

Diciembre de 2021

ESTIMACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA (ET₀) EN COLOMBIA

Autores

Juan Geovany Bernal
César Andrés Cortés
Gloria Esperanza León
Andrés Felipe Rodríguez
Javier Andrés Tamayo
UPRA

Helmer Guzmán López
Edinson Hernando Quintero
María Paula Ramírez Sánchez
Ana Milena Rincón Loaiza
*Grupo de Climatología y Agrometeorología
Subdirección Meteorología-IDEAM*



Tabla de contenido

Resumen	4
1. Aspectos generales	4
2. Objetivos	5
2.1. <i>Objetivo general</i>	5
2.2. <i>Objetivos específicos</i>	5
3. Materiales y métodos	5
3.1. <i>Aspectos metodológicos</i>	5
3.2. <i>Ecuación de Penman-Monteith</i>	6
3.3. <i>Métodos de espacialización</i>	9
4. Resultados y discusión	10
5. Referencias bibliográficas	15

Índice de tablas

Tabla 1. Determinación de los principales parámetros meteorológicos mediante relaciones físicas.....	7
Tabla 2. Coeficiente de correlación (R2) entre ETo calculado por IDEAM Vs métodos UPRA	10
Tabla 3. Coeficiente de correlación (R2) entre HR y BS calculadas por IDEAM Vs métodos UPRA	14

Índice de figuras

Figura 1. Esquema conceptual para la determinación de la evapotranspiración de referencia con la ecuación de Penman-Monteith.....	9
Figura 2. Salidas gráficas para cada uno de los modelos, cuatrimestre 1 periodo 1981-2016.....	11
Figura 3. Salidas gráficas para cada uno de los modelos, cuatrimestre 2 periodo 1981-2016.....	12
Figura 4. Salidas gráficas para cada uno de los modelos, cuatrimestre 3 periodo 1981-2016.....	13
Figura 5. Resultados modelo UPRA-IDEAM para los meses de (a) enero, (b) mayo y (c) octubre, periodo 1981-2016.....	15

Resumen

En esta nota técnica se presenta un análisis de los resultados obtenidos por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales -Ideam y la Unidad de Planificación Rural Agropecuaria –UPRA, a partir de la implementación del método FAO PENMAN-MONTEITH, para el cálculo de la evapotranspiración de referencia para todo el territorio nacional. En los procedimientos, las dos instituciones emplearon 139 estaciones del Ideam que cuentan con todas las variables que se requieren para estimar la ETo; se usó el DEM STRM de 90 metros; el método de interpolación fue el IDW; y, el período de estudio fue 1980-2016. Para algunos meses de este periodo, se realizó una interpolación de precipitación obtenida a partir de la fusión de datos de estaciones y datos satelitales CHIRPS mediante el método de Distancia Inversa Ponderada Residual (RIDW) y temperatura ajuste de gradiente altitudinal con DEM STRM a 90 metros. Los resultados permiten observar correlaciones de error medio cuadrático (R2) superiores a 0,8 de ETo obtenidos por los métodos implementados por las dos instituciones. Además, se pueden apreciar correlaciones más bajas entre los resultados de las variables Humedad Relativa y Brillo Solar ($R^2 < 0,5$), esto puede indicar que los métodos implementados pueden ajustarse a correlaciones bajas de estas dos variables.

Palabras Clave: Evapotranspiración de referencia, CHIRPS, evaporación.

Cítese como: Guzmán, H., Quintero, E., Ramírez, P., Rincón, M., León, G., Bernal, J., Rodríguez, A. y Cortes, C. (2021). *Estimación de la evapotranspiración de referencia (ETo) en Colombia*. Ideam.

1. Aspectos generales

El clima es una cualidad dentro del territorio que incide directamente sobre la fisiología de las plantas y afecta de manera directa el proceso de fotosíntesis y, por ende, el crecimiento, la producción y la calidad de los cultivos. Las fluctuaciones a corto y largo plazo de las pautas del clima –variabilidad del clima y cambio climático– pueden tener repercusiones extremas en la producción agrícola, y hacer que se reduzca drásticamente el rendimiento de las cosechas. Esto obligaría a los agricultores a utilizar nuevas prácticas agrícolas en respuesta a las modificaciones de las condiciones de clima (FAO, 1997).

El incremento continuado de la temperatura del aire, unido a las variaciones en los patrones de las precipitaciones, ha generado efectos en los ciclos vegetativos y, por consiguiente, en su productividad. Con el aumento de la temperatura, hay una mayor elevación en la evapotranspiración. Esto se traduce en mayor consumo hídrico de las plantas, dado que el aumento de temperatura hace que se incremente el poder evaporante hacia la atmósfera. Algunos autores como Snyder, et. al., (2011) han documentado que otros factores como el incremento en la humedad relativa y las mayores concentraciones de CO₂ tienden a reducir la transpiración y contrarrestar el efecto de la temperatura.

