al., (2020) como recipientes que contiene un volumen de suelo y a través de un seguimiento de algunos parámetros permite determinar validables como la evapotranspiración. Ahora bien, existen distintos tipos de lisímetros, entre los que se encuentran los lisímetros volumétricos y de pesada.

Referente a los métodos de estimación de la ET, uno de los modelos comúnmente empleado es el método de FAO Penman-Monteith (R. Allen et al., 1998), para El IDEAM, (2017) afirma que el método permite el cálculo de la evapotranspiración de referencia, la ecuación es la siguiente:

$$\lambda ET_o = \frac{\Delta(R_n - G) + \left[\frac{\rho_a C_p (e_s - e_a)}{r_a} \right]}{\Delta + \lambda \left(1 + \frac{r_s}{r_a} \right)} \quad \text{Ecuación 3.1}$$

En donde

- R_n : Radiación neta

- G : Flujo de calor en el suelo
- $(e_s - e_a)$: Déficit de presión del vapor del aire
- ρ_a : Densidad del aire
- C_p : Calor específico del aire seco
- Δ : Pendiente de la curva de presión de saturación
- λ : Constante psicrométrica
- r_a : Resistencia aerodinámica de la superficie para el vapor de agua
- r_s : Resistencia superficial total

Mayor información sobre distintos métodos de estimación de la ET pueden ser consultados en Rana & Katerji, (2000) e IDEAM, (2017)

3.1.2 Métodos de determinación de la Evapotranspiración a partir de Sensores Remotos

Hobbins & Huntington, (2016) aseguran que las imágenes satelitales ópticas y térmicas de la superficie terrestre son comúnmente empleadas en la estimación de la ET y que estos métodos han permitidos a científicos y consultores realizar tomas de decisión a partir de su conocimiento tanto espacial como temporal.

Algunas de los algoritmos empleados en la determinación de la ET a partir de imágenes satelitales son mostrados a continuación:

- Sistema de Balance Energético Superficial (SEBS) - (Su, 2002)

El algoritmo denominado “Sistema de Balance Energético Superficial” o “Surface Energy Balance System” en inglés, fue presentado por Su, (2002) como un medio para estimar la ET diaria, mensual y anual en un ambiente semiárido y como medio de monitoreo de sequias.

Este método consiste en un set de procedimientos que, a partir de la determinación de parámetros físicos de la superficie de la tierra, como albedo, emisividad, la temperatura y tipo de cobertura vegetal desde la medición de la reflectancia espectral y radiación, así

como la determinación de la longitud de rugosidad para el traslado de calor pretende determinar la fracción de evaporación en base al balance energético.

Guzmán-Alvarez, (2007) señalan que este modelo requiere como entrada tres sets de información.

- Información referente al albedo de superficie de la tierra, emisividad, temperatura, cobertura fraccional de vegetación, índice de área foliar (LAI) y la altura de la vegetación. Cuando la información de vegetación no está disponible, el índice NDVI se usar como un sustituto.
 - Información referente a presión atmosférica, temperatura, humedad, y la velocidad del viento a una altura de la referencia.
 - Información referente a radiación solar descendente, y radiación onda larga descendente.
- Balance de energía superficial (SEBAL) - (Bastiaanssen, et al., 1998a; Bastiaanssen, et al., 1998b)

El algoritmo denominado “Balance de energía superficial” o “Surface Energy BALance” en inglés, fue presentado por Bastiaanssen, et al., (1998a) y Bastiaanssen, et al., (1998b) y permite la obtención de la ET de grandes áreas con cualquier tipo de cobertura a través de datos de imágenes de satélite y algunos datos complementarios de superficie y se calcula como la diferencia de la ecuación de balance de energía en base a píxeles como se muestra en la siguiente ecuación Ecuación 3.2):

$$LE_{PIXEL} = \lambda ET_{PIXEL} = R_{n.PIXEL} - H_{n.PIXEL} - G_{n.PIXEL} \quad \text{Ecuación 3.2}$$

Donde

- LE_{PIXEL} : Flujo de latente de calor del píxel.
- ET_{PIXEL} : Evapotranspiración en cada píxel.
- L : calor latente de vaporización.
- $R_{n.PIXEL}$: radiación neta para cada píxel.
- $H_{n.PIXEL}$: flujo sensible de calor para cada píxel.
- $G_{n.PIXEL}$: flujo de calor del suelo para cada píxel.

- Mapeo de la evapotranspiración en alta resolución y con calibración internalizada (METRIC) - (Allen et al., 2007)

El algoritmo denominado “Mapeo de la evapotranspiración en alta resolución y con calibración internalizada” o “Satellite-Based se basa en un balance de energía para ello emplea imágenes de satélite. A continuación, se muestra la ecuación 2.3 que permite calcular el flujo de calor latente:

$$\lambda E = R_n - H - G \quad \text{Ecuación 3.3}$$

Donde:

- λE : Calor latente (energía consumida en el proceso de evapotranspiración (W/m^2))
- R_n : Radiación neta (W/m^2)
- G : Flujo de calor del suelo (W/m^2)
- H : Flujo de calor sensible intercambiado entre la superficie y la atmósfera (W/m^2).

3.2 Sensores remotos en el análisis del comportamiento de la Evapotranspiración

A continuación, se presentan dos de las misiones mayormente utilizadas como fuente de datos para el cálculo de la ET

3.2.1 Misión Landsat

La misión Landsat es un programa conjunto entre la NASA y la USGS proporciona el registro espacial más largo que existe en la tierra, brinda información esencial para ayudar a los administradores de tierras y los encargados en la formulación de políticas a tomar decisiones sobre nuestros recursos y el medio ambiente (Landsat Science: Landsat Homepage, <https://landsat.gsfc.nasa.gov/>).

La superficie terrestre global cubre aproximadamente 150 millones de kilómetros cuadrados, aproximadamente el 30 por ciento de la superficie de la Tierra, y los seres humanos ocupan o utilizan aproximadamente el 80 por ciento de la superficie terrestre, incluido el 40 por ciento convertido a la agricultura. La población mundial alcanzó los 7 mil millones en 2011 y se prevé que aumente a 9 mil millones en 2050. Para alimentar y albergar a la creciente población del planeta, se ha requerido un uso extensivo e intensivo de la tierra, pero la degradación ambiental causada por estas actividades necesarias está

disminuyendo el impacto del planeta. capacidad para mantener la producción de alimentos y fibras necesarias y el suministro de agua dulce. Foley y col. (2005) declara “Existe una necesidad creciente de tomar decisiones y acciones políticas en múltiples escalas geográficas.... La propia naturaleza del problema lo requiere. El uso de la tierra ocurre en lugares locales, con beneficios sociales y económicos del mundo real, mientras que potencialmente causa la degradación ecológica a escala local, regional y global (Landsat Science: Landsat Homepage, <https://landsat.gsfc.nasa.gov/>).

Con el crecimiento de la población actual y las tendencias ambientales, el Programa Ambiental de la ONU estima que 1.800 millones de personas enfrentarán la escasez de agua para el 2025. El agua significa supervivencia para las personas y otras especies de las que dependemos para prosperar, lo que hace que la administración adecuada de nuestros recursos hídricos sea vital. Las buenas decisiones requieren buenos datos (Landsat Science: Landsat Homepage, <https://landsat.gsfc.nasa.gov/>).

Desde 1972, la serie de satélites Landsat ha estado proporcionando estos datos. Las decisiones basadas en Landsat sobre cómo gestionar los recursos hídricos limitados han impactado a millones de personas en todo el mundo. Desde encontrar agua para los refugiados en naciones áridas hasta reducir la contaminación en nuestras vías fluviales nacionales, Landsat permite tomar decisiones que ayudan directamente a las personas (Landsat Science: Landsat Homepage, <https://landsat.gsfc.nasa.gov/>)

Datos para la toma de decisiones:

- Localización de recursos hídricos:

El acceso al agua dulce es fundamental para la supervivencia. Los datos Landsat sirven como herramienta de apoyo en la búsqueda de agua para regiones áridas y semiáridas. La ONU utilizó esta herramienta para encontrar fuentes de agua subterráneas para 200.000 refugiados sudaneses en Chad en 2005. En 2011, La herramienta ayudó a la ONU a decidir correctamente dónde perforar en busca de agua en Darfur e Irak devastados por la guerra. Debido a la idoneidad de escala y cobertura espacial, las imágenes Landsat han sido utilizado para crear mapas base de regiones remotas que luchan con condiciones de sequía. Estos mapas sirven como herramientas esenciales para esfuerzos humanitarios (Landsat and Water Management, LS-2013-1-002-GSFC (4/4))

- Evaluación de la contaminación del agua:

Dependemos de lagos, canales y embalses limpios para nadar, pescar y beber agua. Usando información del azul de Landsat y bandas rojas, la Agencia de Control de la Contaminación de Minnesota ha podido monitorear la claridad del lago de Minnesota, que es un clave indicador de la calidad del agua: proporciona información sobre la calidad de agua para miles de lagos que de otra manera también sería costoso de obtener. Los administradores de recursos estatales usan esta información para vigilar los cambios en la calidad del agua y focalizar los esfuerzos de remediación. (Landsat and Water Management, LS-2013-1-002-GSFC (4/4))

- Manejo de cuencas hidrográficas.

El agua de nuestros lagos, bahías y estuarios proviene de cuencas hidrográficas circundantes. Los datos de Landsat ayudan al medio ambiente, los administradores limitan la contaminación, a menudo el exceso de nitrógeno y fósforo: que corre desde las cuencas hidrográficas hasta los cursos de agua. "Landsat es una herramienta crítica e invaluable para caracterizar el paisaje y cartografiarlo a lo largo del tiempo ", dice Peter Claggett, un geógrafo investigador del Servicio Geológico de EE. UU. que monitorea el uso de la tierra y la contaminación del agua en la cuenca de la bahía de Chesapeake que abarca porciones de seis estados.

- Asignación de recursos hídricos.

El riego representa el 80 por ciento del uso de agua dulce en el EE. UU. Ha cambiado la mayor demanda de suministros escasos de agua estrategias de gestión del agua frente al aumento del suministro de agua a la gestión innovadora del uso del agua a niveles sostenibles.

Los datos de Landsat se utilizan regularmente para cuantificar el agua consumida por riego. Landsat también sirve como árbitro imparcial en disputas por derechos de agua. En el oeste de los EE. UU. El precedente del uso del agua es clave para las negociaciones sobre los derechos de agua, miradas retrospectivas posibles gracias al rico archivo de Landsat, resolución espacial adecuada e información térmica (disponible desde 1982) han hecho de Landsat indispensable para los administradores de recursos hídricos del oeste de EE. UU. Como Tony Morse, un gerente de tecnología geoespacial jubilado de Idaho El Departamento de Recursos Hídricos explicó, "confiamos en Datos Landsat no patentados

y disponibles públicamente. Esto significa que los datos de todas las partes en un conflicto sean consistentemente procesados e igualmente disponibles para todos ". (Landsat and Water Management, LS-2013-1-002-GSFC (4/4))

3.2.2 Sensor MODIS

El instrumento MODIS está operando en las naves espaciales Terra y Aqua. Tiene una franja de visualización de 2.330 km y visualiza toda la superficie de la Tierra cada uno o dos días. Sus detectores miden 36 bandas espectrales entre 0.405 y 14.385 μm , y adquiere datos en tres resoluciones espaciales: 250 m, 500 m y 1000 m.

Los productos MODIS son usados en disciplinas como oceanografía, la biología y las ciencias atmosféricas. El Equipo de Disciplina Atmosférica MODIS-VIIRS desarrolla y mantiene algoritmos de detección remota de imágenes para la creación de registros de datos climáticos a largo plazo de parámetros geofísicos derivados relacionados con las propiedades atmosféricas de la Tierra (aerosoles, nubes, vapor de agua). El Atmosphere Team tiene sus raíces en las misiones insignia Terra y Aqua de EOS, lanzadas en 1999 y 2002, respectivamente, y específicamente en apoyo de los espectrorradiómetros gemelos de imágenes de resolución moderada (MODIS). A medida que estas misiones y sensores envejecen, la NASA está respaldando la extensión de los registros de datos climáticos MODIS clave de la era EOS al generador de imágenes en órbita polar de próxima generación VIIRS de la NOAA, el primero de los cuales se lanzó en la plataforma Suomi NPP en 2011. Tanto MODIS como VIIRS proporcionan amplio rango espectral (canales de banda estrecha de visible a infrarrojo), alta resolución espacial y cobertura global casi día a día de la Tierra y su atmósfera.

3.3 Casos de estudio

A continuación, se presentan varios estudios en donde en general se ha tenido como objetivo principal determinar el impacto del uso de imágenes satelitales como fuente de datos para la determinación de la ET, así como su implementación.

Reyes González et al., (2019) estimaron la evapotranspiración de maíz forrajero apoyada con sensores remotos y mediciones in situ, el objetivo principal fue estimar la

evapotranspiración real en cultivos de maíz, mediante índices de vegetación medidos in situ y estimados mediante sensores remotos, con la utilización de ambos métodos se pudo mejorar la programación del riego y la optimización del recurso hídrico.

Para Castañeda-Ibáñez et al., (2018), calcular la evapotranspiración es importante en el uso y manejo del agua, para ello utilizo el método de METRIC utilizando imágenes satelitales, para este caso se calculó con el fin de determinar la eficiencia del agua en distrito de riego río Yaquí, el resultado del ejercicio sugiere que METRIC se puede aplicar a series de tiempo de imágenes satelitales en estudios relacionados con la distribución temporal y espacial de la evapotranspiración.

En el caso de Vives, (2004) desarrollo un proyecto en donde propone una metodología novedosa usando imágenes Landsat ETM+ cuyo objetivo era la estimación Espacio – Temporal del evapotranspiración usando imágenes satelitales, propone usar una ecuación en una dimensión que gobierna el balance de energía a nivel de la superficie para estimar la evapotranspiración a escala temporal.

Marini, & Santamaría, (2017), con base a un análisis de regresión múltiple de parámetros en siete estaciones meteorológicas y dos variables derivadas de imágenes MODIS: temperatura de superficie (TS) e Índice Normalizado de Diferencia de Vegetación (NDVI) se creó un modelo de cálculo de evapotranspiración real (ETR) y evapotranspiración potencial (ETP) en el sudoeste de la provincia de Buenos Aires (Argentina) en base al análisis del período 2000/2014, los resultados permitieron estimar la evapotranspiración en zonas en zonas donde no existen datos meteorológicos.

Para Flores & Pérez, (2007) la evapotranspiración es importante en estudios hidrológicos, climatológicos, agronómicos y ecológicos. Compara tres modelos para la estimación de esta variable ambiental, a partir de la información aportada por las imágenes del sensor MODIS(MOD07), una de las conclusiones del ejercicio es desarrollar una metodología para mejorar el producto espacial y otra es utilizar datos levantados en terreno para mejorar los resultados.

En el caso de Mulleady & Barrera, (2012), se realizó una variación en la técnica de Venturini, una nueva expresión de evapotranspiración relativa, para ello solo se usó

percepción remota, se estimaron por primera vez mapas de evapotranspiración de la Provincia de Buenos Aires; se demostró que la técnica da valores de evapotranspiración esperados en un día típico de verano presentando una relación adecuada con los valores de Ts y NDVI obtenidos de los productos MODIS sin acudir a mediciones en situ.

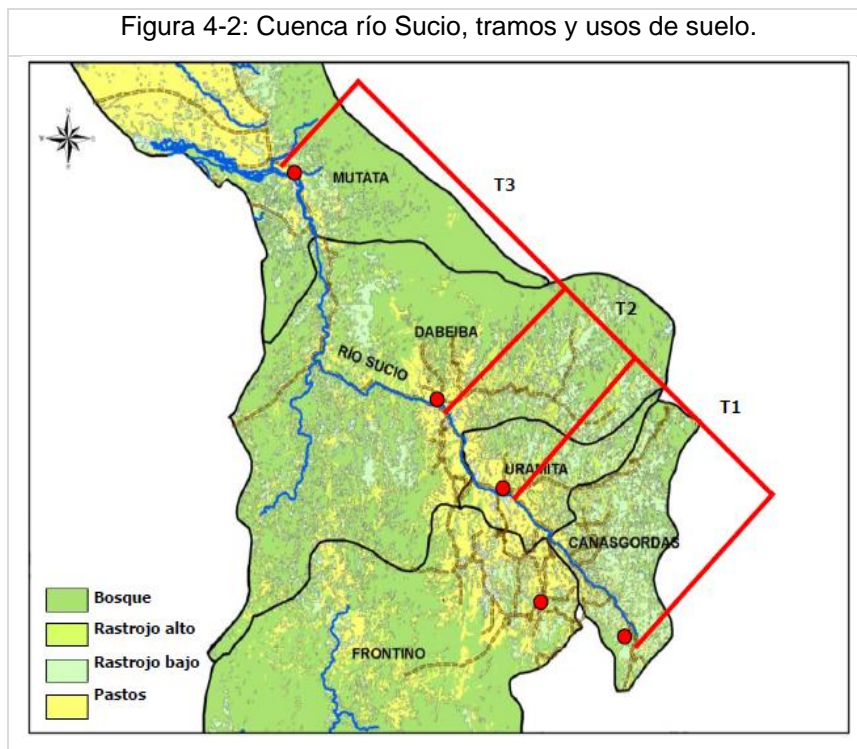
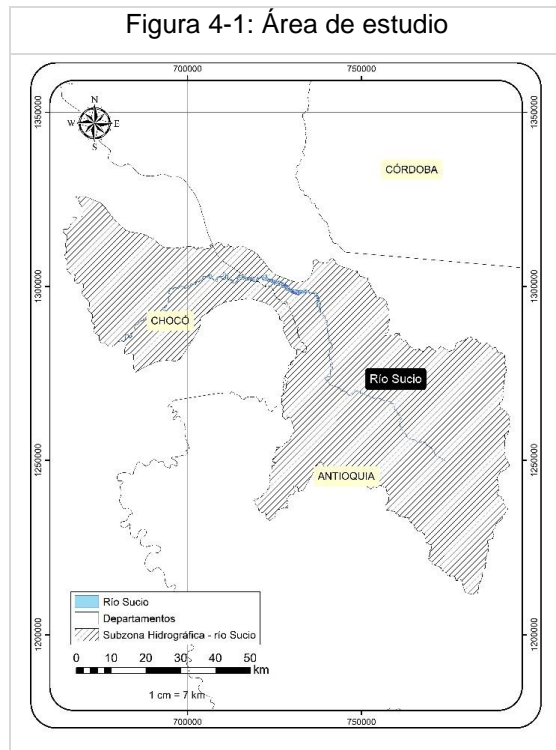
4. Metodología

4.1 Área de estudio

El área de estudio es la subzona hidrográfica del río Sucio (Figura 4-1), la cual se encuentra entre los departamentos de Chocó y Antioquia, más específicamente en los municipios de Caicedo, Urrao, Santa Fe de Antioquia, Giraldo, Abriaquí, Frontino, Buriticá, Cañasgordas, Uramita, Murindó, Peque, Dabeiba, Carmen del Darién (Curbaradó), Ituango, Mutatá, Belén De Bajirá y Riosucio.

La Corporación para el Desarrollo Sostenible del Urabá (CORPOURABA) divide el Río Sucio en tres tramos (Figura 4-2):

- T1 (Cañasgordas): El tramo inicia aguas arriba del casco urbano del municipio de Cañasgordas y se extiende hasta un punto aguas arriba del casco urbano de Uramita, alcanzando una longitud de 30 km. Aproximadamente. En sus márgenes se encuentran áreas en rastrojo bajo y pastos principalmente.
- T2 (Uramita): Tramo del río Sucio que se extiende desde un punto aguas arriba del casco urbano de Uramita, hasta otro punto aguas arriba del casco urbano de Dabeiba. El tramo tiene una longitud aproximada de 10 km. y en sus márgenes se encuentran predominantemente pastos.
- T3 (Dabeiba): Este tramo inicia aguas arriba del casco urbano del municipio de Dabeiba y se extiende hasta un punto previo a la confluencia del río Mutatá sobre el río Sucio. El tramo tiene una longitud aproximada de 40 Km. y en sus márgenes se encuentran pastos y porciones de bosque asociados a rastrojo bajo.