En general, ante los posibles cambios esperados del clima, la productividad agraria podría cambiar de manera negativa para algunas regiones, mientras que en otras zonas podría favorecer su productividad y facilitar la producción de nuevos cultivos. Es claro que las olas de calor extremo, la reducción de las precipitaciones y del agua disponible pueden también generar efectos en la evapotranspiración y, en consecuencia, en la productividad agropecuaria (UPRA, 2020).

Como se puede ver, el clima cambiante compromete la dinámica (extensión y distribución) de las zonas aptas para que el desarrollo de actividades agrícolas de carácter productivo sea ambientalmente sostenible. De hecho, algunas de estas afectaciones se podrían subsanar con prácticas agrarias, tales como la rotación de cultivos para adaptarlos a la disponibilidad de agua; ajustar las épocas de siembra a la marcha de la temperatura y precipitación; y utilizar variedades de cultivos más adecuadas a las nuevas condiciones, por ejemplo, cultivos

resistentes a la sequía. Todo lo anterior demuestra que es necesario continuar con los procesos de adaptación al clima y al cambio climático (UPRA, 2020).

El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales-Ideam, en el marco de los servicios climáticos ofrecidos, ha establecido una ruta para el cálculo y zonificación de la variable evapotranspiración de referencia para todo el territorio nacional a escala mensual, empleando la ecuación estandarizada de Penman-Monteith. De igual manera, la Unidad de Planificación Rural Agropecuaria-UPRA, dentro del Sistema Integral de Gestión de Riesgos Agropecuarios-SIGRA, incluyó en su ruta metodológica la determinación y zonificación de la evapotranspiración de referencia con la expresión de FAO-Penman-Monteith también a escala mensual.

Dado que las dos instituciones, de carácter estatal, vienen avanzando en la misma dirección y la aplicación de los resultados se centra principalmente en la determinación de la evapotranspiración de cultivo, se hizo necesario acercar los dos enfoques de trabajo para intentar validar un solo método para su uso oficial. Este documento sintetiza el resultado de los espacios conjuntos de trabajo y los resultados obtenidos.

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

- Desarrollar la ruta metodológica para la determinación de la evapotranspiración de referencia y su espacialización por medio de la ecuación de Penman Monteith utilizada por UPRA e Ideam.

2.2. Objetivos específicos

- Desarrollar el procedimiento para la obtención y zonificación de las variables requeridas para el cálculo de la evapotranspiración de referencia.
- Analizar los resultados de las variables obtenidas por medio de las dos rutas de trabajo; los resultados obtenidos con datos de Ideam, y los resultados de los modelos de UPRA.
- Realizar comparaciones de modelos basados en satélites para estimar los flujos de evapotranspiración.
- Emplear procedimientos de interpolación espacial para evaluar en los sitios no medidos, así como para generar datos cuadriculados regulares para estudios regionales.

3. Materiales y métodos

A continuación, se presentan los aspectos metodológicos y expresiones matemáticas de la ecuación de Penman-Monteith y los ajustes realizados en algunos de sus subprocesos. Para ello, se parte de los avances en la determinación de la evapotranspiración de referencia de UPRA e Ideam.

3.1. Aspectos metodológicos

El procedimiento inicia con una depuración de estaciones del catálogo nacional del Ideam, en donde se incluyen aquellas que cuentan con monitoreo de variables como humedad relativa, brillo solar, radiación solar, precipitación y temperatura. Este filtro arrojó como resultado un total de 139 estaciones para todo el territorio nacional, con las cuales el Ideam procedió a determinar la evapotranspiración de referencia. Una vez se obtuvo esta variable, se interpoló en SIG, usando como método el IDW, con el cual se obtuvieron los doce mapas para el período 1981-2016 (ver Nota Técnica N° METEO 001-2019).

Por su parte, la UPRA parte del filtro de estaciones suministradas por el Ideam para crear los siguientes productos ráster: (i) mapa de humedad relativa, (ii) mapa de brillo solar, (iii) mapa de temperatura máxima, media y mínima, (iv) interpolación de evapotranspiración calculada por el Ideam. Para la especialización de los

campos de las variables climáticas, se utilizó la interpolación de la Distancia Inversa Ponderada - IDW (Inverse Distance Weighting), previa comparación con otros métodos de interpolación, incluido el procedimiento geoestadístico Kriging. A través de la validación cruzada, se determinó el error cuadrático medio para cada uno de los métodos y en promedio no se detectaron cambios significativos entre ellos. Para optimizar los resultados de los campos de temperatura, se determinó ecuación de regresión lineal entre temperatura y elevación que posteriormente fue aplicada con el modelo de elevación digital (DEM) a 30 metros (León, 2020).

Así mismo, para la determinación de la evapotranspiración de referencia es importante tener en cuenta que los únicos factores que afectan ETo son los parámetros climáticos. Por lo tanto, ETo es también un parámetro climático que puede ser calculado a partir de datos meteorológicos. ETo expresa el poder evaporante de la atmósfera en una localidad y época del año específicas, y no considera ni las características del cultivo, ni los factores del suelo. Desde este punto de vista, el método FAO Penman-Monteith (2006) se recomienda como el único método de determinación de ETo con parámetros climáticos (León, 2020).