Fuente: CORPOURBA

4.2 Estructuración de la información MYD16A2 (Aqua) | MOD16A2 (Terra)

En la primera fase de la metodología se desarrolló la descarga y estructuración de la información disponible. Se utilizaron las series históricas de ET recopiladas para los satélites Terra y Aqua, en una ventana de tiempo desde 2001 a 2019 con una resolución de 8 días para las variables “ET Total” y “ET Potencial Total”. Para la mayoría de análisis se emplearon las series con datos complementados (M*D16A2GF)

La estructuración de la información se llevó a cabo mediante la consolidación de una base de datos no estructurada que pudiera dar respuestas rápidas a cada uno de los procesos, tanto de análisis como de publicación de resultados. Para esto se empleó el software R (R Core Team, 2021), mediante la librería MODISr (Busetto & Ranghetti, 2016), la cual debe configurarse en tres momentos como se muestra a continuación (Figura 4-3):

- **Producto y Capas:** En este esquema deben ser definidos los productos que se quieren descargar; para nuestro caso fueron los productos de ET y ETp. Seguido a esto deben definirse los sensores que de los cuales se extraerá esta información; Para este caso fueron los sensores de Aqua y Terra
- **Opciones espaciales/temporales:** Aquí, se debe definir la resolución espacial a la cual se desea tener los archivos raster a descargar, así como la función de remuestreo a emplear. De igual se debe definir el rango temporal en el cual se desea realizar la descarga de información.
- **Formato de salida, opciones y carpetas:** En este esquema se define el método de descarga o de trabajo fuera de línea (si ya se cuenta con la información) así como el formato de salida y la carpeta donde se guardará la información

Una vez descargada la serie de tiempo de ET y ETP para el periodo comprendido entre 2001 y 2019 se procedió (Figura 4-4) a realizar un recorte de la misma teniendo el límite de la subzona hidrográfica definida para el río Sucio (Figura 4-1), seguido a este proceso se procedió a reemplazar distintos valores que según la documentación propia de MODIS (Running et al., 2019) no corresponden a datos de ET (como por ejemplo aquellos pixel con valores de 32766 corresponden a cuerpos de agua), y a reescalar las unidades de los pixels para que fueran en milímetros simplemente multiplicando por 0.1.

Figura 4-3: Esquema metodológico para la descarga y estructuración de la información

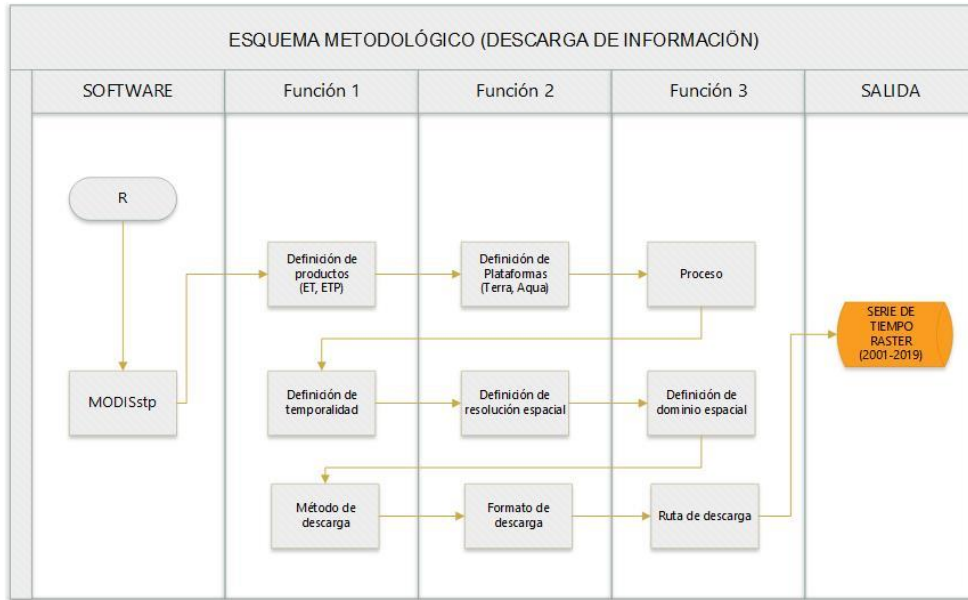
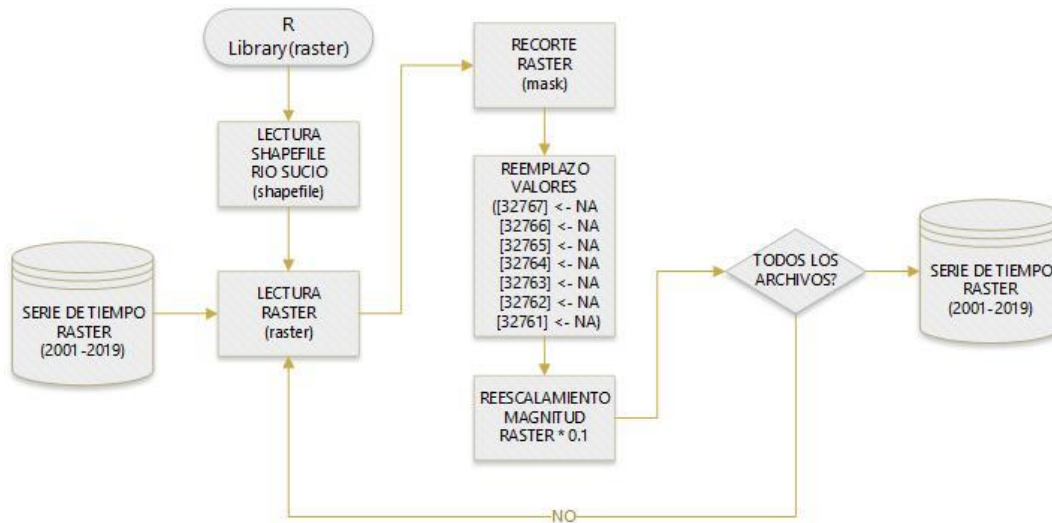
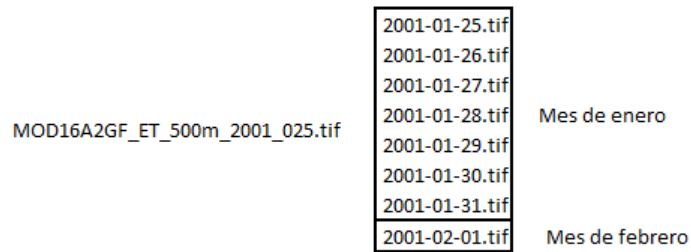


Figura 4-4: Esquema metodológica para el preprocesamiento de las imágenes raster



Una vez ordenados y estructurados los datos raster, se procedió a realizar la desagregación temporal (Figura 4-5) de cada uno de los archivos a escala diaria. Este procedimiento se realizó ya que cada escena de MODIS corresponde al valor acumulado durante 8 días y era necesario poder repartir el valor de ET o ETP en los meses a los cuales estos correspondían. Para realizar la desagregación temporal se planteó la suposición que la EP y ETP se repartían de igual manera en los 8 días.

Figura 4-5: Desagregación temporal de las escenas MODIS de acumulados de 8 días a 1 día



4.3 Caracterización temporal de la Evapotranspiración

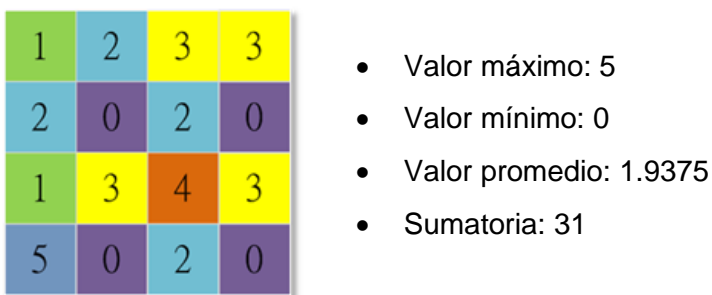
La segunda Fase de la metodología se centra en determinar algunas propiedades de la ET respecto al dominio temporal (anual, mensual y diario).

4.3.1 Ciclo diurno

Con el fin de establecer series de tiempo características de la información de ET, se procedió a determinar estadísticas descriptivas para cada una de las escenas obtenidas.

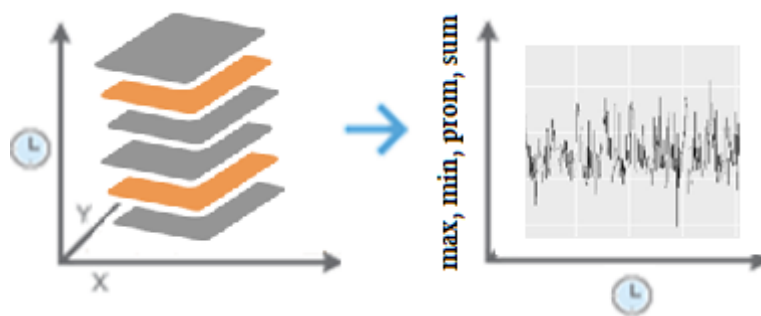
Estos estadísticos son: valor máximo, mínimo, promedio, sumatoria, un ejemplo del resultado de este procedimiento se muestra en la Figura 4-6.

Figura 4-6: Estadísticos descriptivos de un archivo raster.



De esta forma se logra transformar valores continuos que nos brindan los archivos ráster del sensor MODIS (Terra | Aqua) en valores discretos representativos de la zona de estudio (Figura 4-7).

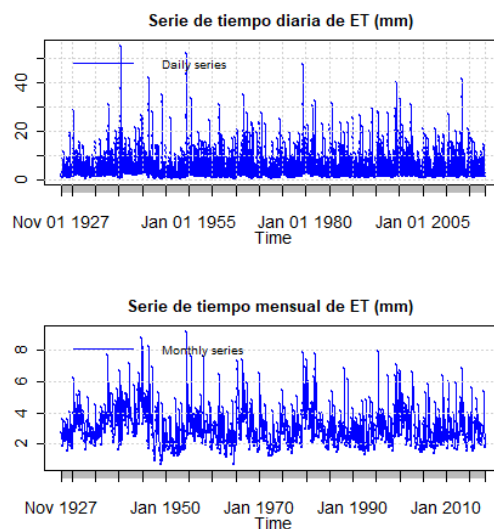
Figura 4-7: Transformación de series de tiempo espaciales a series de tiempo discretas.



4.3.2 Ciclo mensual

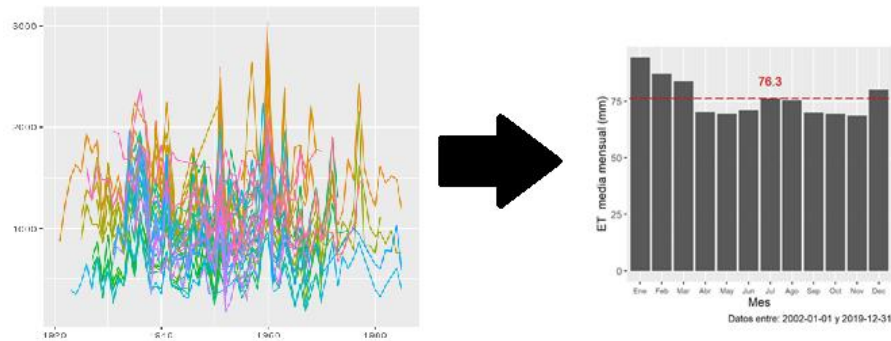
A partir de las series de tiempo diarias obtenidas en el numeral anterior, se procedió a agregarlas de manera mensual (Figura 4-8):

Figura 4-8: Agregación de series de tiempo diarias a mensuales.



Una vez realizado este procedimiento se procedió a realizar la caracterización estadística de cada uno de los meses a partir de graficas boxplot (cajas y patillas), así como la determinación de los promedios mensuales multianuales (Figura 4-9) con el fin de entender la tendencia de la ET y ETp en la zona.

Figura 4-9: Agregación de series de tiempo mensuales a promedios mensuales multianuales.



Con el fin de validar la fiabilidad de los datos obtenidos, se realizó una comparación de las magnitudes de los valores calculados por los sensores MODIS (Terra | Aqua) y los valores estimados en estaciones insitu (IDEAM).

Por último, se procedió a calcular una función de densidad de probabilidad que representase el comportamiento estadístico de los valores máximos mensuales anuales de la ET y la ETP, para esto se empleó el software EasyFit el cual ajusta los parámetros de estas distribuciones a partir de los métodos de los momentos, L-momentos, máxima verosimilitud y mínimos cuadrados para las distribuciones Beta, Johnson SB, Kumaraswamy, Pert, Power Function, Reciprocal, Triangular, Uniform, Cauchy, Error, Error Function, Gumbel Max, Gumbel Min, Hyperbolic Secant, Johnson SU, Laplace (Double Exponential), Logistic, Normal, Student's t, Burr, Chi-Squared, Dagum, Erlang, Exponential, F, Fatigue Life (Birnbau-Saunders), Frechet, Gamma, Generalized Gamma, Inverse Gaussian, Levy, Log-Gamma, Log-Logistic, Lognormal, Nakagami, Pareto (First Kind), Pareto (Second Kind), Pearson Type 5, Pearson Type 6, Rayleigh, Rice, Weibull, Generalized Extreme Value, Generalized Logistic, Generalized Pareto, Log-Pearson 3, Phased Bi-Exponential, Phased Bi-Weibull y Wakeby.

5. Resultados y discusión

En este capítulo se presentan y discuten los resultados de las diferentes actividades realizadas mediante el empleo de la metodología descrita en el Capítulo 4.

5.1 Serie de tiempo diaria

A partir de la discretización de las distintas escenas recopiladas para los sensores MODIS | Terra (MOD16A2- v006) y MODIS | Aqua (MYD16A2 - v006) se obtuvieron series de tiempo de valores máximos, mínimos, promedios y la sumatoria de los píxeles contenidos dentro del área de estudio. La Figura 5-1 y la Figura 5-2 muestran la serie de tiempo diaria de valores promedio de ET y la ETp de la cuenca.

Estas series presentan una temporalidad limitada entre el año 2001 al 2019 para el sensor MODIS | Terra, mientras que el sensor MODIS | Aqua presenta información entre el año 2002 al 2019. Esta falta de información obedece a la puesta en funcionamiento de este último sensor.

Una vez revisadas y comparadas las series de tiempo, se decidió implementar únicamente aquellas generadas por la información sin datos faltantes (gf) ya que los coeficientes de correlación entre las series de Terra y Aqua aumentan con estos datos.

Por ejemplo, los resultados muestran una clara mejora entre el uso de la información procedente de los productos MOD16A2gf

para la serie de tiempo del estadístico promedio, el coeficiente de correlación entre los dos sensores aumenta de 0.87 a 0.99, la Figura 5-3 ejemplifica el grado de dispersión entre estos, donde la figura al lado izquierdo muestra el grado de dispersión entre las series ET y la figura al lado derecho muestra las series de ET(gf)

Figura 5-1: Series de tiempo diaria de la ET promedio estimada en el Sensor MODIS (Terra | Aqua)

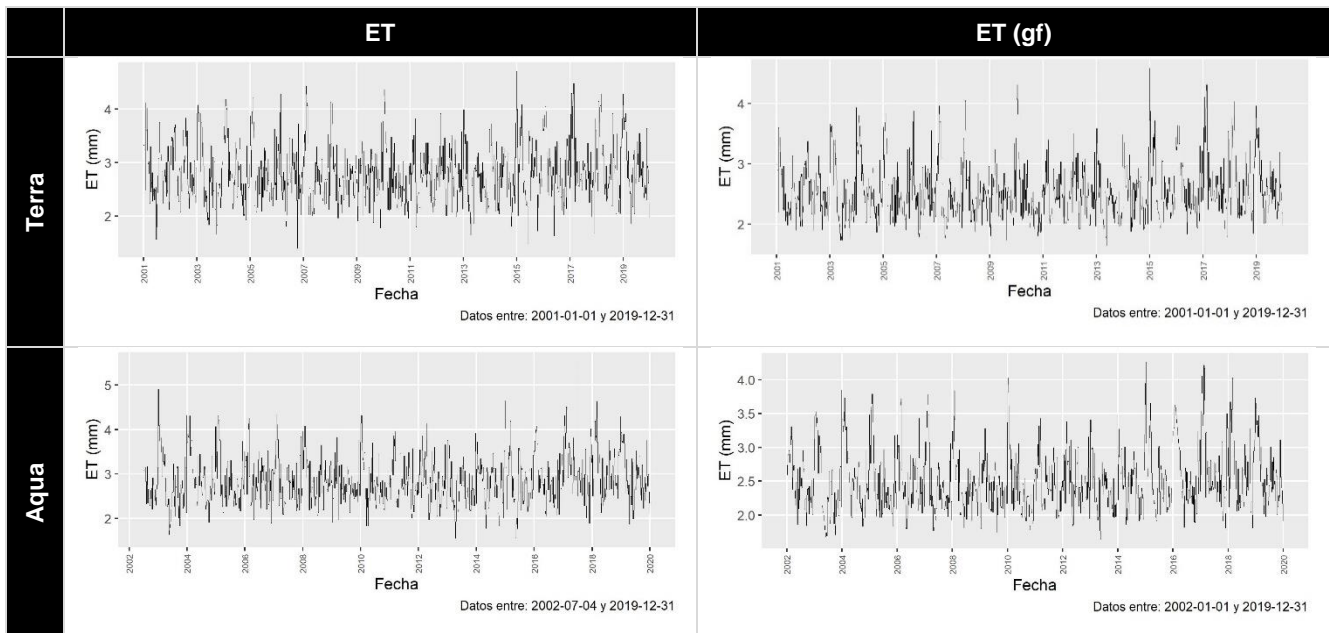


Figura 5-2: Series de tiempo diaria de la ETp promedio estimada en el Sensor MODIS (Terra | Aqua)

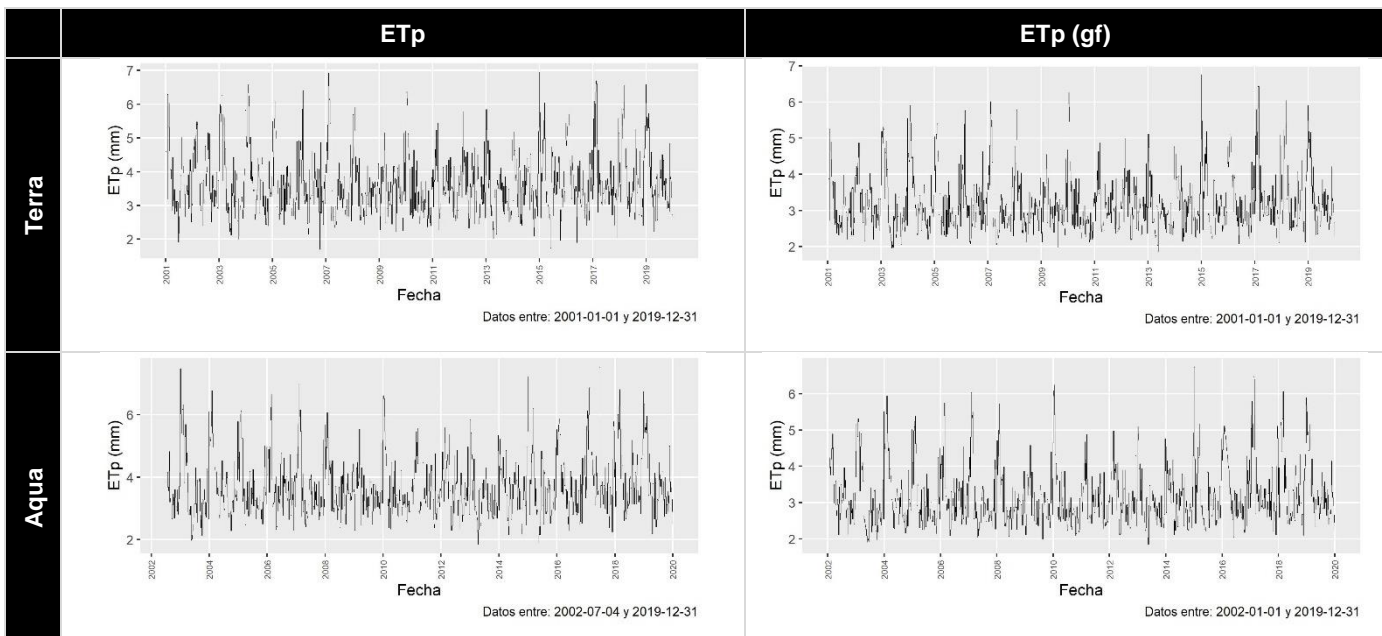
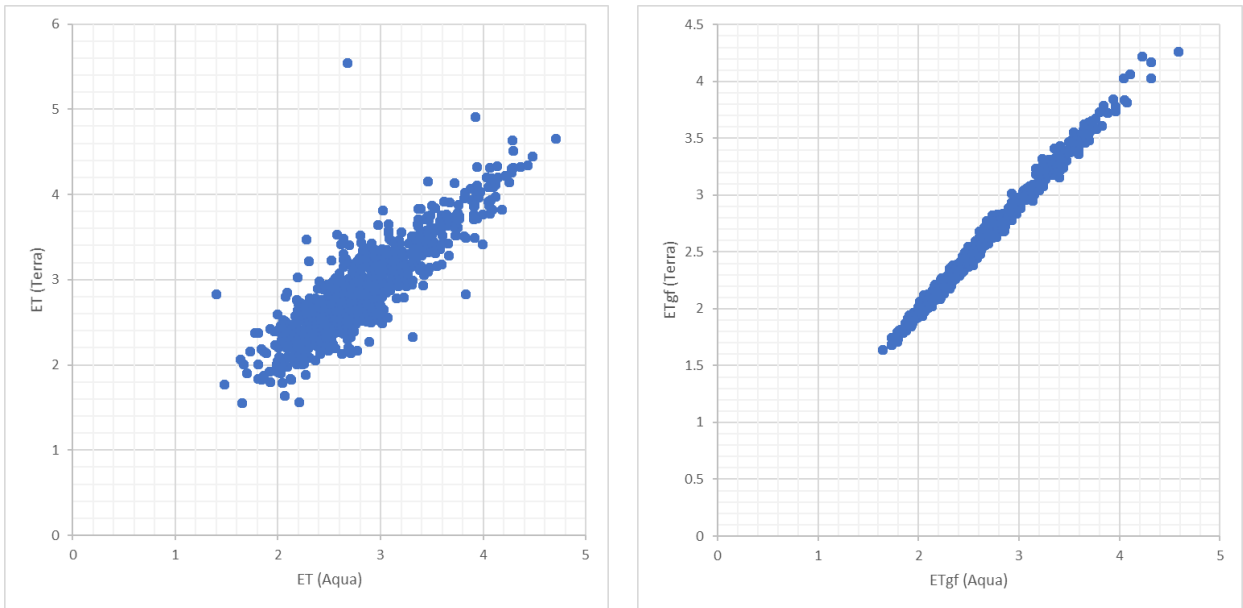