El concepto de evapotranspiración de referencia se introdujo para estudiar la demanda de evapotranspiración de la atmósfera, independientemente del tipo y desarrollo del cultivo, y de las prácticas de manejo. Gracias a que hay una abundante disponibilidad de agua en la superficie de evapotranspiración de referencia, los factores del suelo no tienen ningún efecto sobre ETo. Al relacionar la ET a una superficie específica es posible contar con una referencia para otras superficies. Además, se elimina la necesidad de definir un nivel de ET para cada cultivo y periodo de crecimiento. De igual forma, se pueden comparar valores medidos o estimados de ETo en diferentes localidades o en diferentes épocas del año, ya que se hace referencia a ET bajo la misma superficie de referencia.

Una vez zonificadas las variables climáticas, se procede con la implementación de un algoritmo en python (código abierto) para realizar los cálculos descritos en la Figura 1. Con ello, UPRA obtuvo los siguientes productos: (v) Mapa de evapotranspiración calculada con modelo UPRA, (vi) Evapotranspiración calculada con precipitación obtenida a partir de la fusión de datos de estaciones y datos satelitales CHIRPS mediante el método de Distancia Inversa Ponderada Residual (RIDW).

Con estas salidas cartográficas se procede a realizar una validación por medio de error cuadrático medio entre los diferentes productos obtenidos de evapotranspiración por las dos instituciones. Este ejercicio se hace para cada uno de los meses del periodo 1981-2016, contrastando el modelo ETo IDEAM versus modelo ETo UPRA y, modelo ETo Ideam versus espacialización de ETo UPRA (139 estaciones).

3.2. Ecuación de Penman-Monteith

Para el cálculo de diferentes variables meteorológicas se siguieron las guías y pautas de OMM (2018) y FAO (2006). En la Tabla 1 se relacionan las ecuaciones físicas utilizadas para el cálculo de la presión real de vapor, presión de saturación de vapor, humedad relativa, punto de rocío, radiación extraterrestre, radiación solar y evapotranspiración de referencia (León, 2020). Las variables climáticas que se consolidan con la metodología referenciada son:

- Precipitación
- Temperatura media
- Temperatura máxima
- Temperatura mínima
- Humedad relativa media
- Brillo solar
- Radiación solar
- Evapotranspiración

Tabla 1. Determinación de los principales parámetros meteorológicos mediante relaciones físicas

Variable	Fórmula
Presión real de vapor	$e_a = e^o(T_{rocío}) = 0,6108 \exp\left[\frac{17,27 T_{rocío}}{T_{rocío} + 237,3}\right]$
Presión de saturación de vapor	$e^o(T) = 0,6108 * \exp\left[\frac{17,27 * T}{T + 237,3}\right]$
Humedad relativa	$HR = \frac{e_a}{e^o(T)} * 100$
Punto de rocío	$t_d = \frac{b \log_{10}(e_s HR/610.5)}{a - \log_{10}(e_s HR/610.5)} \quad \frac{a}{7.5} \quad \frac{b}{237.3} \quad t \geq 0^\circ C$ $\frac{a}{9.5} \quad \frac{b}{265.5} \quad t < 0^\circ C$
Radiación extraterrestre	$R_a = \frac{24 * 60}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega)]$
Distancia relativa inversa Tierra-Sol	$d_r = 1 + 0,033 * \cos\left(\frac{2\pi J}{365}\right)$
Declinación solar	$\delta = 0,409 * \text{sen}\left(\frac{2\pi J}{365} - 1,39\right)$
Ángulo de radiación a la hora de la puesta del sol	$\omega_s = \arccos [-\tan(\varphi) \tan(\delta)]$
Radiación solar	$R_s = \left(a_s + b_s \frac{n}{N}\right) R_a$
Evapotranspiración de referencia (Ecuación de Penman-Monteith)	$ET_o = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34 u_2)}$

Variable	Fórmula
Variables y unidades	T temperatura del aire [$^{\circ}\text{C}$]
	$T_{\text{rocío}}$ temperatura del punto de rocío [$^{\circ}\text{C}$]
	HR humedad relativa [%]
	$e^{\circ}(T)$ presión de saturación de vapor [kPa]
	e_a presión real de vapor [kPa]
	R_a radiación extraterrestre [$\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$]
	G_{sc} constante solar = $0,082 \text{ MJ m}^{-2} \text{ min}^{-1}$
	ω_s ángulo de radiación a la puesta del sol [rad]
	φ latitud [rad]
	δ declinación solar [rad]
	R_s radiación solar o de onda corta [$\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$]
	n duración real de la insolación [horas]
	N duración máxima posible de la insolación [horas]
	$a_s = 0,25$ y de $b_s = 0,50$
	ET_o evapotranspiración de referencia (mm día^{-1})
	R_n radiación neta en la superficie del cultivo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$)
	u_2 velocidad del viento a 2 m de altura (m s^{-1})
	e_s presión de vapor de saturación (kPa)
	e_a presión real de vapor (kPa)
	$e_s - e_a$ déficit de presión de vapor (kPa)
	Δ pendiente de la curva de presión de vapor ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$)
γ constante psicrométrica ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$)	

Nota. Adaptado de *Estimación de las variables climáticas requeridas para la implementación de la metodología de evaluación de tierras* (p. 32), por León, 2020, UPR.

Para entender los vínculos y relaciones entre las expresiones matemáticas en cada uno de los subprocesos descritos en el Tabla 1 y que están involucrados en la determinación de la evapotranspiración de referencia por medio de la ecuación de Penman Monteith, se construyó un esquema conceptual como el que se observa en la Figura 1.

Se resalta que las variables climáticas precipitación y temperatura media entran en cinco de las 21 expresiones matemáticas de todo el proceso, tema que será revisado en el capítulo de validación de resultados en donde se puede apreciar que la influencia en el error medio cuadrático de estas variables no es determinante en el error final obtenido de cálculo de evapotranspiración.

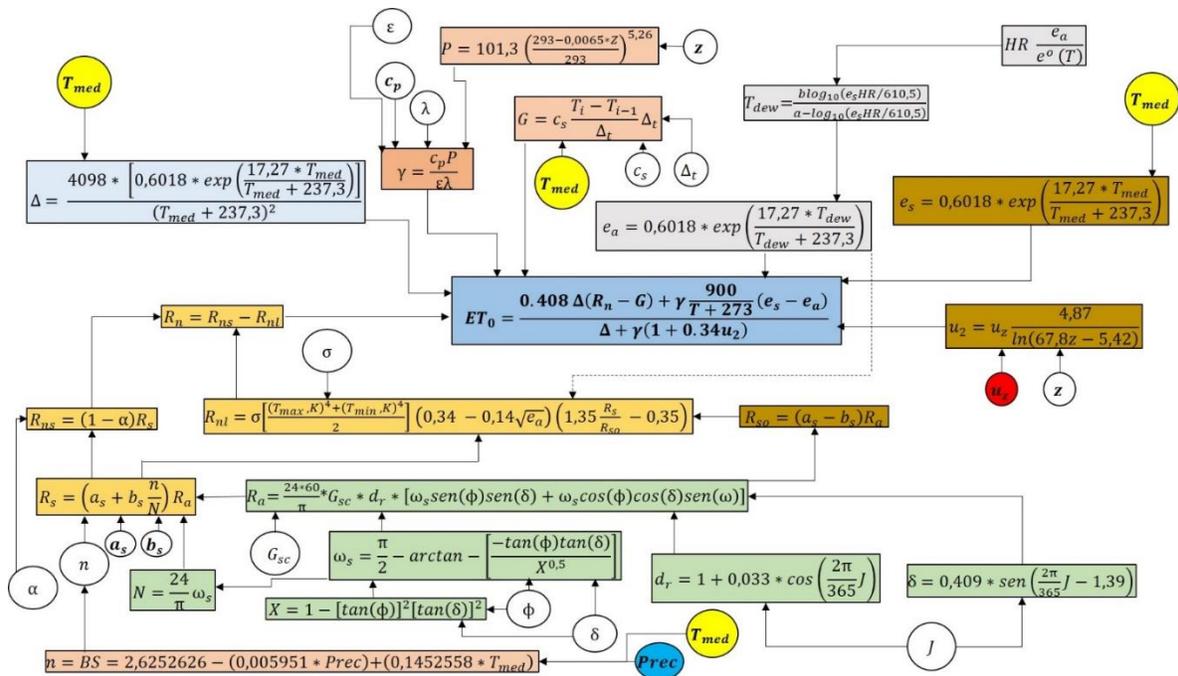


Figura 1. Esquema conceptual para la determinación de la evapotranspiración de referencia con la ecuación de Penman-Monteith

Nota. UPRA, 2021

Aquí se resalta que las variables climáticas como precipitación y temperatura media entran en cinco de las veintiuna expresiones matemáticas de todo el proceso. Este tema será revisado en el apartado en resultados, en el que se puede apreciar que la influencia en el error medio cuadrático de estas variables no es determinante en el error final, obtenido del cálculo de evapotranspiración.

3.3. Métodos de espacialización

Los métodos utilizados son:

Espacialización Ideam: Cálculo de \$ET_0\$ por estación (139) con base en los valores de todas las variables que se requieren para estimar \$ET_0\$. Los resultados son interpolados espacialmente empleando el método de la Distancia Inversa Ponderada (IDW).

Espacialización IDEAM: Cálculo de \$ET_0\$ por estación (139) con base en los valores de todas las variables que se requieren para estimar \$ET_0\$. Los resultados son interpolados espacialmente empleando el método de la Distancia Inversa Ponderada (IDW).

Espacialización UPRA: Interpolación espacial IDW de todas las variables que se necesitan para estimar la \$ET_0\$, excepto para temperatura que emplea la metodología de ajuste de gradiente altitudinal con DEM SRTM a 90 metros. El cálculo de \$ET_0\$ se hace a nivel de pixel. La fuente de información climática es IDEAM.