Figura 5-3: Grafico de dispersión entre las series de tiempo de los sensores Terra y Aqua

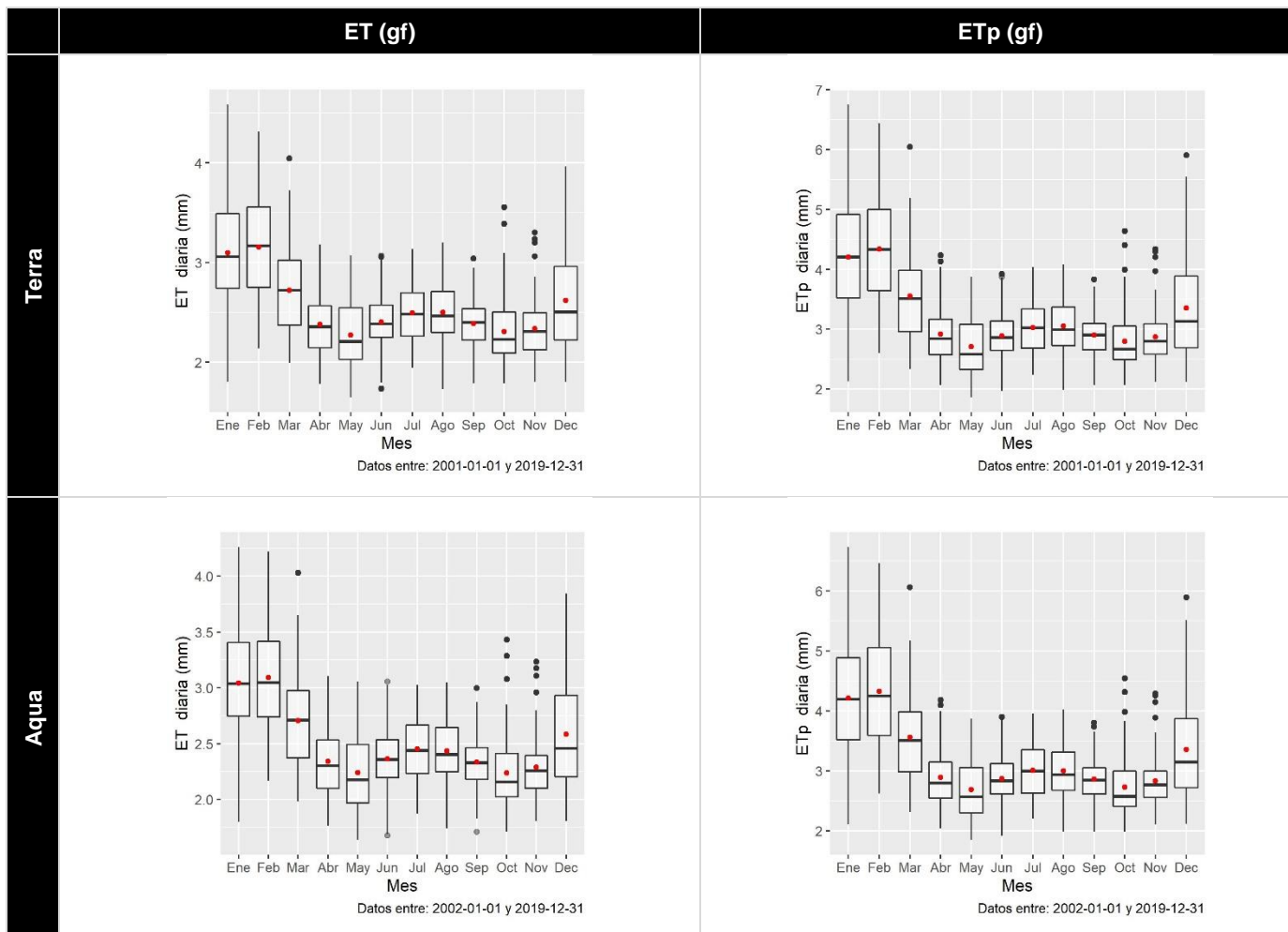


La totalidad de series de tiempo para diferentes estadísticos descriptivos pueden ser consultadas en el Anexo 7.1.

El comportamiento de la ET y la ETp mes a mes en el área de estudio presenta un comportamiento monomodal teniendo sus valores pico en los meses de diciembre a marzo, donde sus valores de ET presentan un rango aproximado de comportamiento entre 2.5 y 5 mm, mientras que la ETp oscila aproximadamente entre los 2.3 y 7.5 mm (Figura 5-4).

Por otro lado, es notable como para el resto de meses (de abril a noviembre) la dispersión de los datos es casi constante teniendo variaciones leves en sus promedios. Respecto a los valores “anómalos” se nota que tienen a darse en los meses de septiembre, octubre y noviembre.

Figura 5-4: Boxplot de series de tiempo mensual de la ETp media areal estimada en el Sensor MODIS (Terra | Aqua)



5.1 Serie de tiempo mensual

La Figura 5-5 y la Figura 5-7 muestran series de tiempo mensuales de **ET** y **ETp** generadas a partir de la información recopilada del sensor MODIS | Terra (MOD16A2- v006) y MODIS | Aqua (MYD16A2 - v006).

A nivel mensual, es también evidente el comportamiento monomodal de estas variables en la zona de estudio (Figura 5-5), sin embargo, respecto a los valores reportados por los dos sensores, es notable como el sensor Aqua muestra una menor dispersión entre los valores mensuales. Ahora bien, es de destacar que los valores máximos se encuentran en

los meses de enero del 2003 y 2010, siendo estos meses influenciados por un evento de el Niño moderado y fuerte respectivamente (Figura 5-6).

Figura 5-5: Series de tiempo mensual de la ET y ETP media estimada en el Sensor MODIS (Terra | Aqua)

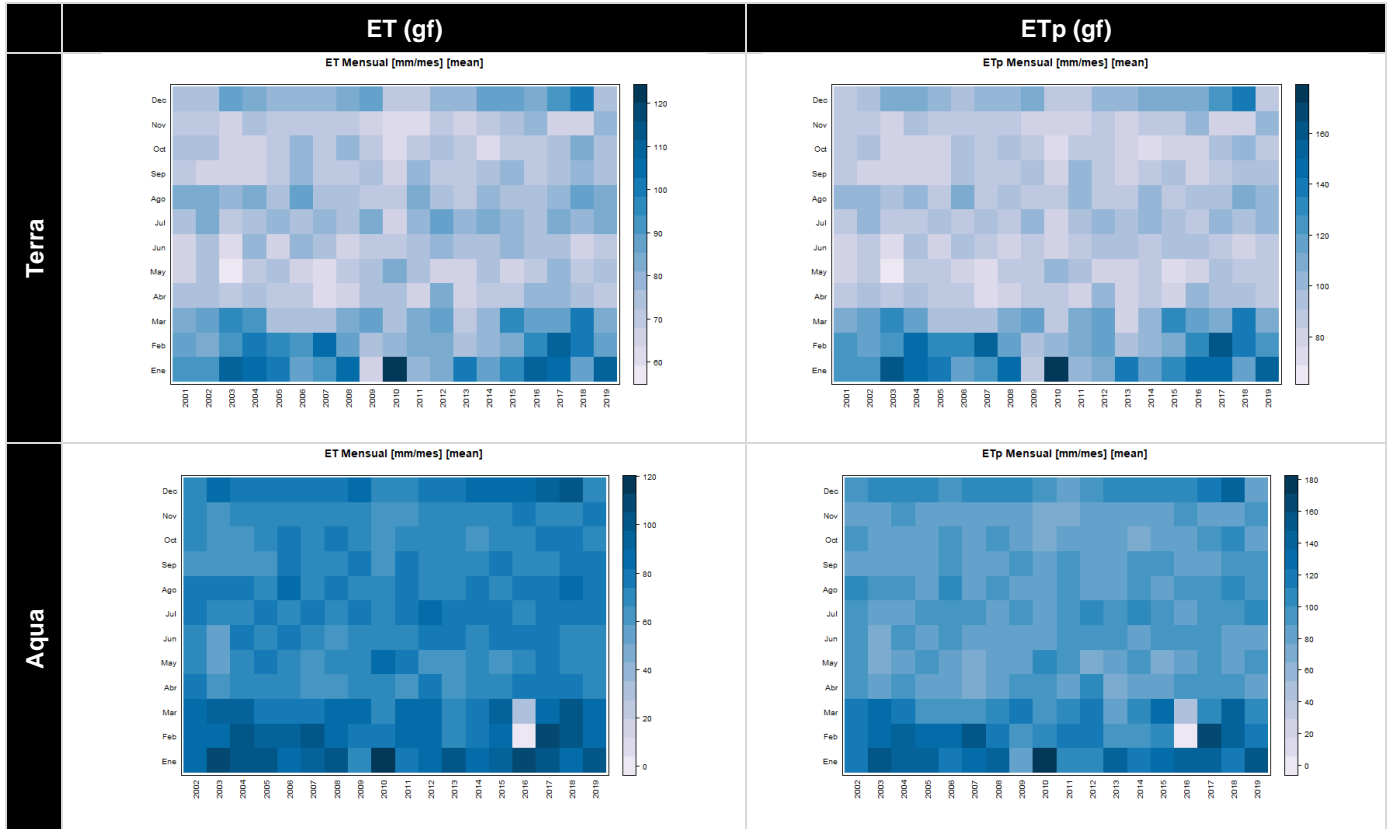
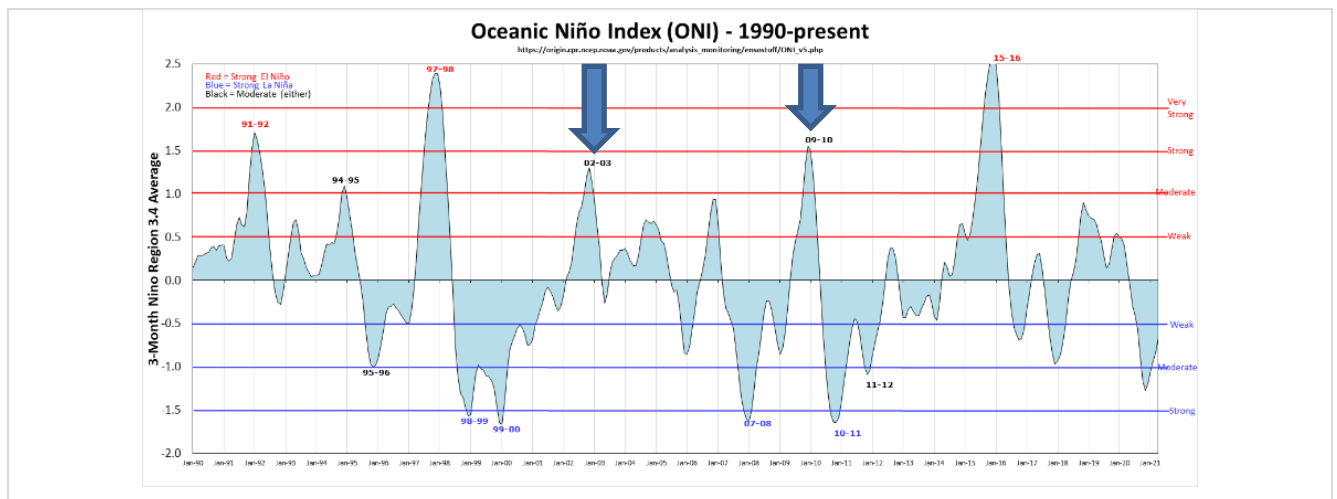


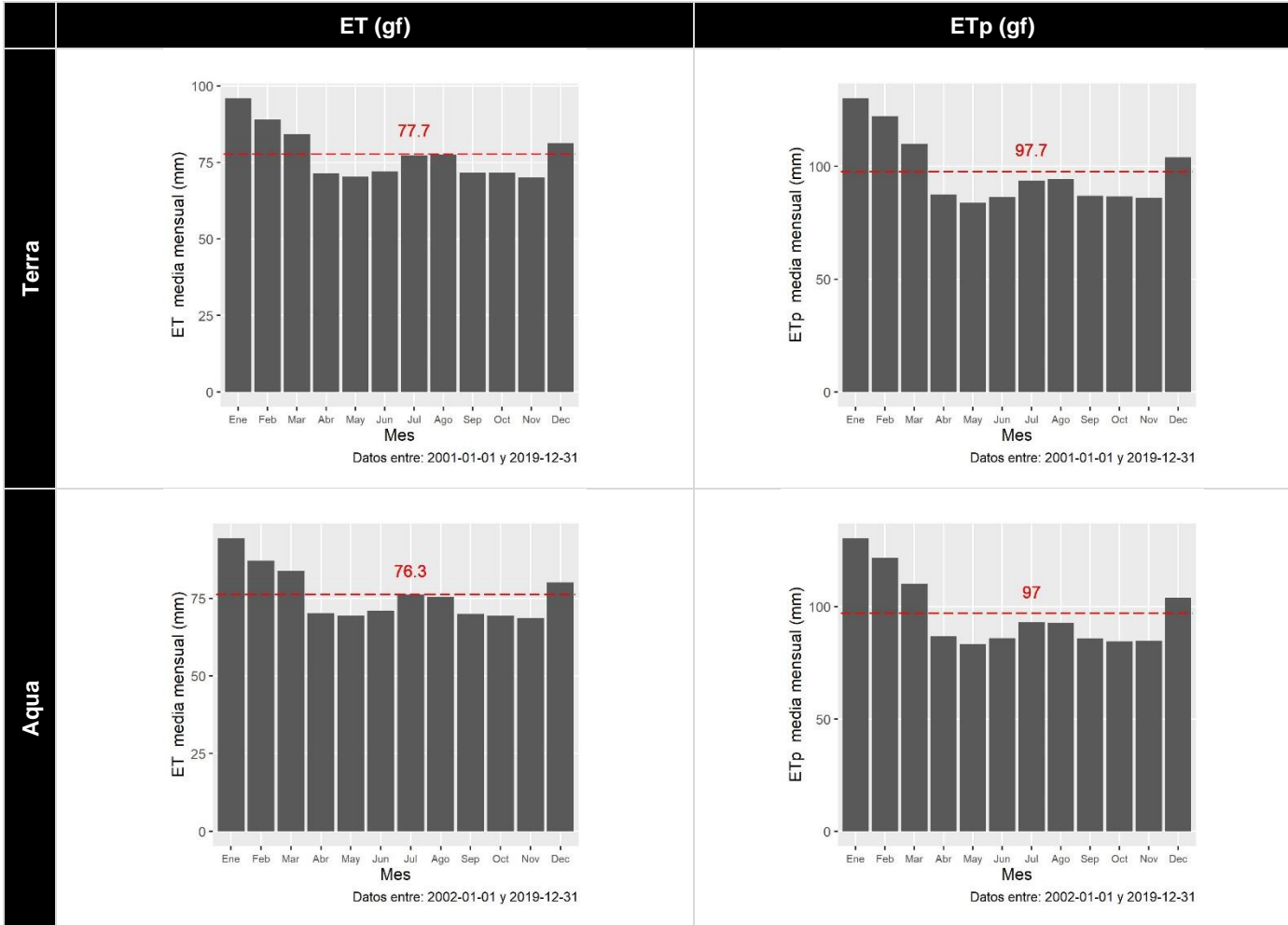
Figura 5-6: Índice ONI



Fuente: <https://ggweather.com/enso/oni.htm>

En términos de promedio mensual multianual en el área de estudio, la ET y ETp presentan valores característicos de 77 y 97 mm respectivamente (Figura 5-7).

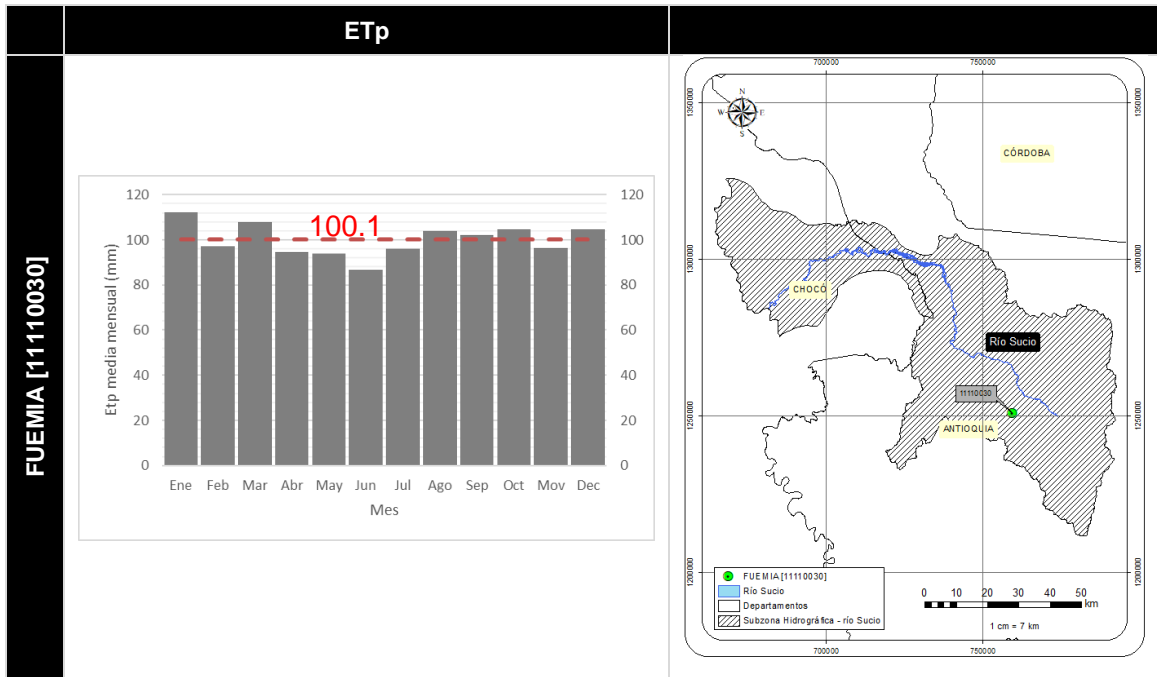
Figura 5-7: Series de tiempo promedio mensual multianual de la ET y ETp media estimada en el Sensor MODIS (Terra | Aqua)



En general el comportamiento de los datos expresados en la estación del IDEAM - FUEMIA [11110030] (Figura 5-8) son similares a los reportados en los resultados anteriores (Figura 5-7). Nótese que el punto en donde la evapotranspiración presenta valores más altos corresponde al mes de enero y desde el mes de abril hasta julio los datos se mantienen en una tendencia parecida, en diciembre vuelven a subir; si bien es cierto, las gráficas no se parece en su totalidad, hay que tener en cuenta que el rango de datos para el caso de la estación del IDEAM son de aproximadamente 30 años mientras que el ejercicio se

realizó con 19 años en donde algunos meses presentaban ausencia de información. También es importante tener en cuenta que la evapotranspiración para el caso de IDEAM corresponde a un valor puntual mientras que el valor calculado con el sensor MODIS corresponde a un valor regional

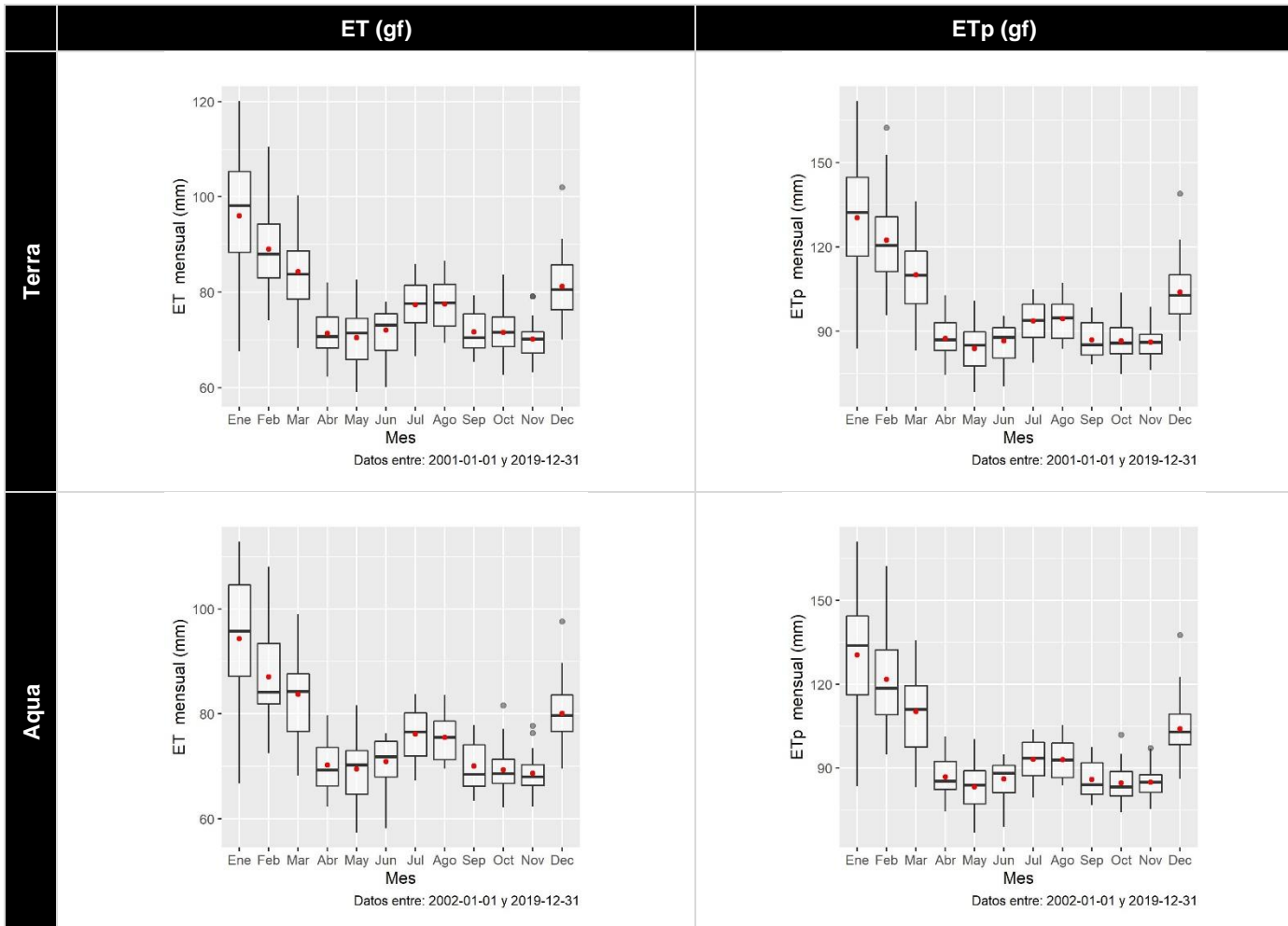
Figura 5-8: Media climatológica de ETp para la estación del IDEAM - FUEMIA [11110030]



En comparación a estudios internacionales, por ejemplo, para Castañeda-Ibáñez et al., (2018) los valores de evapotranspiración más altos se dieron en los meses de mayo y junio, mientras que para el presente proyecto (Figura 4-7) los valores más altos están en los meses de enero y febrero, la razón es porque en el primer caso la zona de estudio corresponde a la costa de Hermosillo en el noreste de México, época que corresponde al final de la primavera e inicio del verano en donde las temperaturas son más elevadas, mientras que en el caso de Colombia enero y febrero son épocas más soleadas del año.

Referente a los valores mensuales calculados, se evidencian que para el mes de enero (mes “pico”) la ET presenta valores en el rango de 70 a 120 mm con un promedio de aproximadamente 95 mm (Figura 5-9). Se evidencia que los meses de menor valor promedio son los meses de mayo y noviembre, sin embargo, en todas las ocasiones este último mes presenta la menor dispersión en sus valores.

Figura 5-9: Boxplot de series de tiempo mensual de la ETp media areal estimada en el Sensor MODIS (Terra | Aqua)



Ahora bien, analizados los comportamientos de los valores máximos mensuales anuales de la ET y ETp, se encontró que las funciones de distribución Pareto Generalizado y Valor extremo generalizado representan adecuadamente su comportamiento estadístico para el sensor Terra, mientras que las distribuciones Johnson SB y Error lo hacen para el sensor Aqua. Nótese que para la prueba kolmogorov-smirnov, la hipótesis nula no es rechazada para diferentes grados de significancia (Tabla 5-1).

Estos resultados difieren de aquellos encontrados por Galvez Valencia, (2015), donde se encontró que para la ET el mejor modelo que se ajusta a los datos es la distribución “Normal” seguido por la distribución Gamma.

Tabla 5-1. Funciones de densidad de probabilidad ajustadas a los valores de ET y ETp promedio

	ET (gf)						ETp (gf)					
Terra	Gen. Pareto [#25]						Gen. Extreme Value [#21]					
	Kolmogorov-Smirnov						Kolmogorov-Smirnov					
	Tamaño de la muestra	18					Tamaño de la muestra	18				
	Estadística	0.11768					Estadística	0.08976				
	Valor P	0.93967					Valor P	0.99583				
	Rango	1					Rango	1				
α	0.2	0.1	0.05	0.02	0.01	α	0.2	0.1	0.05	0.02	0.01	
Valor crítico	0.2436	0.27851	0.30936	0.34569	0.37062	Valor crítico	0.2436	0.27851	0.30936	0.34569	0.37062	
Rechazar?	No	No	No	No	No	Rechazar?	No	No	No	No	No	
Gen. Pareto						Gen. Extreme Value						
k=-0.89023 σ =31.978 μ =82.165						k=-0.16345 σ =16.826 μ =129.75						
Aqua	Johnson SB [#31]						Error [#11]					
	Kolmogorov-Smirnov						Kolmogorov-Smirnov					
	Tamaño de la muestra	18					Tamaño de la muestra	18				
	Estadística	0.11046					Estadística	0.09579				
	Valor P	0.96315					Valor P	0.99084				
	Rango	1					Rango	1				
α	0.2	0.1	0.05	0.02	0.01	α	0.2	0.1	0.05	0.02	0.01	
Valor crítico	0.2436	0.27851	0.30936	0.34569	0.37062	Valor crítico	0.2436	0.27851	0.30936	0.34569	0.37062	
Rechazar?	No	No	No	No	No	Rechazar?	No	No	No	No	No	
Johnson SB						Error						
γ =-0.14623 δ =0.69653 λ =33.083 ξ =79.94						k=4.4558 σ =17.525 μ =138.42						

6. Conclusiones y recomendaciones

6.1 Conclusiones

- Los sensores remotos permiten realizar un cálculo de evapotranspiración a nivel regional de esta forma sirven de apoyo para determinar cantidades de agua necesarios en el riego de cultivos y contribuyen en la elaboración de modelos que permitan controlar fenómenos naturales como las inundaciones.
- Claramente, la implementación de los productos del sensor MODIS (Terra | Aqua) brindan la posibilidad de adquirir información en lugares en donde no existe cobertura suficiente de estaciones climatológicas
- De acuerdo con los resultados obtenidos se puede inferir que los valores calculados de ET y ETp por el sensor MODIS se aproximan a los órdenes de magnitud reportados en algunas de las estaciones del IDEAM.
- La evaporación (ET) mensual promedio entre los años 2001 y 2019 es de 77 mm mientras que la evapotranspiración potencial (ETp) es de 97 mm.
- Los meses con mayor producción de ET y ETp son los meses de diciembre, enero y febrero en la zona de estudio, la cual se caracteriza por tener un régimen monomodal.

6.2 Recomendaciones

- Se recomienda realizar comparaciones con más de un dato obtenido in situ con el fin de mejorar la precisión de los resultados.

- Al trabajar con sensores remotos se recomienda buscar imágenes que tengan cobertura total de la zona de interés, en el caso de la evapotranspiración la omisión de información generaría ruido en los resultados obtenidos.
- Es importante ahondar en la definición de una metodología que soporte el esquema de desagregación de la información MODIS a nivel diario.

7. Bibliografía

- Allen, R. G., Tasumi, M., Morse, A., Trezza, R., Bastiaanssen, W., Kramber, W., Lorite, I., Robison, C. W., & Trezza, R. (2007). Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC)—Applications. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 133(4), 395-406. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1082-0159\(2007\)133:4\(395\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1082-0159(2007)133:4(395))
- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (1998). FAO Irrigation and drainage paper No. 56. *Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations*, 56, 26-40.
- Bastiaanssen, W. G. M., Menenti, M., Feddes, R. A., & Holtslag, A. A. M. (1998). A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL).: Part 1: Formulation. *Journal of Hydrology*, 212-213, 198-212. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(98\)00253-4](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00253-4)
- Bastiaanssen, W. G. M., Pelgrum, H., Wang, J., Ma, Y., Moreno, J. F., Roerink, G. J., & van der Wal, T. (1998). A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL).: Part 2: Validation. *Journal of Hydrology*, 212-213, 213-229. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(98\)00254-6](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00254-6)
- Busetto, L., & Ranghetti, L. (2016). MODISrsp: An R package for preprocessing of MODIS Land Products time series. *Computers & Geosciences*, 97, 40-48. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2016.08.020>
- Campos Aranda, D. F. (1988). *Proceso del ciclo hidrológico*. Univeritaria Potosina.

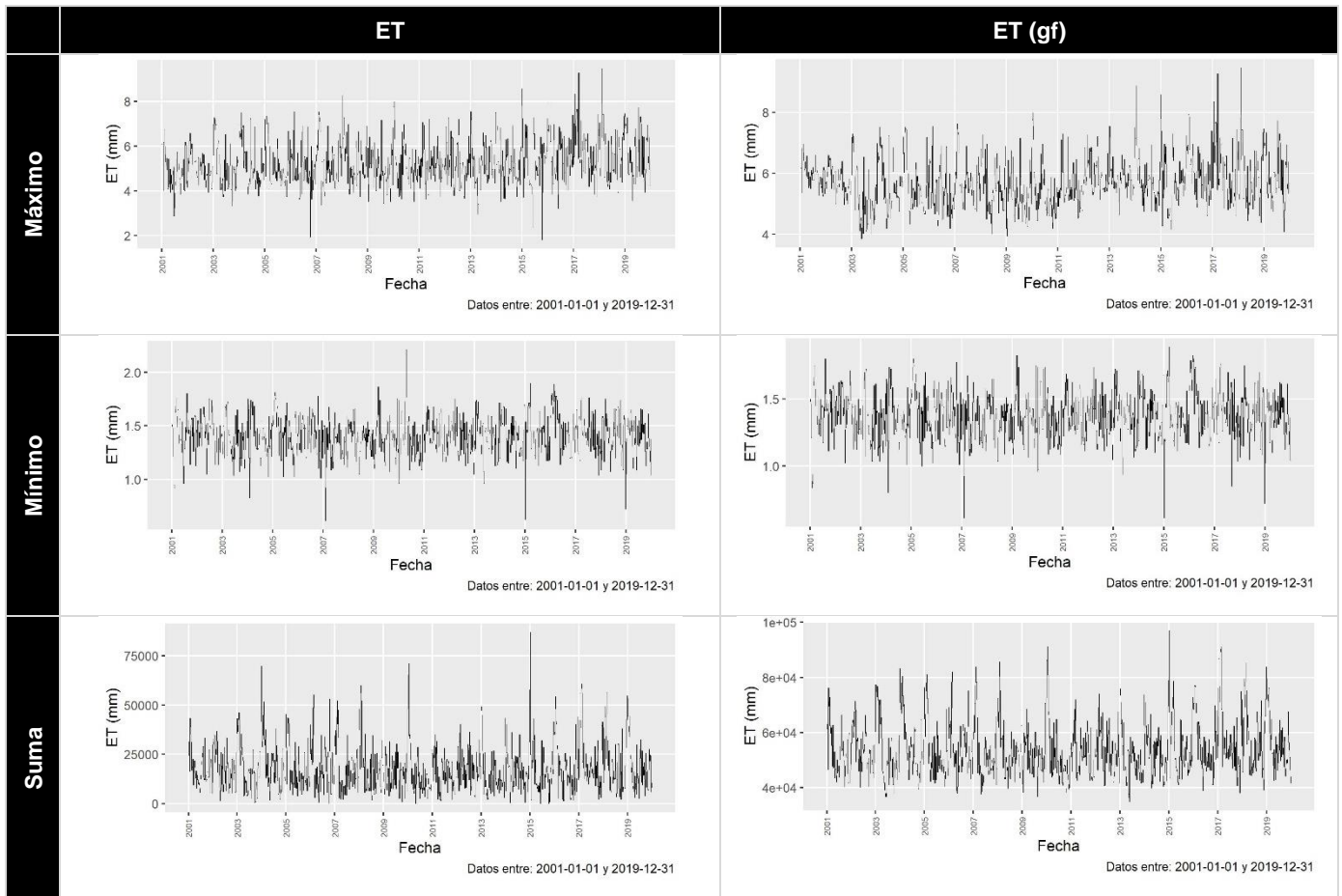
- Castañeda-Ibáñez, C. R., Flores-Magdaleno, H., Martínez-Menes, M., Esparza-Govea, S., Fernández-Reynoso, D., Prado-Hernández, V., & Pascual-Ramírez, F. (2018). Estimación de la evapotranspiración mediante un balance de energía utilizando sensores remotos. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, 5, 537-545.
- Cerca de 50 familias se vieron afectadas por inundación en Dabeiba, Antioquia. (2021, marzo 22). *EL ESPECTADOR*.
- de Santa Olalla Mallas, F., & Lopez, P. (2005). *AGUA Y AGRONOMÍA* (Mundi Prensa).
- Flores, F. A., & Pérez, R. E. (2007). *Comparación de Tres Modelos de Estimación de Evapotranspiración Mediante Imágenes MODIS*.
- Galvez Valencia, A. M. (2015). *Determinación de la relación precipitación/evapotranspiración como índice de vulnerabilidad de los suelos del distrito de riego RUT a los procesos de salinización* [Universidad del Valle].
<https://bibliotecadigital.univalle.edu.co/handle/10893/15918>
- González, C., Quintero Castellanos, M., Flórez Roncancio, V., & Quintero, Q. (2020). Lisímetros volumétricos. En *Manejo sostenible del agua mediante la aplicación eficiente del riego*. <https://www.researchgate.net/publication/341273194>
- Guzmán-Alvarez, J. (2007). *Uso del Sensores Remotos en el estimación de evapotranspiración*.
- Hobbins, M., & Huntington, J. (2016). *Evapotranspiration and evaporative demand* (p. 42.1-42.18).
- IDEAM. (2017). *Validación de las fórmulas de Evapotranspiración de Referencia (ETo) para Colombia* (IDEAM-METEO) [NOTA TÉCNICA DEL IDEAM].
<http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21147/Evapotranspiracion+de+Referencia+ETo+para+Colombia.pdf>

- Marini, F., & Santamaría, F. (2017). *Estimación de evapotranspiración real (ETR) y de evapotranspiración potencial (ETP) en el sudoeste bonaerense (Argentina) a partir de imágenes MODIS*.
- Mulleady, C., & Barrera, D. (2012). *Estimación de la tasa de evapotranspiración a partir de datos satelitales*.
- R Core Team. (2021). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing. <http://www.R-project.org/>
- Rana, G., & Katerji, N. (2000). Measurement and estimation of actual evapotranspiration in the field under Mediterranean climate: A review. *European Journal of Agronomy*, 13(2), 125-153. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(00\)00070-8](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(00)00070-8)
- Reyes González, A., Reta SÁñchez, D. G., SÁñchez Duarte, J. I., Ochoa MartÁñez, E., RodrÁñguez HernÁñdez, K., & Preciado Rangel, P. (2019). Estimación de la evapotranspiración de maíz forrajero apoyada con sensores remotos y mediciones in situ. *Terra Latinoamericana*, 37, 279-290.
- Sánchez, F. J. (2017). *Hidrología Superficial y Subterránea*. Createspace Independent Pub.
- Su, Z. (2002). The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes. *Hydrology and Earth System Sciences*, 6(1), 85-100. <https://doi.org/10.5194/hess-6-85-2002>
- Vives, L. (2004). Estimación de la evapotranspiración regional mediante Sensores Remotos. *Congreso Geología Uruguay*. http://www.azul.bdh.org.ar/bdh3/archivos/publications/575446/Estimacion_de_la_Evapotranspiracion_Regional_mediante_Sensores_Remotos.pdf

8. Anexos

8.1 Series de Tiempo Diarias

Figura 8-1: Series de tiempo diaria de diferentes estadísticos descriptivos para la ET estimada en el Sensor MODIS | Terra.



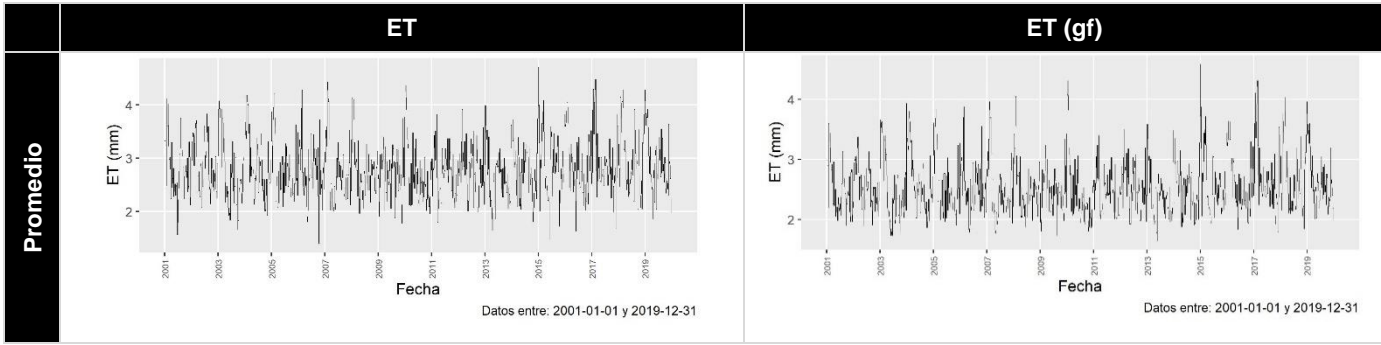


Figura 8-2: Series de tiempo diaria de diferentes estadísticos descriptivos para la ET estimada en el Sensor MODIS | Aqua.