Metodología UPRA: Interpolación espacial IDW para precipitación y temperatura ajuste de gradiente altitudinal con DEM STRM. Obtención a nivel de pixel de variables de HR y BS a partir de P y temperaturas. El cálculo de \$ET_0\$ se hace a nivel de pixel. Fuente de información climática: IDEAM.

Metodología UPRA – IDEAM: Interpolación de precipitación obtenida a partir de la fusión de datos de estaciones y datos satelitales CHIRPS mediante el método de Distancia Inversa Ponderada Residual (RIDW) y temperatura ajuste de gradiente altitudinal con DEM SRTM a 90 metros. Obtención a nivel de pixel de variables de HR y BS a partir de P y temperaturas. El cálculo de ETo se hace a nivel de pixel. Fuente de información climática, IDEAM.

4. Resultados y discusión

A continuación, se presentan las salidas gráficas de cada uno de los modelos involucrados en este documento. De la figura 2 a la 4, se observa la zonificación de la evapotranspiración de referencia por cada uno de los métodos, en la columna 1 se observa mes a mes los resultados de la zonificación realizada por UPRA a partir de los registros de IDEAM, en la columna 2 los resultados de la interpolación realizada por IDEAM, y en la columna 3 la zonificación a partir del modelo de evapotranspiración desarrollado por UPRA-IDEAM.

En resumen, y de acuerdo con las observaciones recibidas por parte del comité de seguimiento, los dos modelos de UPRA permiten estimar una representación de mayor detalle en algunas regiones:

- En el valle medio del río Magdalena se observa una mayor evapotranspiración en la mayor parte de los meses del año.
- En los departamentos del Cesar y La Guajira se observan mayores extensiones de alta evapotranspiración en relación con menores extensiones del modelo de IDEAM.
- Al oriente del país se observa una zonificación de la evapotranspiración que corresponde con la distribución de los biomas de Orinoquía y Amazonía.

Para evaluar la correlación entre cada uno de los métodos, se usaron los valores de evapotranspiración de referencia de las 139 estaciones suministrados por IDEAM y se evaluó el coeficiente de correlación R2 de los dos métodos de UPRA vs los datos de IDEAM. En la Tabla 2 se observa el resultado de esta evaluación.

Tabla 2. Coeficiente de correlación (R2) entre ETo calculado por IDEAM Vs métodos UPRA

Mes	ETo IDEAM Vs Espacialización UPRA	ETo IDEAM Vs Modelo UPRA-IDEAM
Enero	0,874	0,8348
Febrero	0,867	0,8417
Marzo	0,872	0,8503
Abril	0,863	0,8607
Mayo	0,865	0,8247
Junio	0,863	0,824
Julio	0,870	0,7994
Agosto	0,850	0,769
Septiembre	0,815	0,7271
Octubre	0,823	0,7294
Noviembre	0,836	0,7688
Diciembre	0,853	0,8262