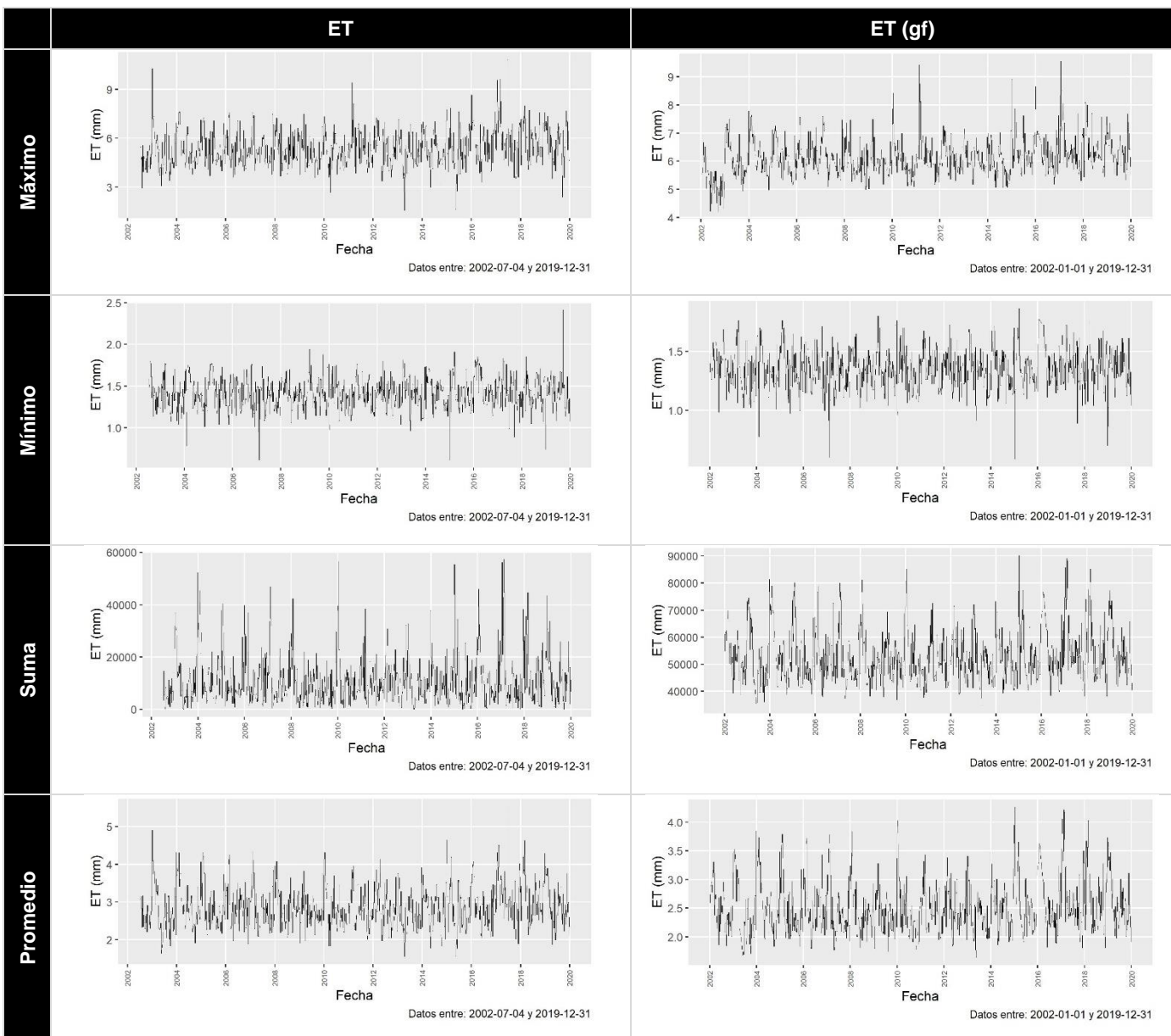


Figura 8-3: Series de tiempo diaria de diferentes estadísticos descriptivos para la ETp estimada en el Sensor MODIS | Terra.

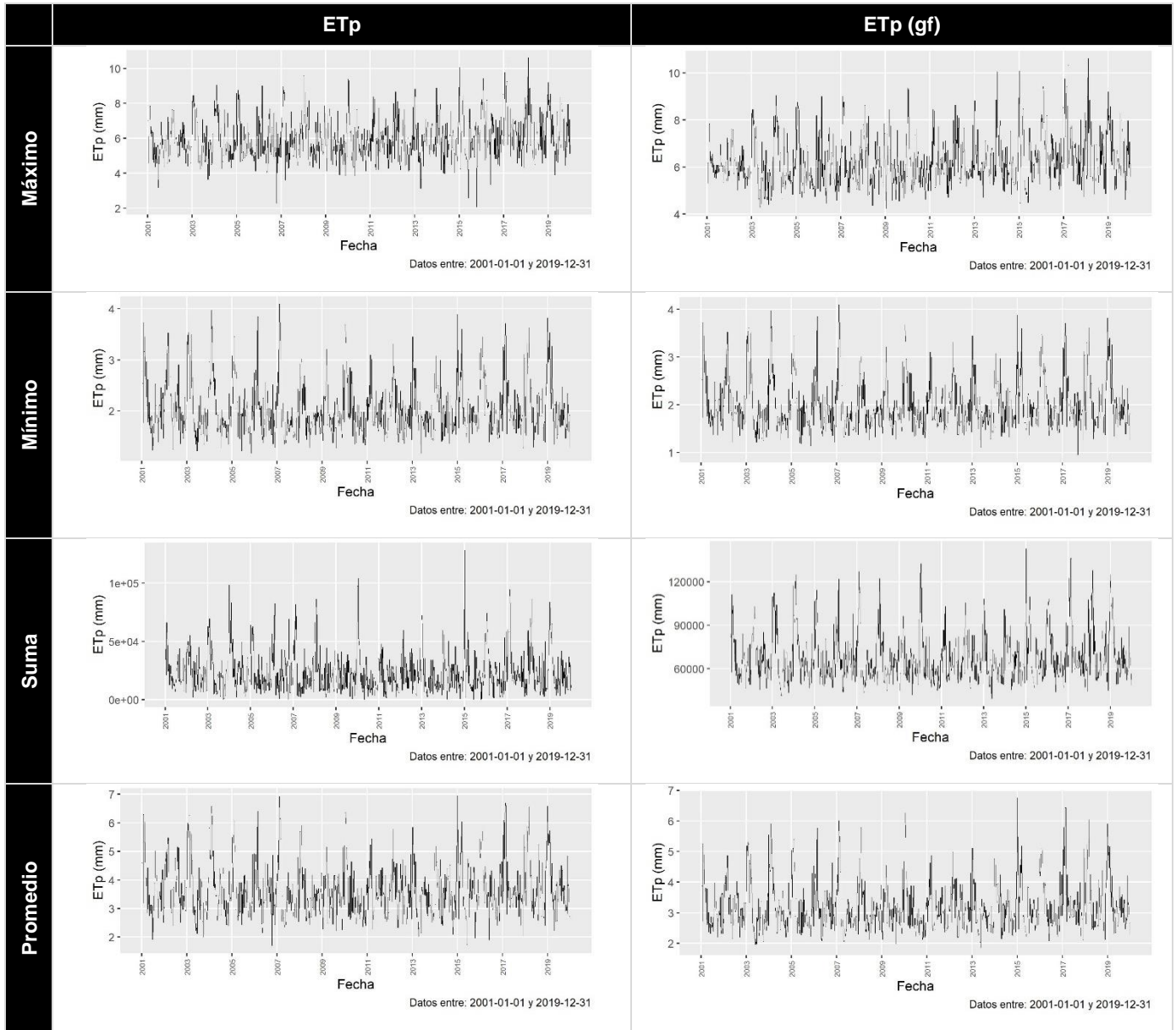
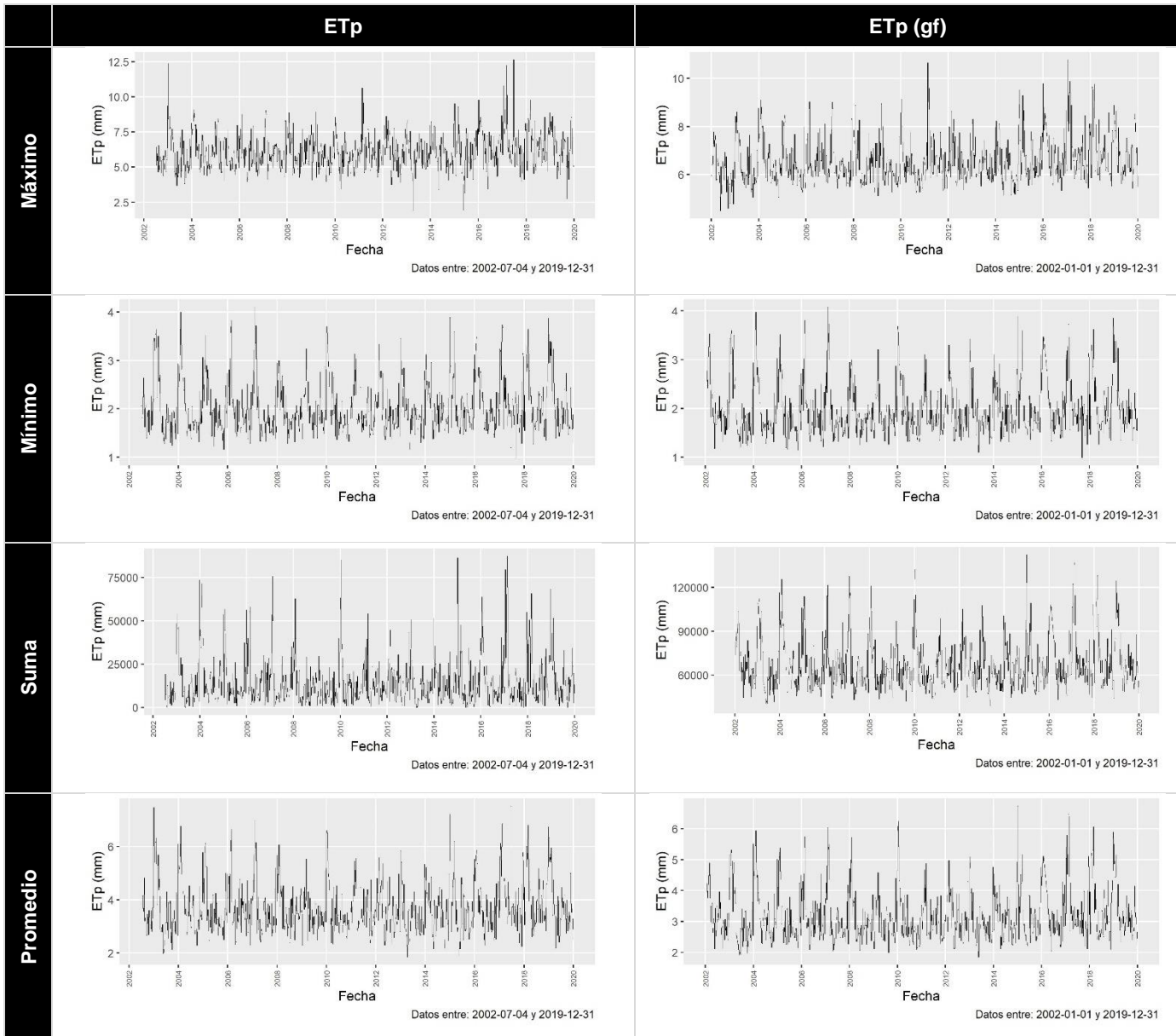
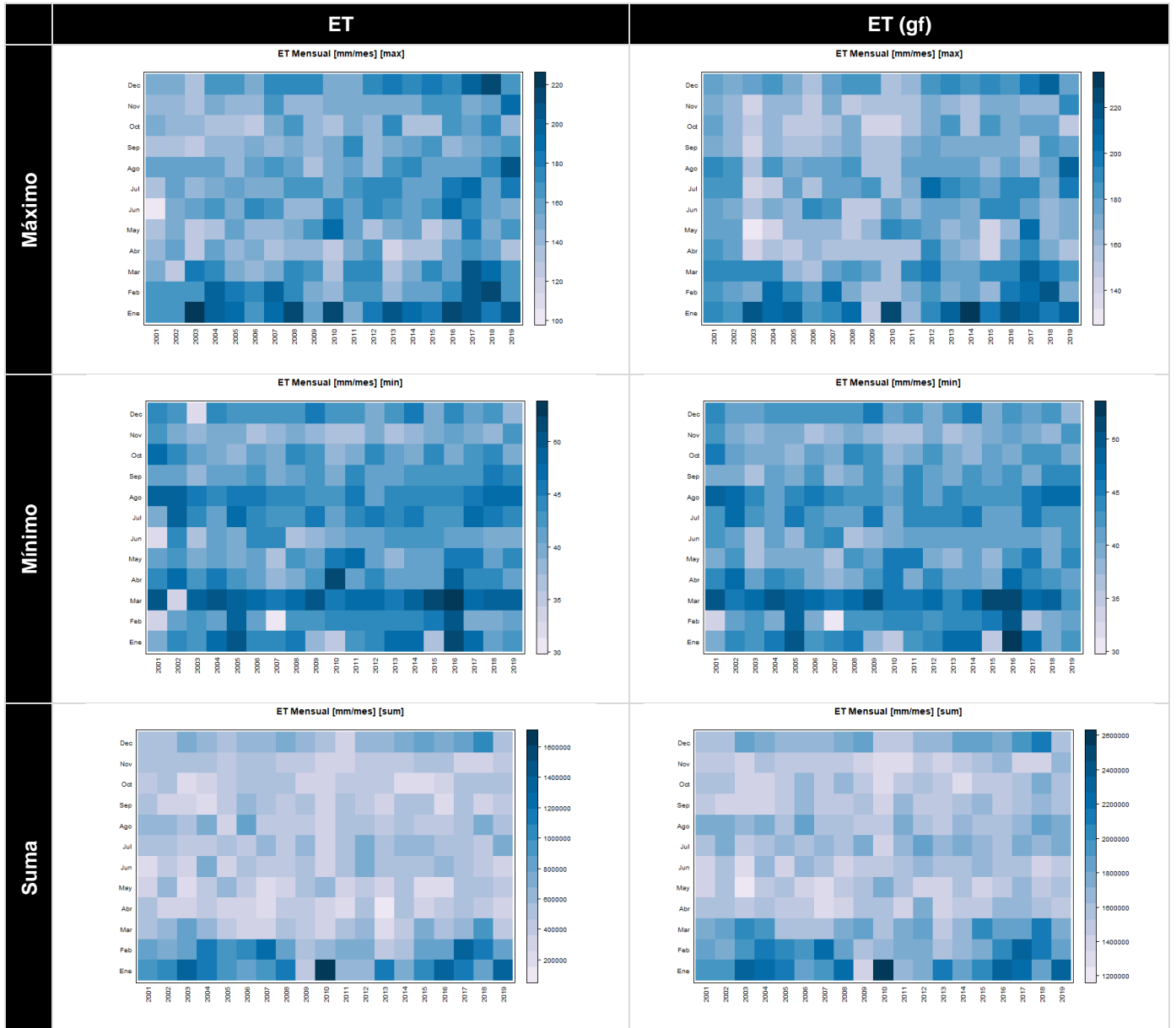


Figura 8-4: Series de tiempo diaria de diferentes estadísticos descriptivos para la ETp estimada en el Sensor MODIS | Aqua.



8.2 Series de Tiempo Mensuales

Figura 8-5: Series de tiempo mensual de diferentes estadísticos descriptivos para la ET estimada en el Sensor MODIS | Terra.



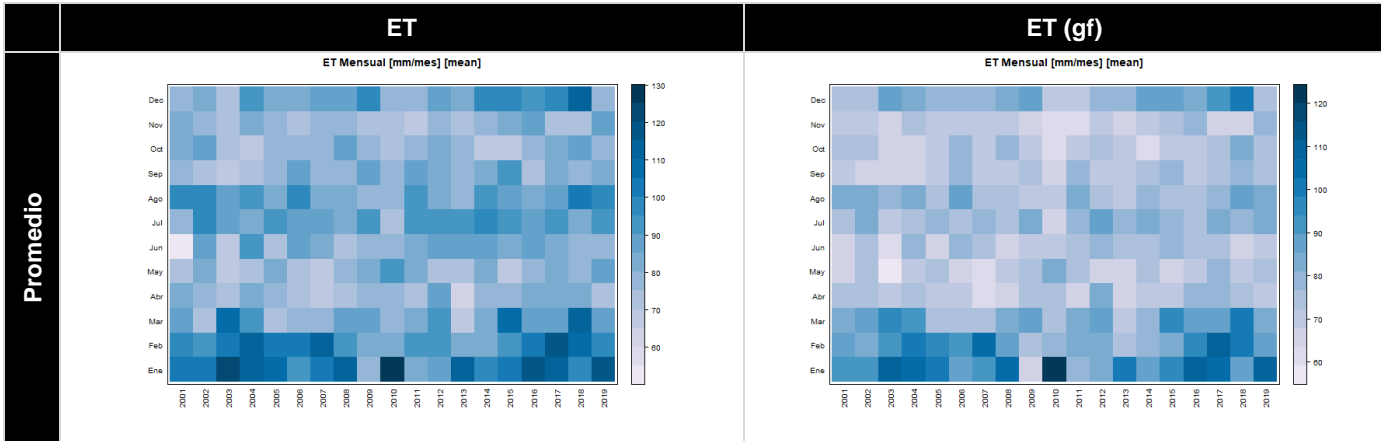
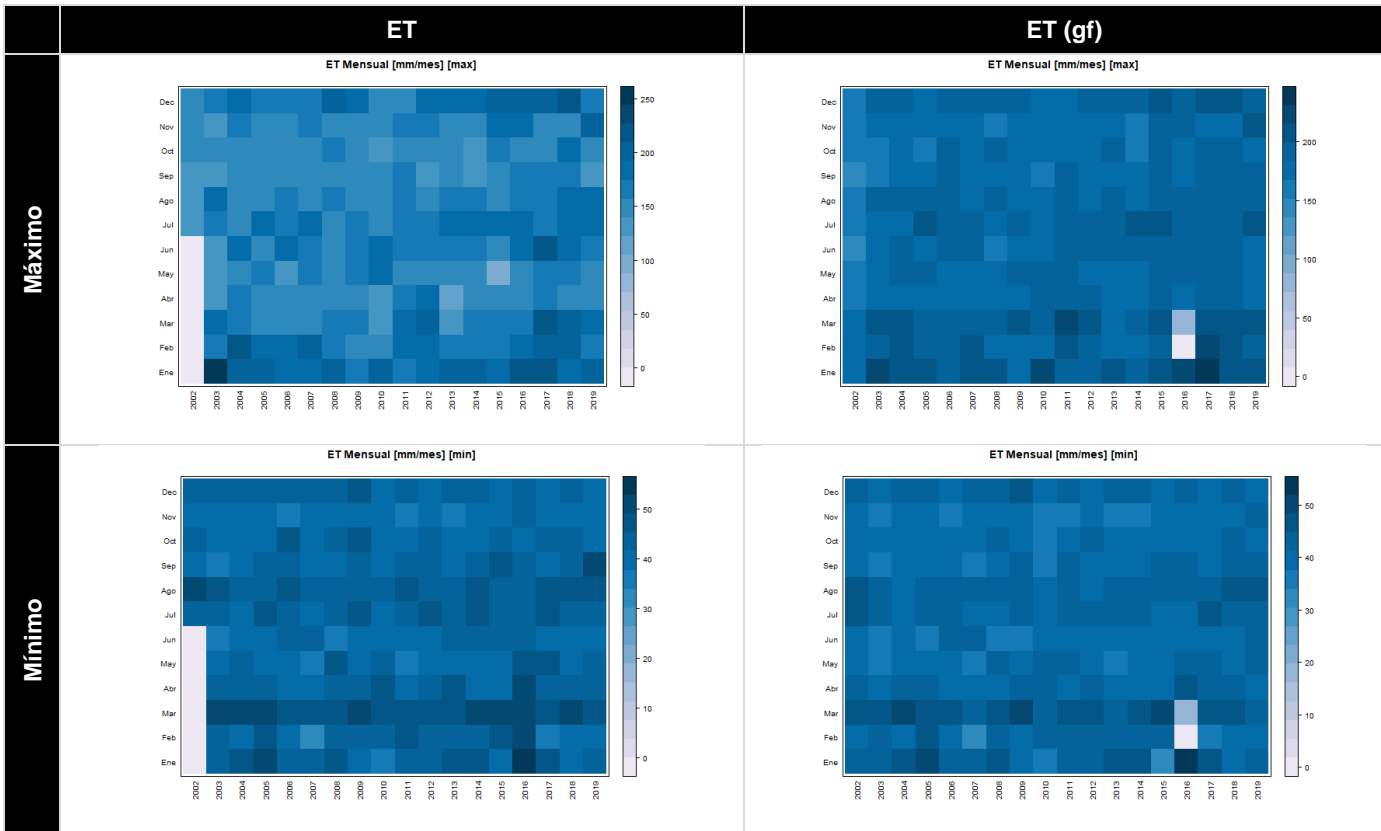


Figura 8-6: Series de tiempo mensual de diferentes estadísticos descriptivos para la ET estimada en el Sensor MODIS | Aqua.



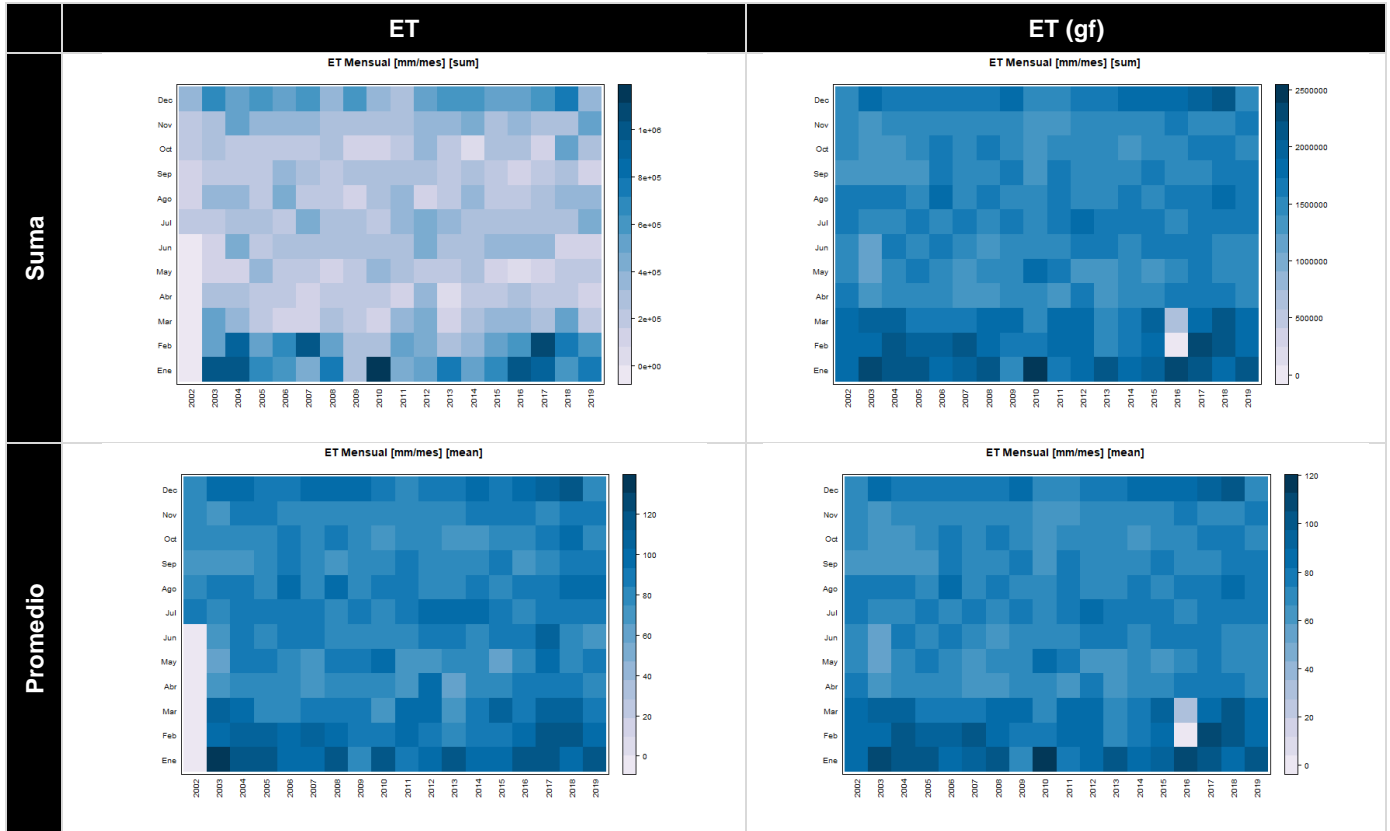
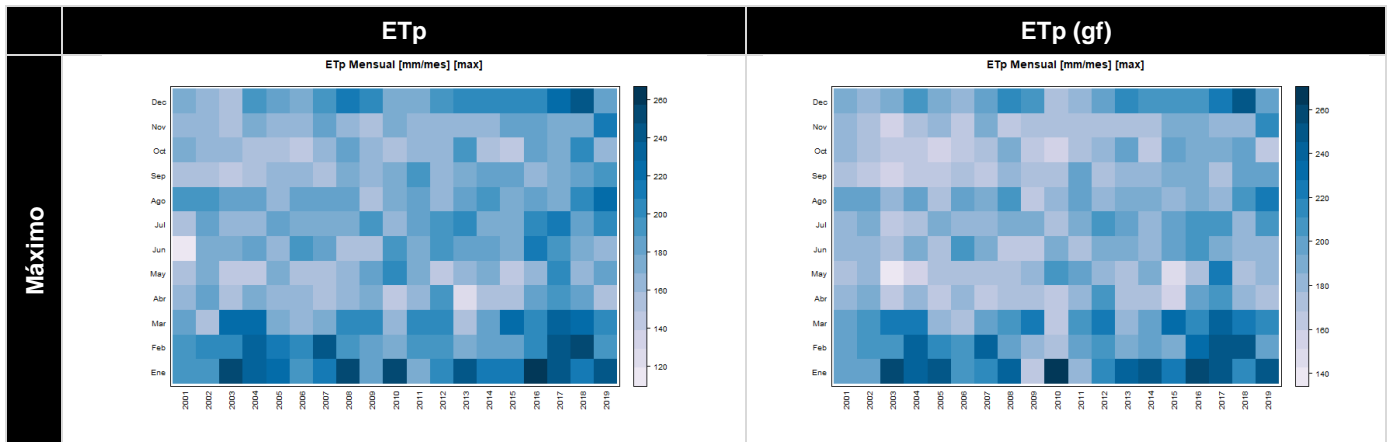


Figura 8-7: Series de tiempo mensual de diferentes estadísticos descriptivos para la ETp estimada en el Sensor MODIS | Terra.



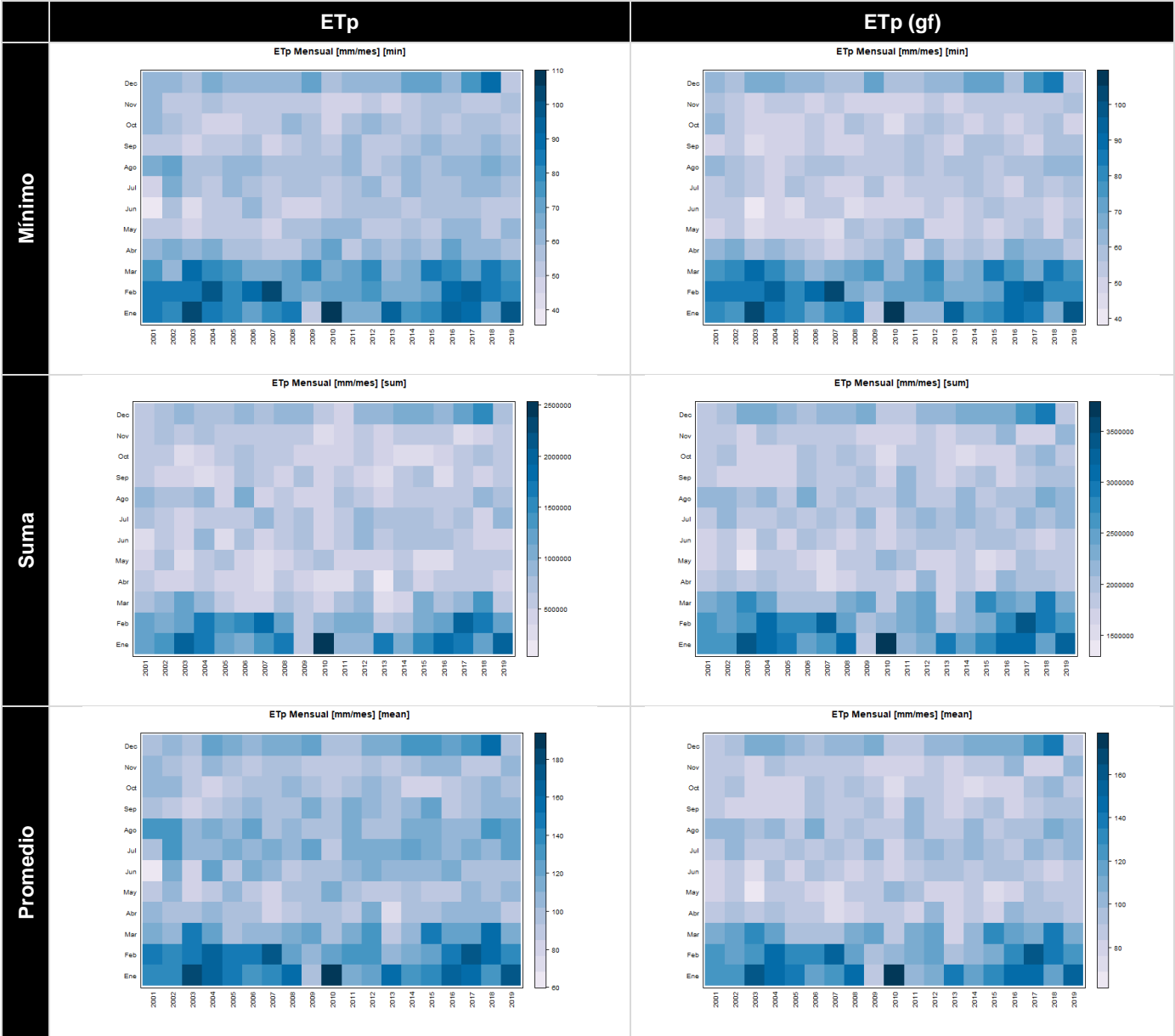
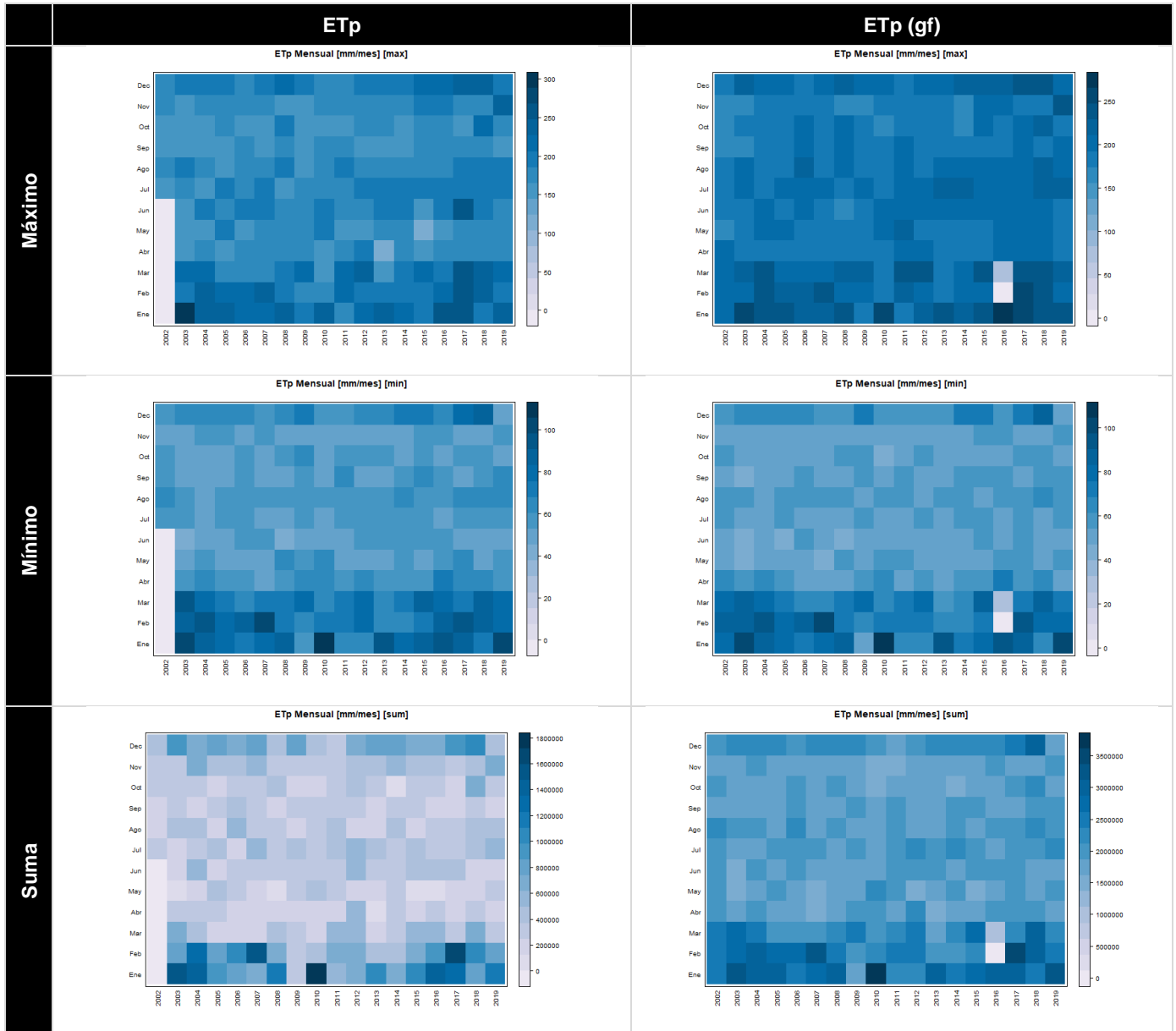
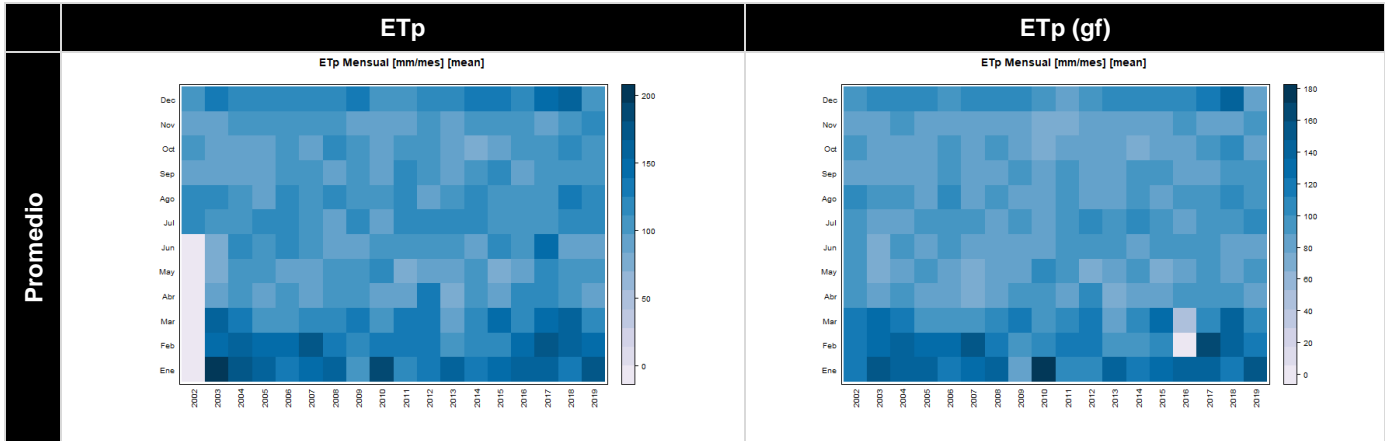


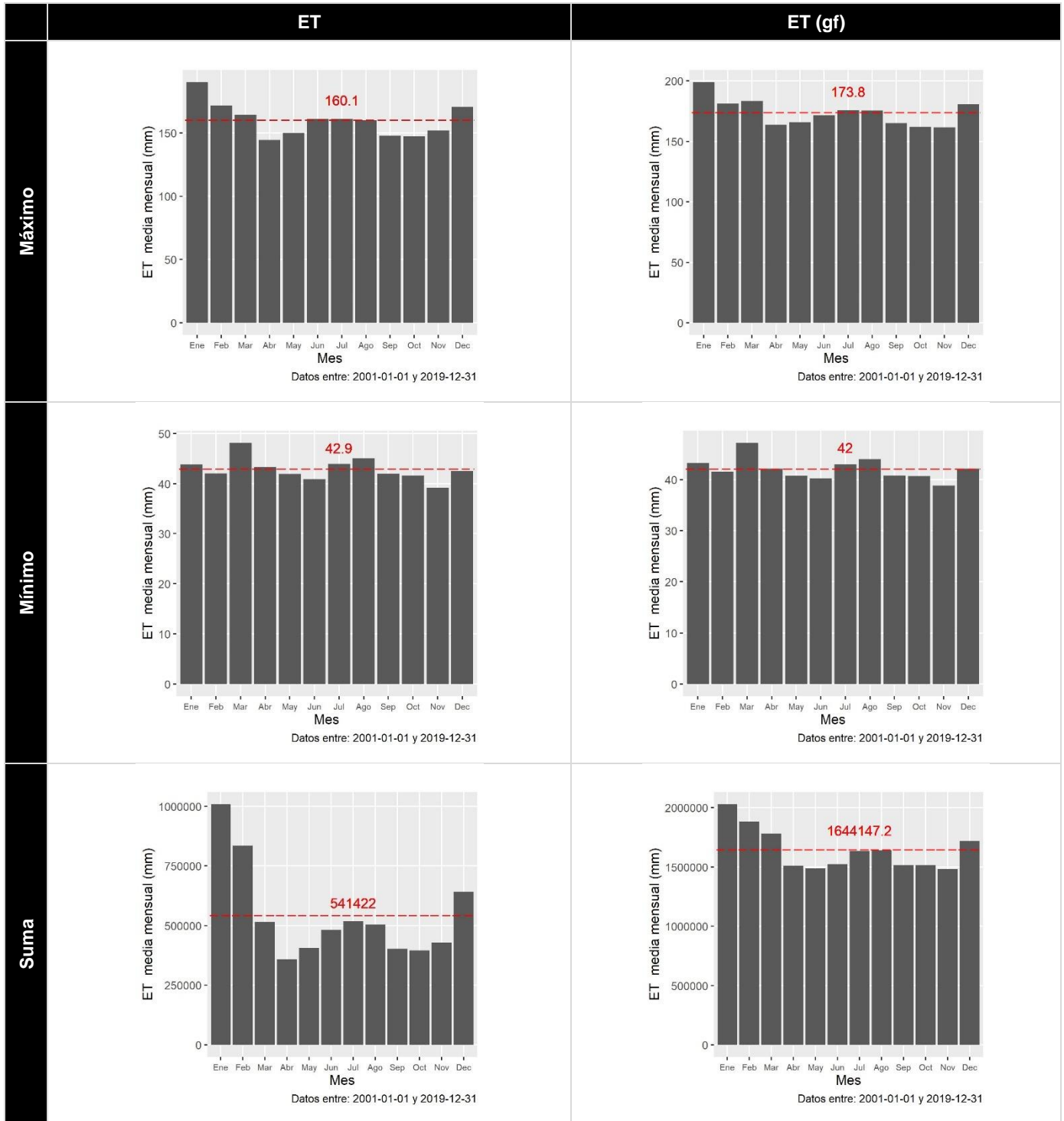
Figura 8-8: Series de tiempo mensual de diferentes estadísticos descriptivos para la ETP estimada en el Sensor MODIS | Aqua.





8.3 Series de Tiempo Mensuales Multianuales

Figura 8-9: Series de tiempo mensual multianual de diferentes estadísticos descriptivos para la ET estimada en el Sensor MODIS | Terra.