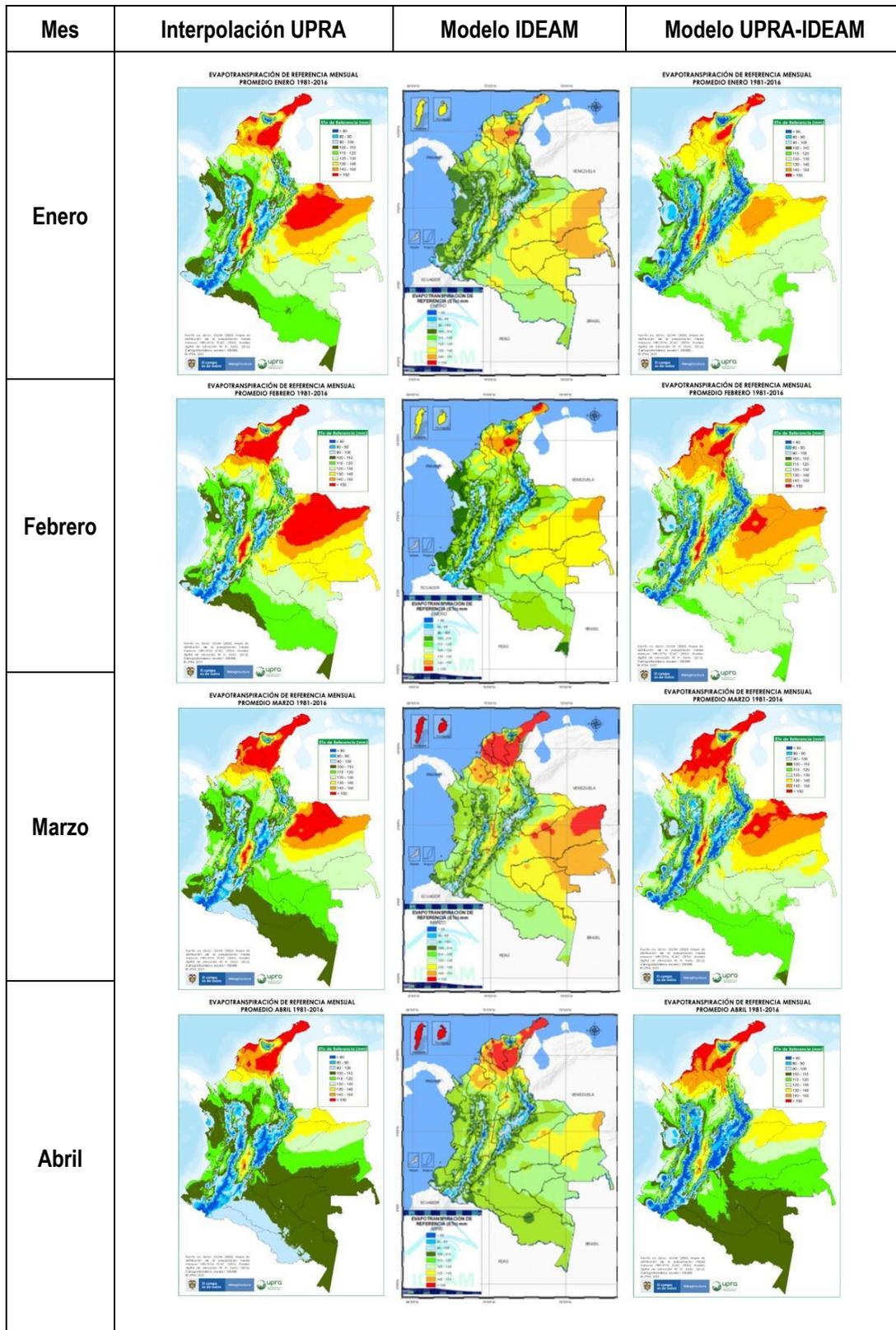


Figura 2. Salidas gráficas para cada uno de los modelos, cuatrimestre 1 periodo 1981-2016

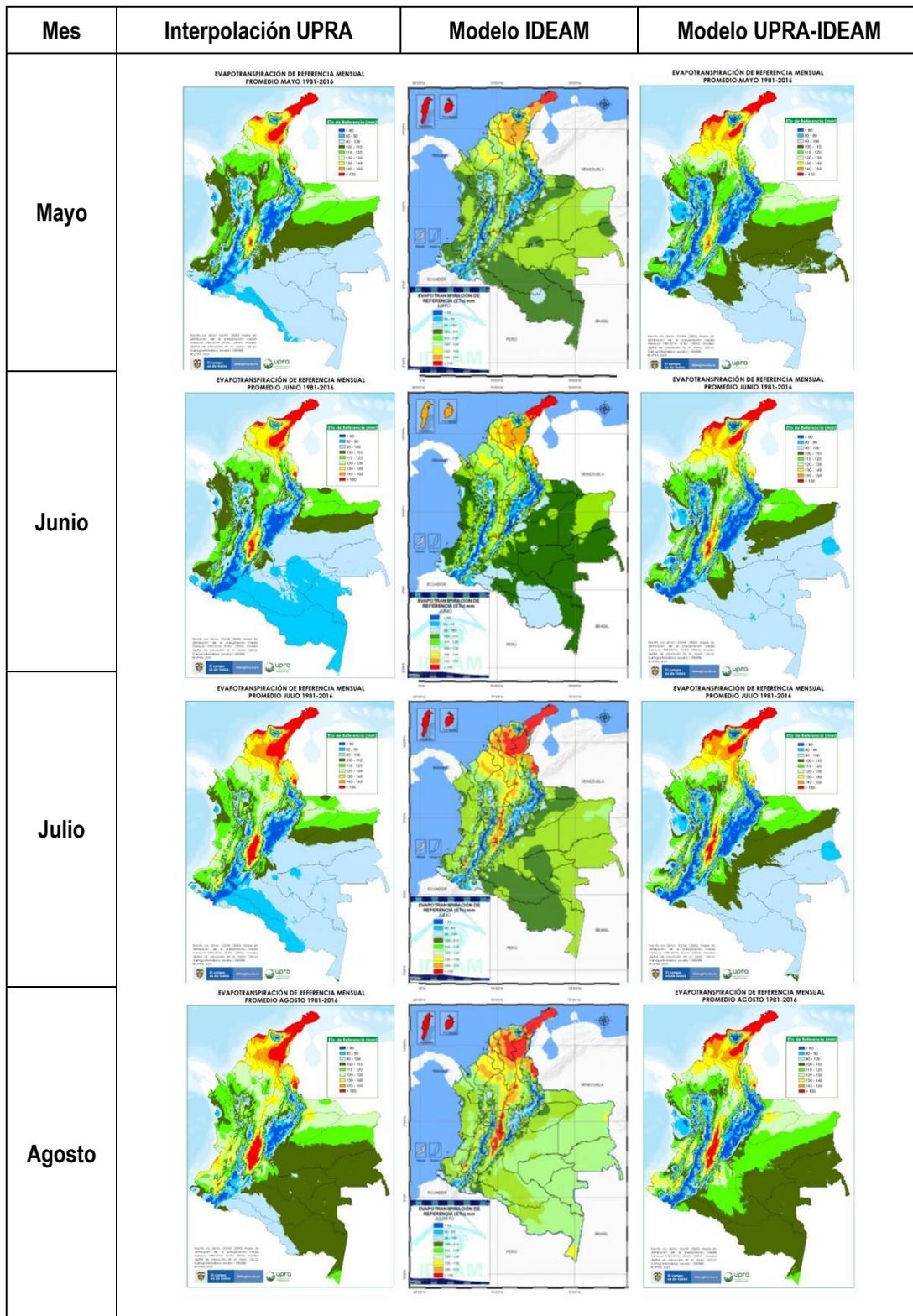


Figura 3. Salidas gráficas para cada uno de los modelos, cuatrimestre 2 periodo 1981-2016