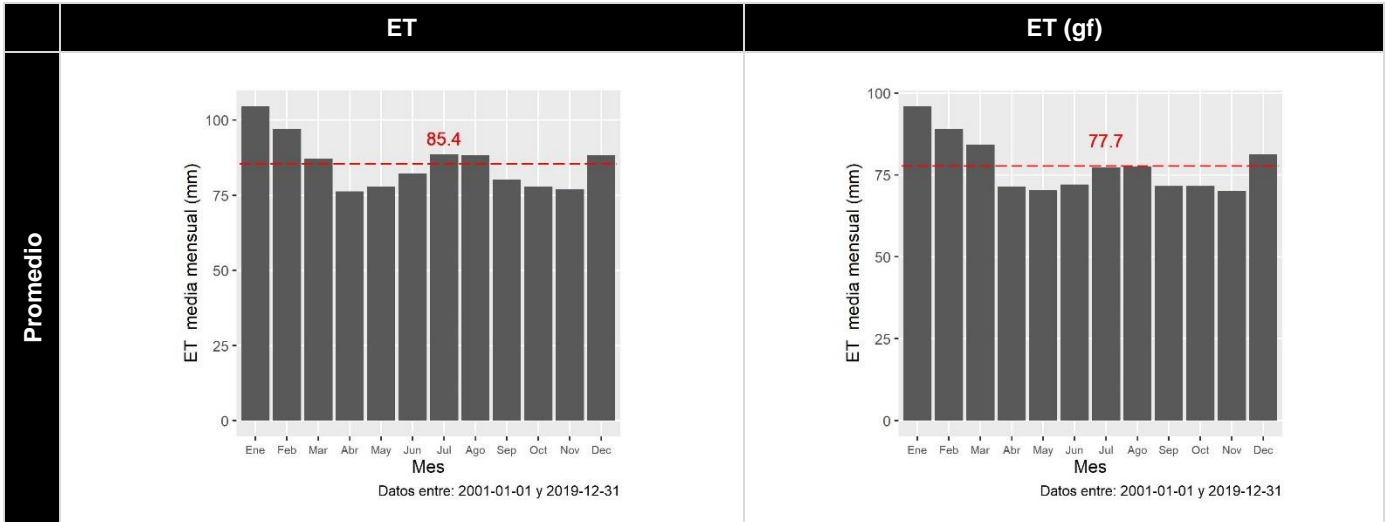
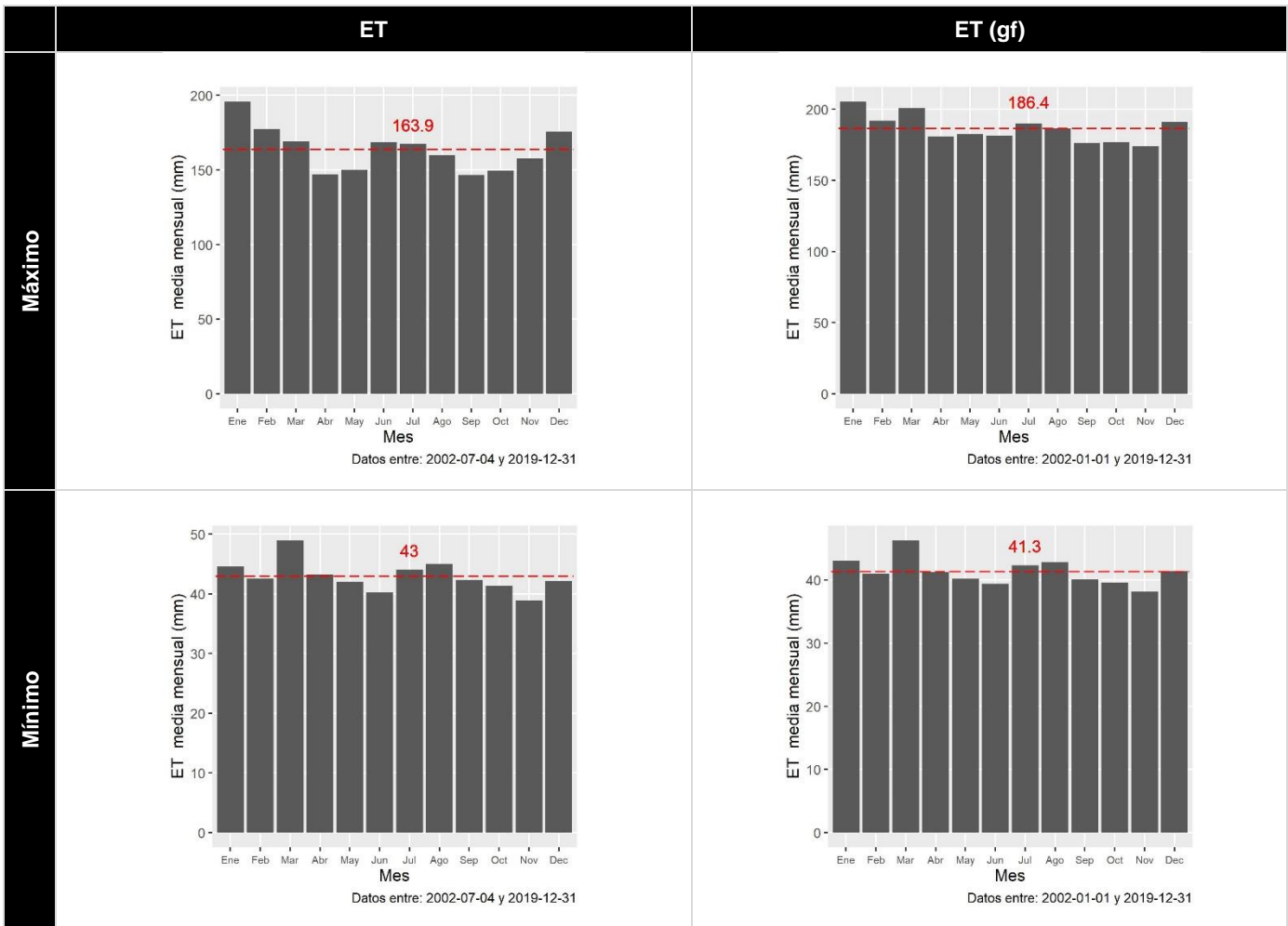


Figura 8-10: Series de tiempo mensual multianual de diferentes estadísticos descriptivos para la ET estimada en el Sensor MODIS | Aqua.



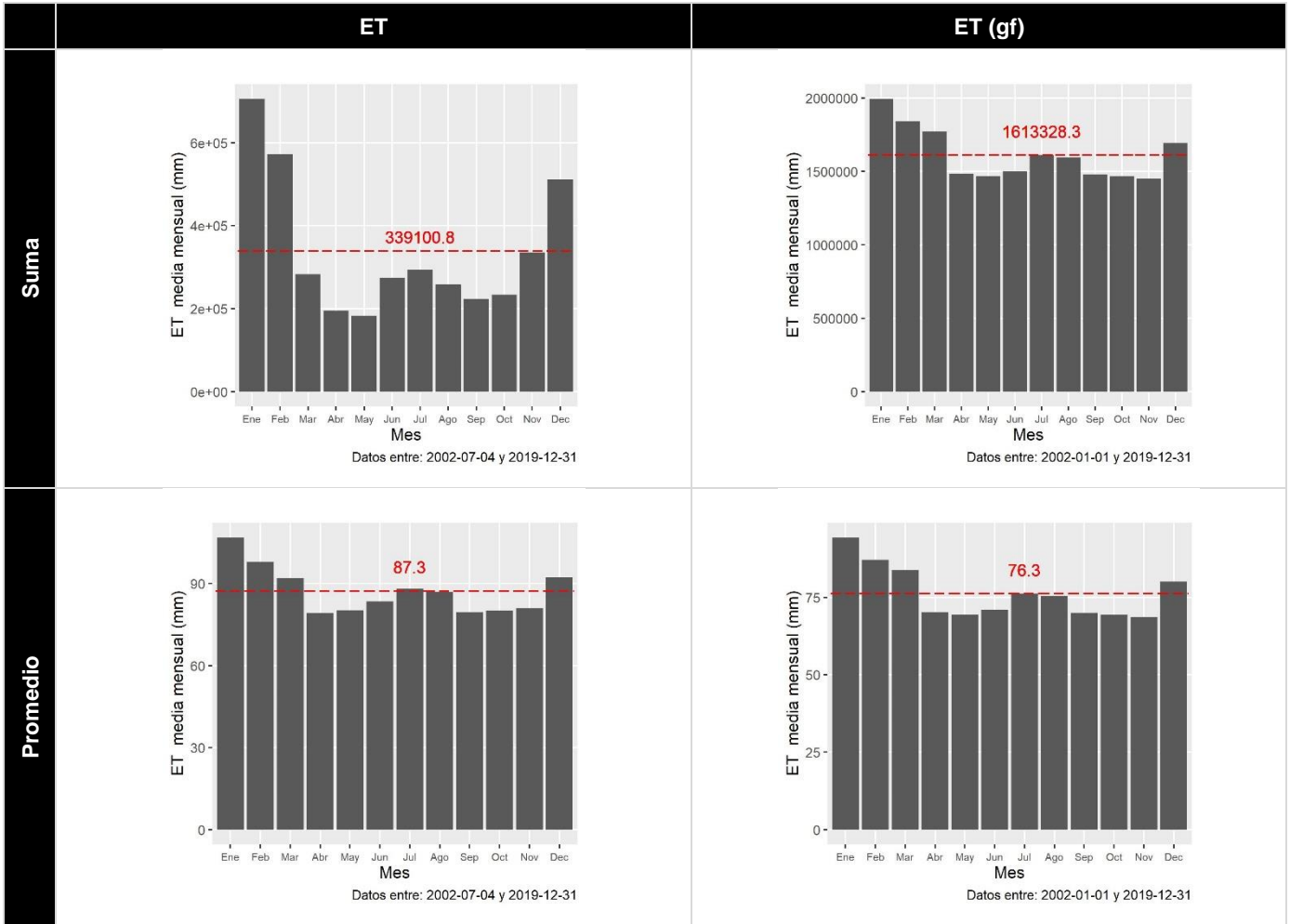
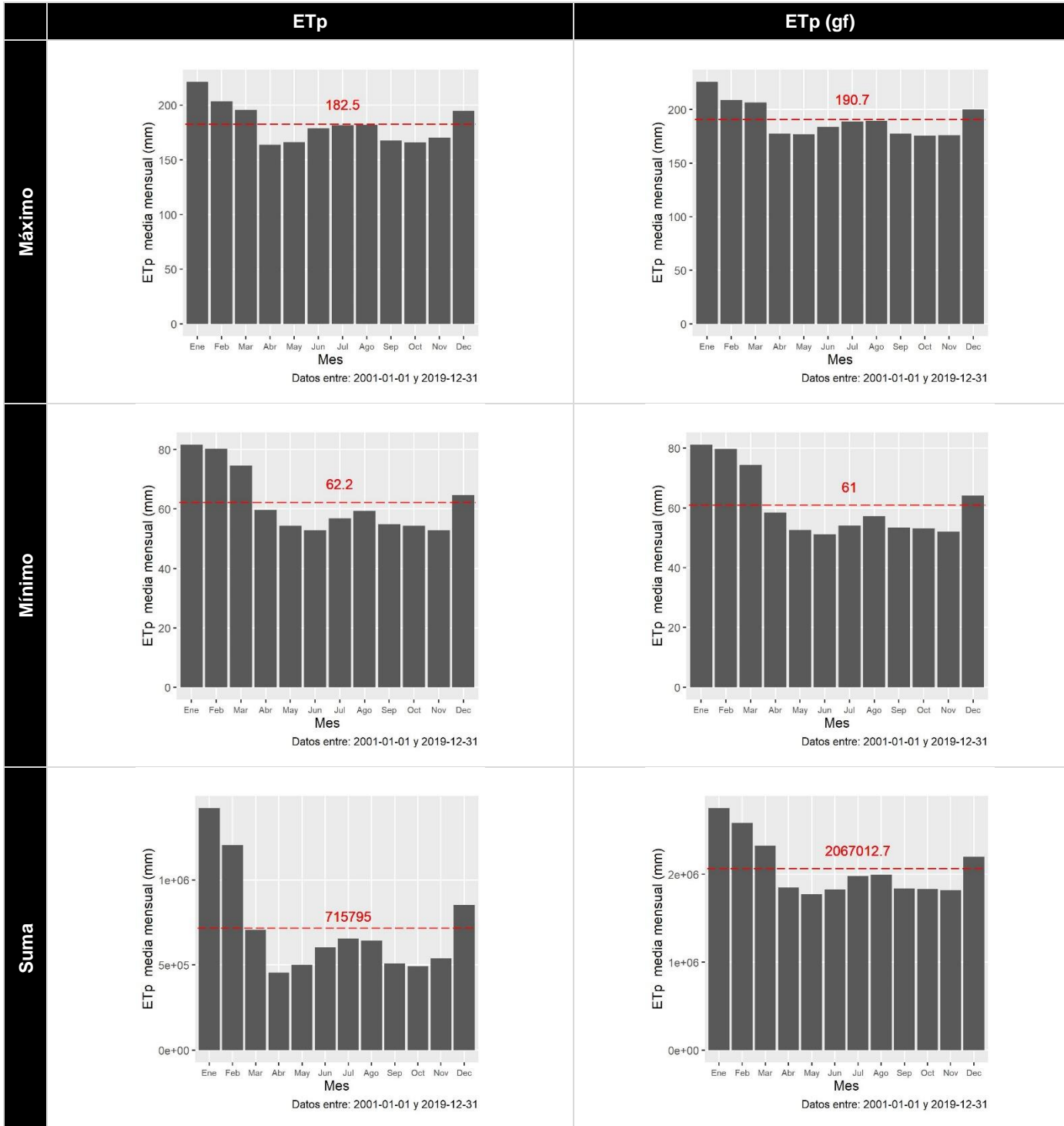


Figura 8-11: Series de tiempo mensual multianual de diferentes estadísticos descriptivos para la ETp estimada en el Sensor MODIS | Terra.



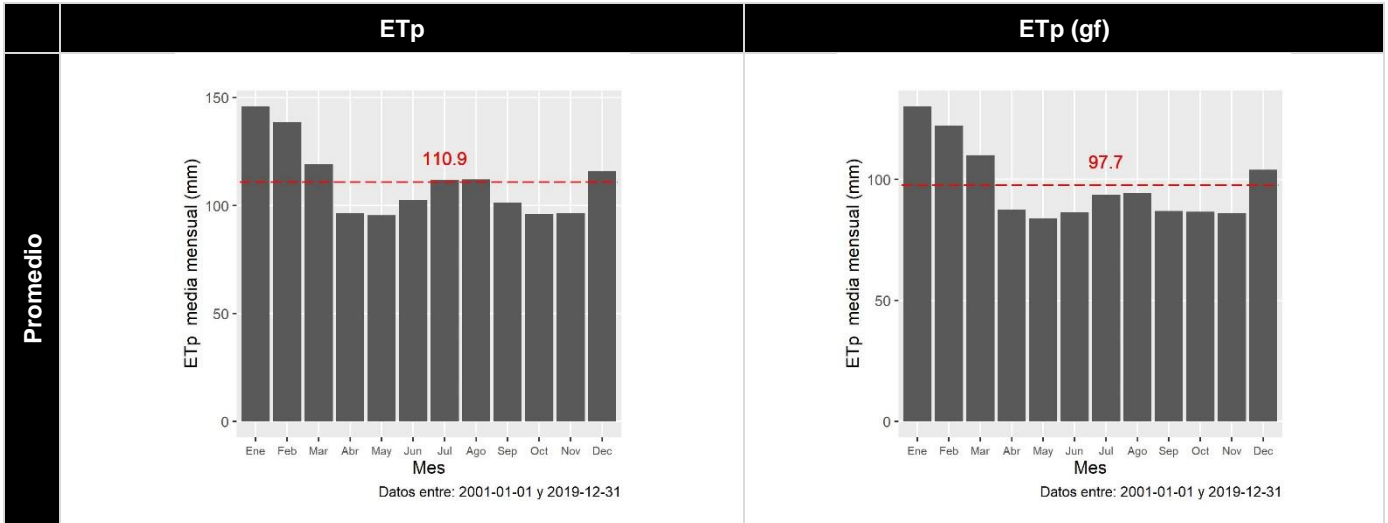
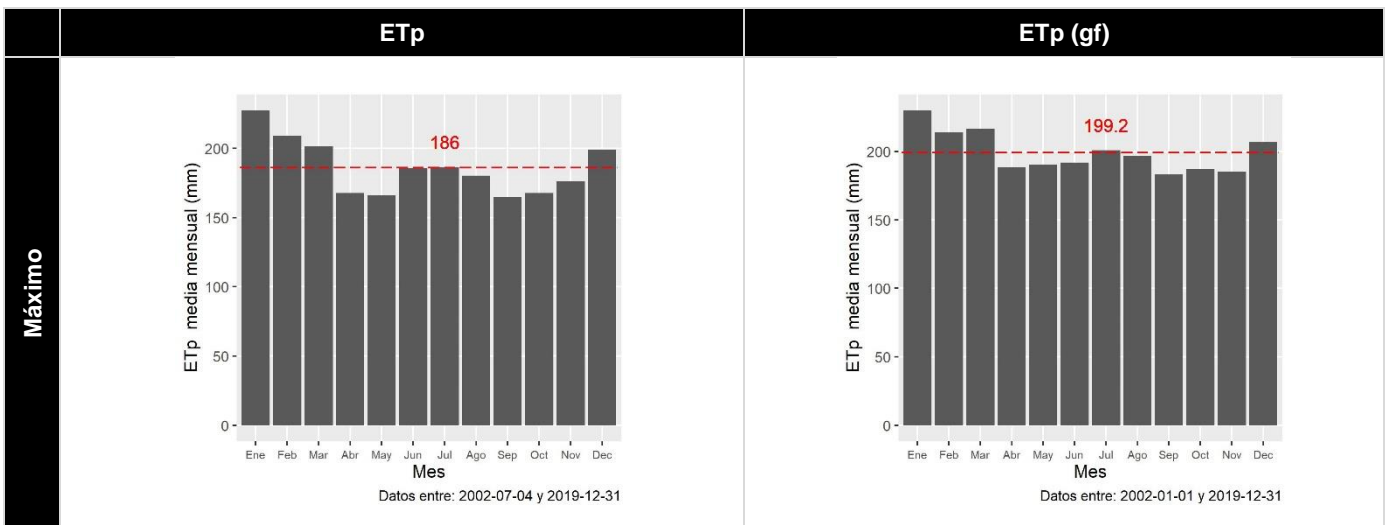
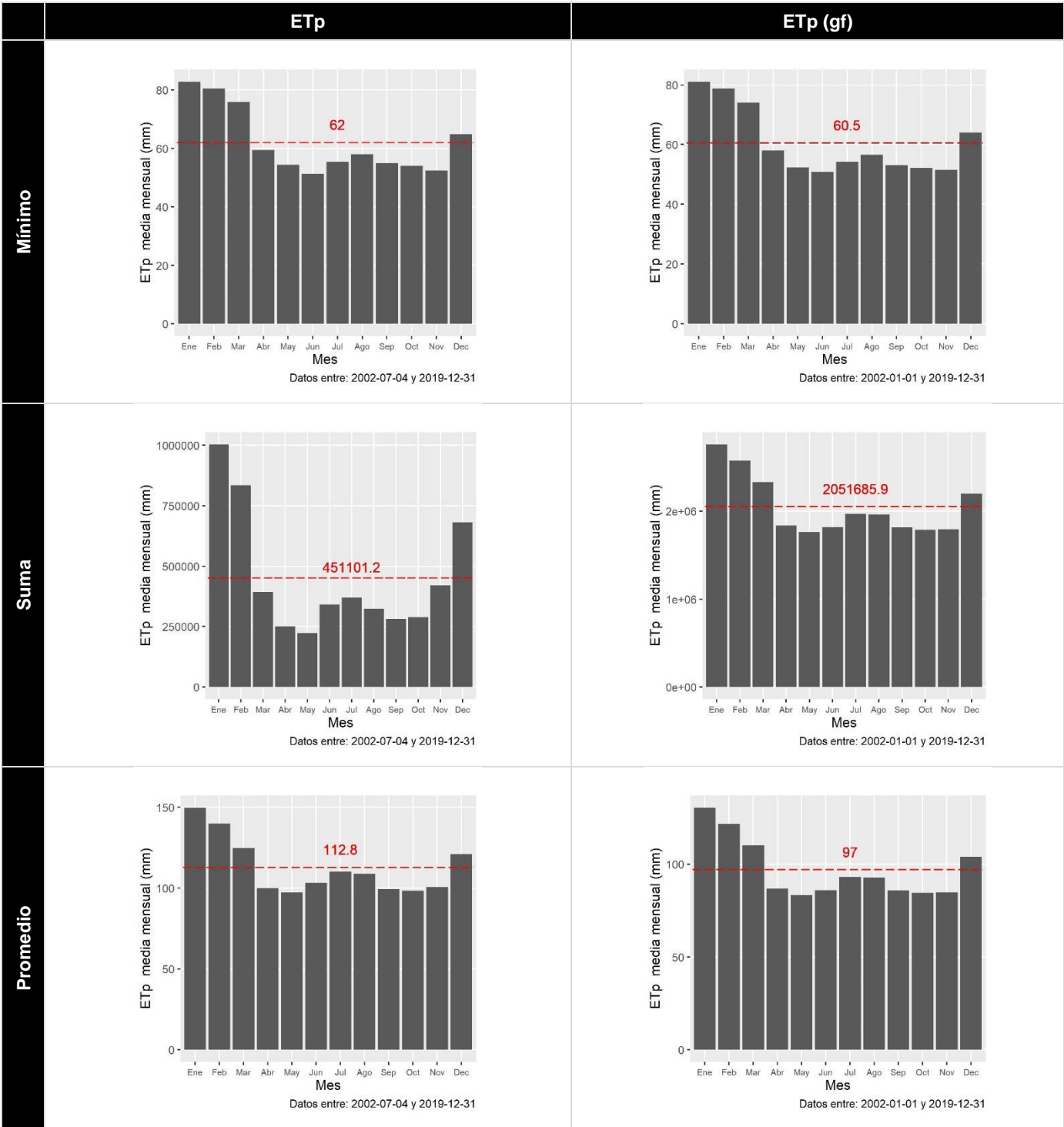