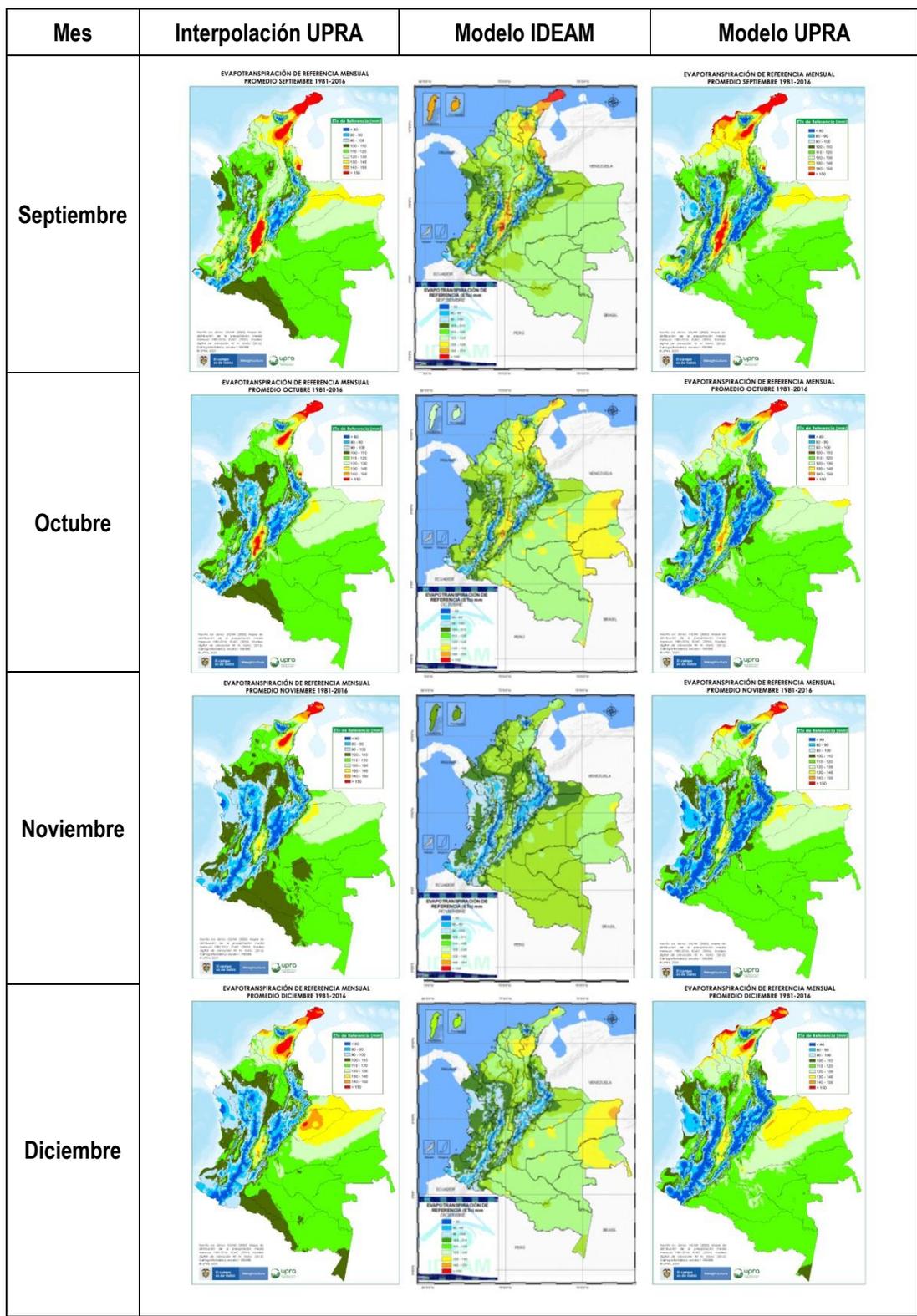


Figura 4. Salidas gráficas para cada uno de los modelos, cuatrimestre 3 periodo 1981-2016

En la primera columna se observa que para todos los meses se obtienen correlaciones por encima de 0.8 lo cual indica una buena correlación lineal. Para el caso de la segunda columna se tiene una correlación buena, aunque un poco inferior que la anterior. Esto indica que los métodos de UPRA e IDEAM coinciden de manera aceptable en los resultados obtenidos. El resultado no sorprende, toda vez que ambas entidades usan el método de Penman-Monteith como soporte de cálculo de esta variable. Sin embargo, para verificar la calidad de las variables climáticas que intervienen en la determinación de la ETo se procedió a evaluar la correlación de los resultados obtenidos para la determinación de la humedad relativa y el brillo solar. Se evaluó el coeficiente de correlación R2 del modelo UPRA-IDEAM vs los datos de las dos variables de IDEAM. En la Tabla 3 se observa el resultado de esta evaluación.