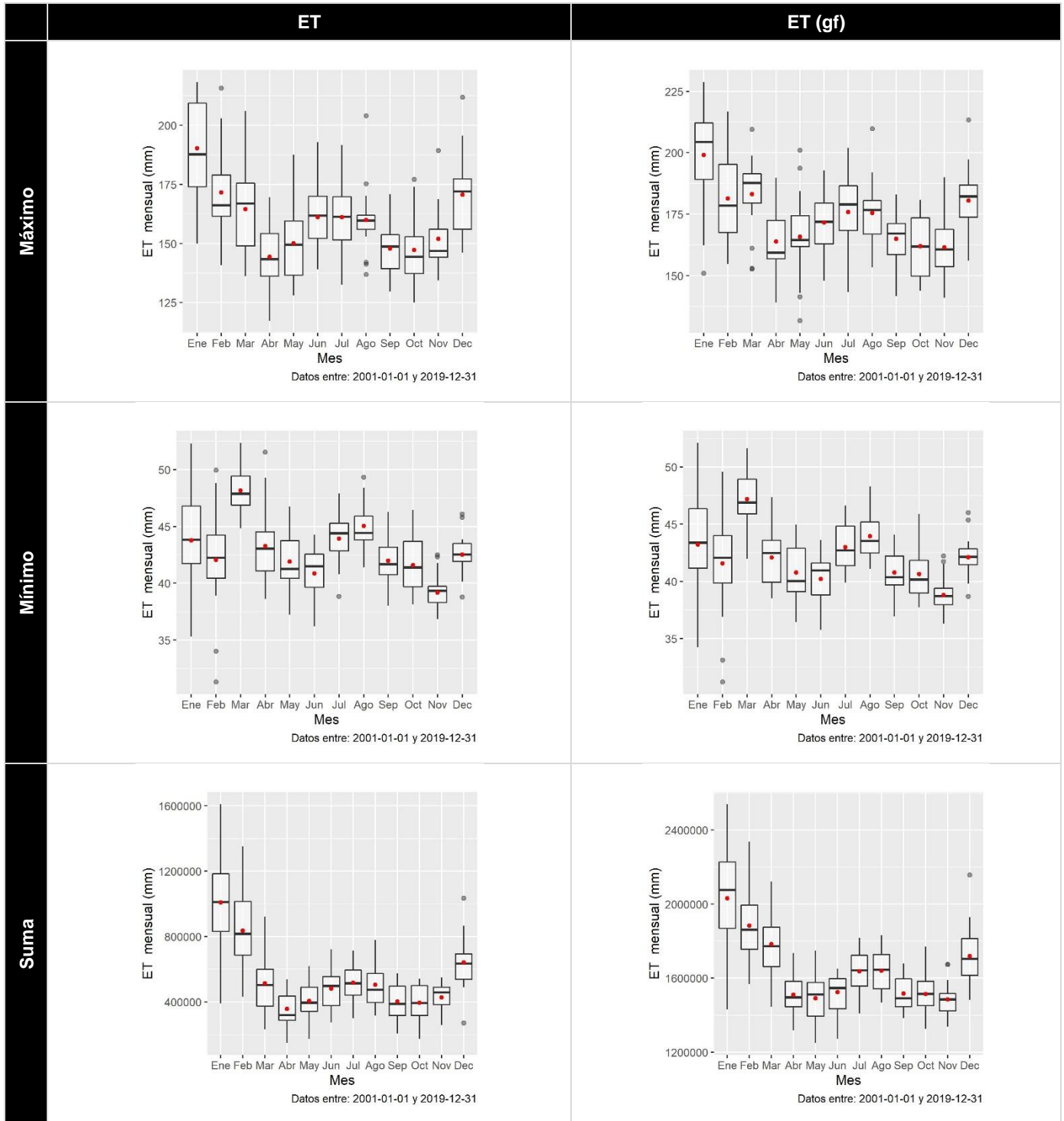
Figura 8-12: Series de tiempo mensual multianual de diferentes estadísticos descriptivos para la ETp estimada en el Sensor MODIS | Aqua.





8.4 Boxplot de Series de Tiempo Mensuales Multianuales

Figura 8-13: Series de tiempo mensual multianual de diferentes estadísticos descriptivos para la ET estimada en el Sensor MODIS | Terra.



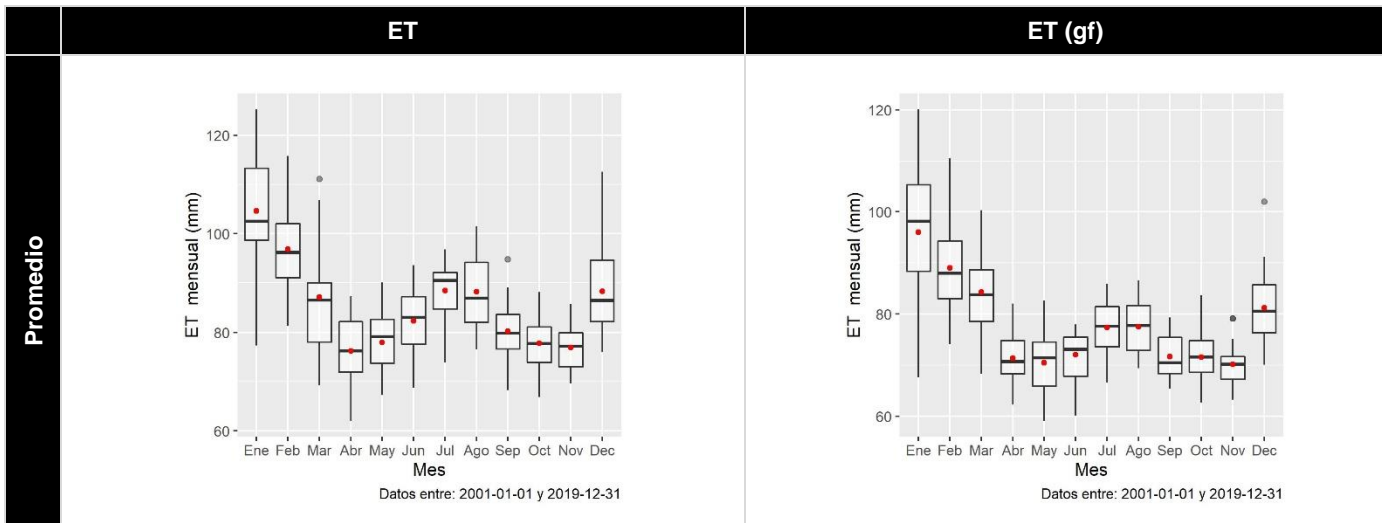
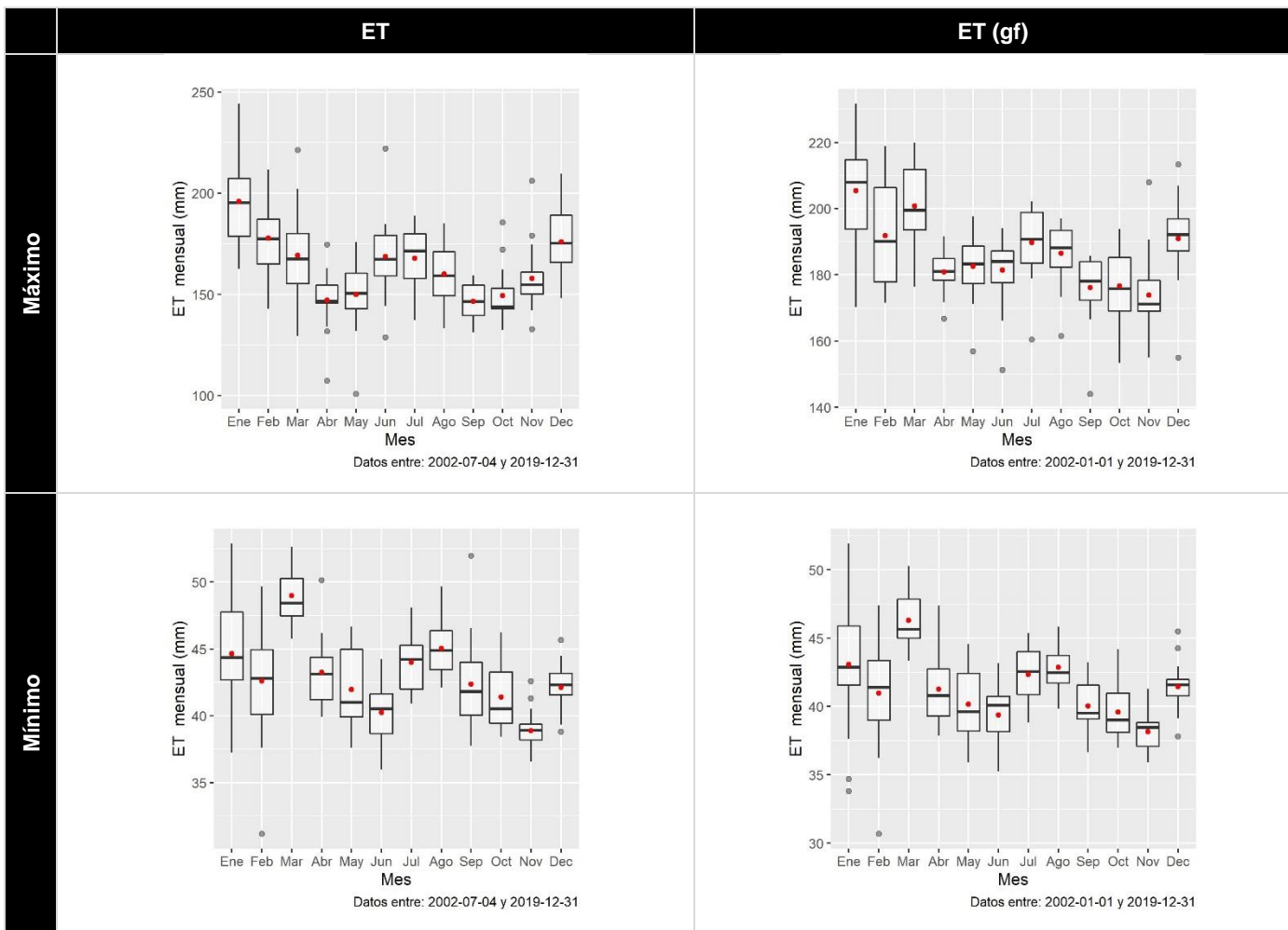


Figura 8-14: Series de tiempo mensual multianual de diferentes estadísticos descriptivos para la ET estimada en el Sensor MODIS | Aqua.



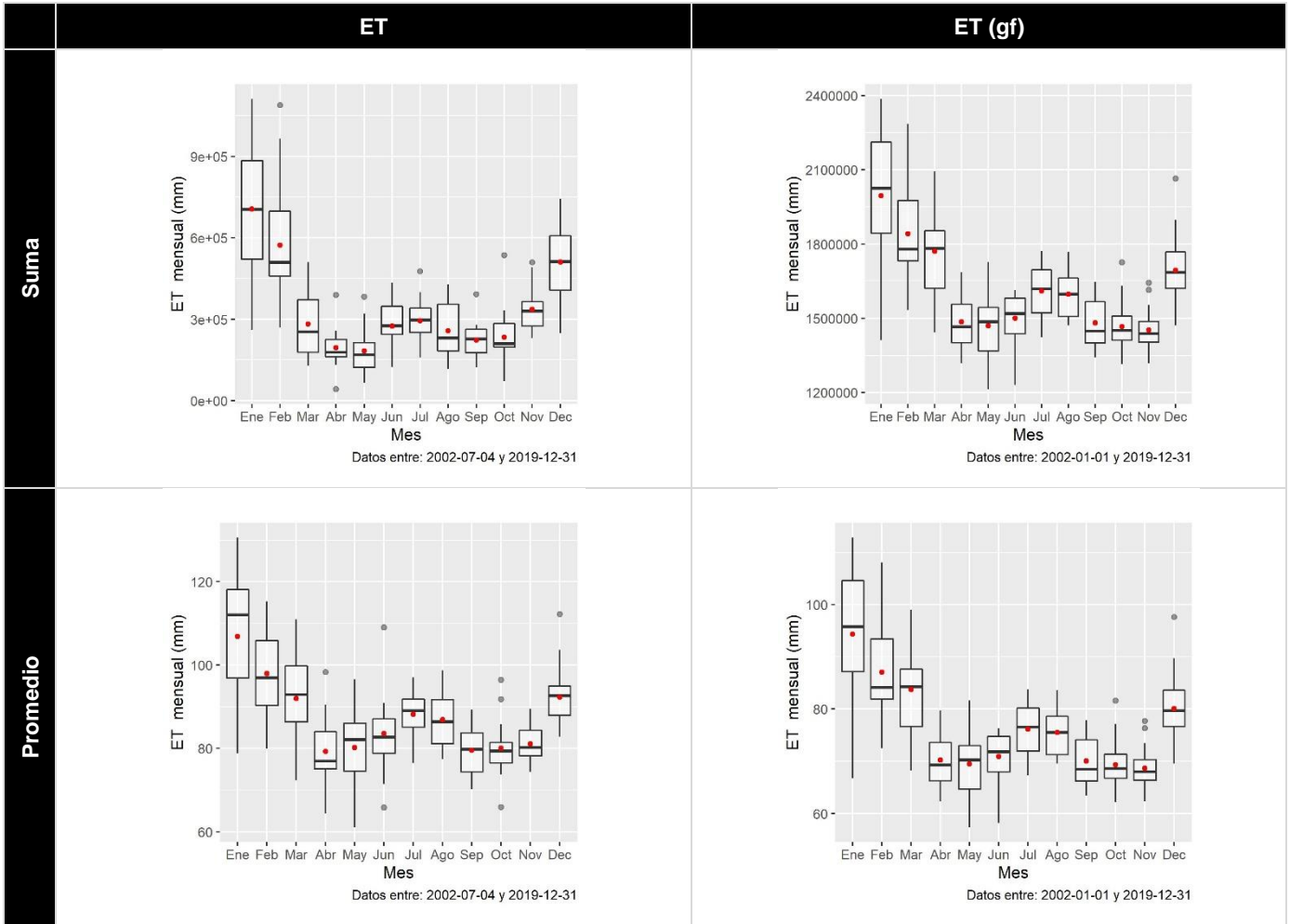
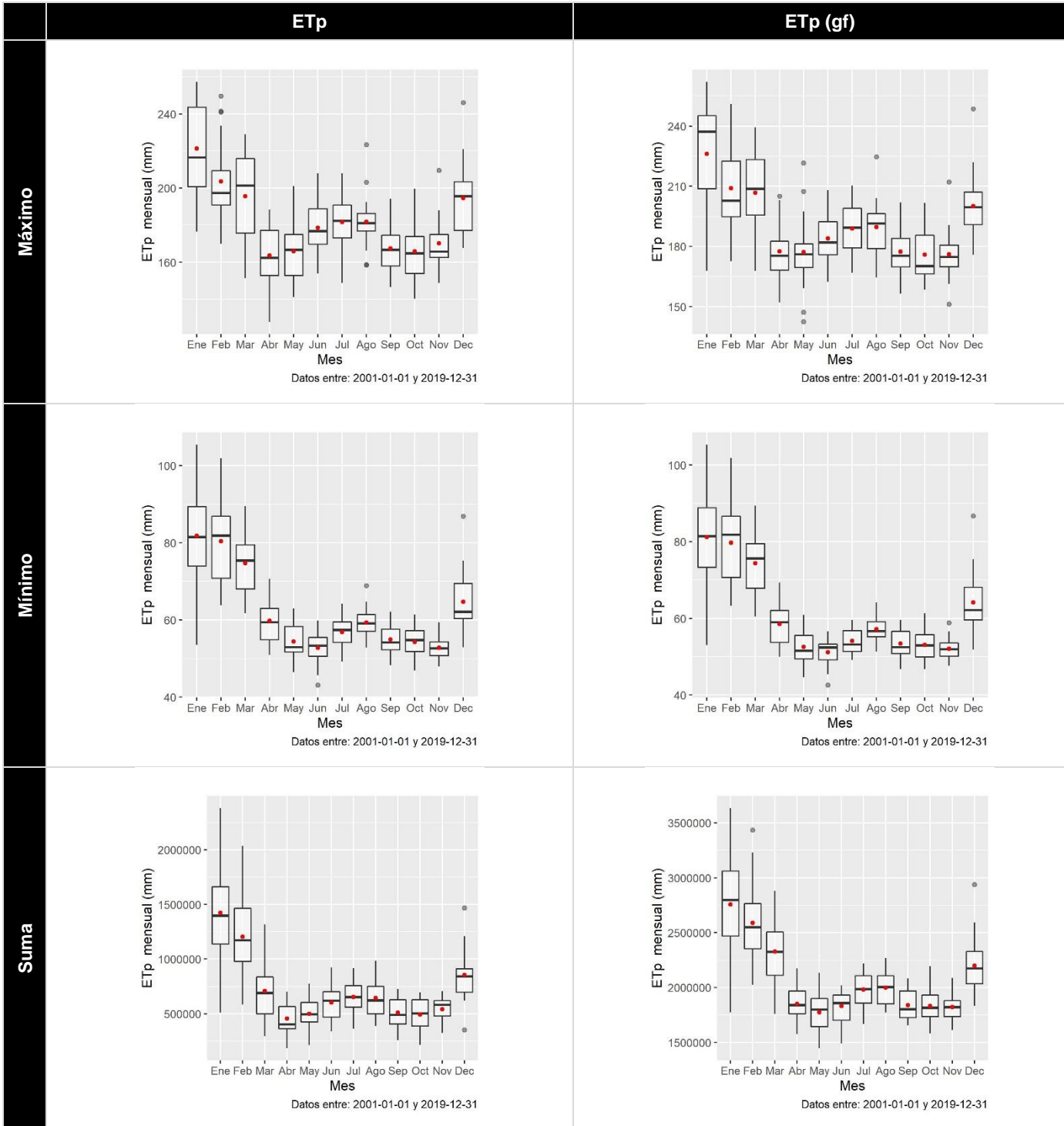


Figura 8-15: Series de tiempo mensual multianual de diferentes estadísticos descriptivos para la ETP estimada en el Sensor MODIS | Terra.



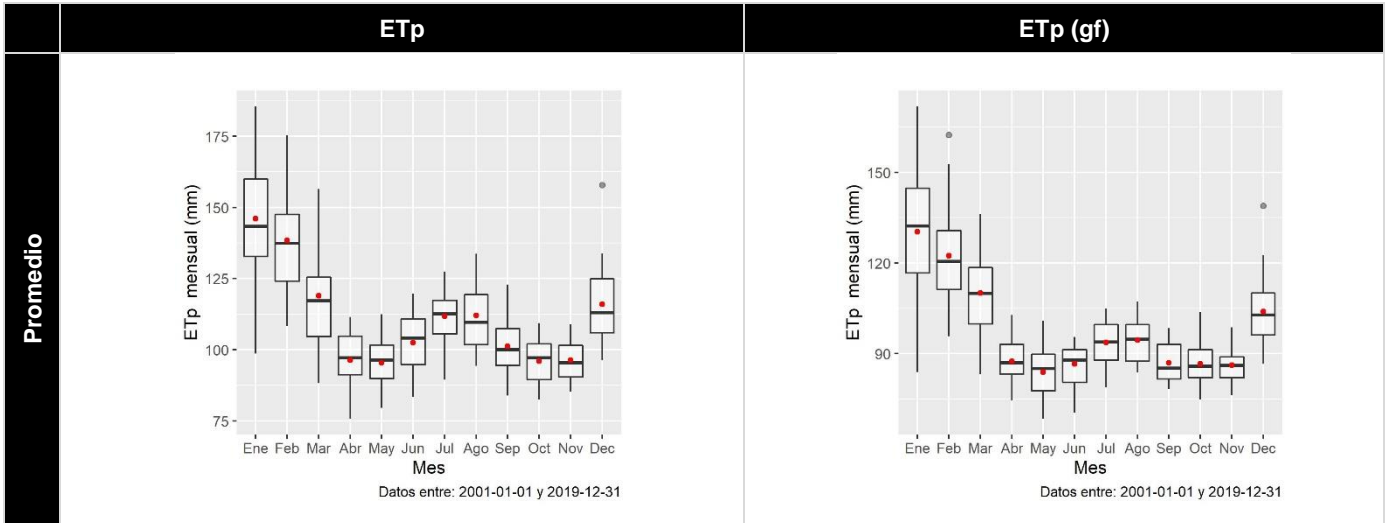


Figura 8-16: Series de tiempo mensual multianual de diferentes estadísticos descriptivos para la ETp estimada en el Sensor MODIS | Aqua.