Tabla 3. Coeficiente de correlación (R2) entre HR y BS calculadas por IDEAM Vs métodos UPRA

Mes	HR IDEAM Vs HR UPRA	BS IDEAM Vs BS UPRA
Enero	0,311	0,5309
Febrero	0,358	0,5372
Marzo	0,371	0,5298
Abril	0,345	0,6178
Mayo	0,345	0,4997
Junio	0,438	0,5522
Julio	0,466	0,5212
Agosto	0,414	0,4068
Septiembre	0,308	0,3485
Octubre	0,201	0,4391
Noviembre	0,197	0,5496
Diciembre	0,241	0,5587

Como se observa en la tabla 3, los ajustes de los resultados no son satisfactorios, la humedad relativa muestra valores de R2 por debajo de 0.5, es decir, hay una débil correlación entre los dos métodos. De igual forma, la correlación de los resultados obtenidos para el brillo solar deja ver valores de R2 un poco superiores a la anterior variable. En contraste con el variable brillo solar en la que se utilizó una expresión empírica construida a partir de precipitación y temperatura media y los datos de brillo solar de las 139 estaciones.

RESULTADOS MODELO UPRA-IDEAM

A partir del modelo desarrollado por UPRA-IDEAM se hizo un ensamble con productos de CHIRPS de variables climáticas como la precipitación, a manera de prueba se evaluó para los meses de enero, mayo y octubre, para el período 1981-2016. Los resultados permiten observar que el modelo describe un comportamiento de la variable ETo muy asociado a las regiones biogeográficas donde no se tiene amplia red de estaciones, pero se conoce sus condiciones de cobertura vegetal y comportamiento climático. Como ejemplo se observa al sur de la costa pacífica en donde la variable describe un gradiente distribuido en consonancia con la selva del Chocó biogeográfico. También se observa en las cordilleras una mejor distribución de la variable en coherencia con el gradiente alto térmico. En la Figura 8 se observa los resultados del modelo UPRA & CHIRPS-estaciones RIDW para los meses de (a) enero, (b) mayo y (c) octubre, período 1981-2016.

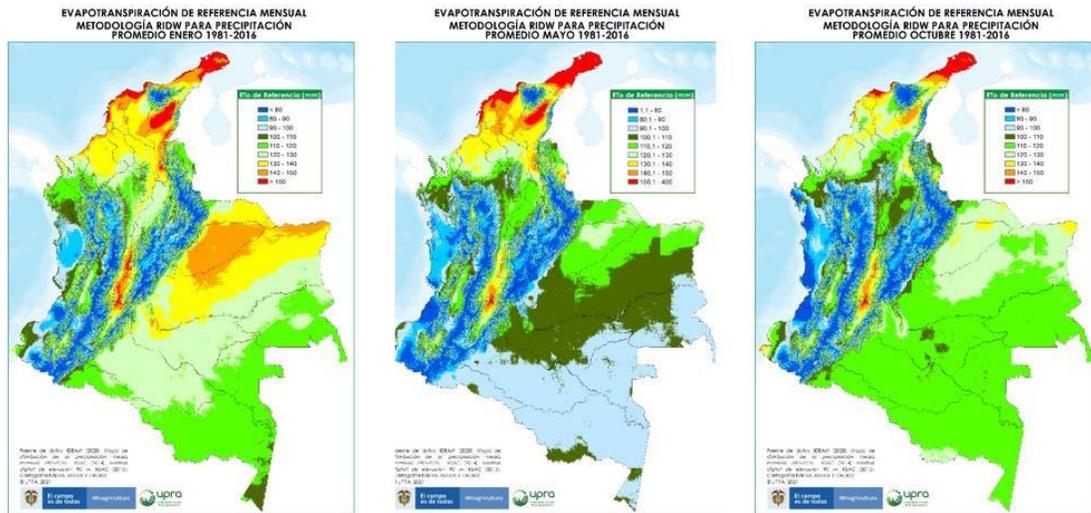


Figura 5. Resultados modelo UPRA-IDEAM para los meses de (a) enero, (b) mayo y (c) octubre, período 1981-2016

5. Referencias bibliográficas

León, G. (2020). *Estimación de las variables climáticas requeridas para la implementación de la metodología de evaluación de tierras*. UPRA.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación. (1997). *La agricultura y los cambios climáticos: la función de la FAO*. <http://www.fao.org/noticias/1997/971201-s.htm>

Allen, R., Pereira, L., Raes, D. y Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación-FAO.

Unidad de Planificación Rural Agropecuaria. (2020). *Metodología de análisis prospectivos*. UPRA.

Unidad de Planificación Rural Agropecuaria. (2021). *CPS-121 Bernal Patiño J.G*. UPRA.