

## EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA (ET<sub>0</sub>) Y CAMBIO CLIMÁTICO EN MÉXICO COMO HERRAMIENTA DE PLANEACIÓN DE LA ADAPTACIÓN

Alejandro Ismael MONTERROSO RIVAS, Jesús David GÓMEZ DÍAZ,  
Antonio Rafael ARCE ROMERO, Miguel Ángel PALACIOS MENDOZA  
y Lizeth Margarita LECHUGA GAYOSSO

*Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo. México.*  
[aimrivas@correo.chapingo.mx](mailto:aimrivas@correo.chapingo.mx)

### RESUMEN

Se presenta un estudio sobre evapotranspiración potencial (ETP) para México en condiciones actuales y con escenarios de cambio climático. Comprendió cinco modelos, tres horizontes de tiempo y dos RCP para 28 escenarios. El método aplicado fue Penman–Monteith y se calibró con una estación meteorológica con información medida. Los resultados muestran que actualmente la ETP va desde 460 hasta 2130mm con promedio nacional del orden de 1280mm anuales. En el horizonte cercano (2015-2039) con RCP de 4.5 para las zonas de más de 2000mm se estima que podrían aumentar 375% su superficie. En el horizonte medio (2040-2069) la misma región podría incrementar un 480% y para el horizonte lejano (2070-2099) se caracteriza por presentar valores extremos aún más drásticos. El valor máximo que se encontró en el año base es de 2129mm y el escenario de cambio climático más drástico alcanza los 2560mm. Por su parte, el valor más bajo actualmente es de 462mm y el escenario de cambio climático más drástico inicia en 947mm. Lo anterior corrobora que se esperan valores más elevados de ETP debido al aumento en temperaturas y disminución de la humedad relativa.

**Palabras clave:** ETP, evaporación, proyección, requerimientos hídricos, cultivos

### ABSTRACT

A study on potential evapotranspiration (ETP) for Mexico is presented under current conditions and climate change scenarios. It comprised five models, three time horizons and two RCP's, for a total of 28 scenarios. The applied method was Penman-Monteith and it was calibrated with data from a weather station. The results show that the ETP currently ranges from 460 to 2130mm with national annual average of about 1280mm. In the near horizon (2015-2039) with a RCP 4.5 in areas of more than 2000mm, it was estimated an increase of 375% in surface. By middle horizon (2040-2069) the same region could increase 480% and the distant horizon (2070-2099) is characterized by even more drastic extremes. The maximum value found in the base year is 2129mm and the worst scenario of climate change reaches 2560mm. Meanwhile, the lowest value is currently 462mm and stage more drastic climate change starts at 947mm. This corroborates that higher values of ETP due to increased temperatures and decreased relative humidity are expected.

**Key words:** PET, evaporation, projection, water requirements, crops

## 1. INTRODUCCIÓN

El conocimiento del balance hídrico es fundamental para definir los servicios ambientales hidrológicos proveídos por los ecosistemas. Con la información detallada del balance hídrico es posible comparar recursos específicos de agua en un sistema, en diferentes períodos de tiempo, y establecer el grado de su influencia en las variaciones del régimen natural. La comprensión del ciclo hidrológico mediante la estimación del volumen, en tiempo y espacio, es importante para encontrar el equilibrio entre los diferentes componentes del ecosistema (FAO, 2007). La cuenca como unidad de manejo, se cimienta en las evidencias del ciclo hidrológico: la lluvia, el escurrimiento superficial, la infiltración hacia los acuíferos, la evaporación y la transpiración de las plantas y animales, y de esa forma la naturaleza funge como protagonista hacia la integridad socioeconómica por el agua: cuenca arriba con cuenca abajo, cuerpos de agua superficiales como ríos, humedales, con los acuíferos y las cimas de las montañas con los valles.

A partir de un balance hídrico es posible hacer una evaluación cuantitativa del recurso agua y sus modificaciones por diversos factores y así determinar las zonas consideradas como potenciales para recarga de acuíferos (Dunne, 1978). También, es posible determinar el flujo de todas las variables, como lo es la evapotranspiración.

Se conoce como evaporación potencial ( $E_v$ ) a la cantidad de vapor de agua que puede ser emitida desde una superficie libre con agua. Transpiración es la pérdida de agua liberada hacia la atmósfera a través de los estomas de las plantas. Evapotranspiración (ET) es la suma de las cantidades de agua evaporada desde el suelo y transpirada por las plantas. Evapotranspiración Real (ETR) es la cantidad de agua perdida por el complejo planta-suelo en las condiciones meteorológicas, edáficas y biológicas existentes. Evapotranspiración Potencial (ETP) es la máxima cantidad de agua capaz de ser perdida por una capa continua de vegetación que cubra todo el terreno, cuando es ilimitada la cantidad de agua suministrada al suelo. En estas últimas se incluye el tipo de cultivo y su fase de crecimiento y desarrollo (Ortiz-Solorio, 1987) y en particular sobre la última es sobre la que se presentan resultados en este trabajo. El objetivo del trabajo fue estimar la evapotranspiración actual y futura con escenarios de cambio climático, para conocer el cambio en la variable, tanto espacial como temporalmente, para que sirva como información base en la definición de programas de recomendación para cultivos con enfoque de adaptación al cambio climático.

## 2. MÉTODOS

El proceso se dividió en tres etapas: primero se estudió la evapotranspiración en una estación meteorológica (punto) y después se aplicó el método para todo el país (a partir de polígonos o áreas de influencia climática con cobertura espacial para todo el país) en condiciones actuales y con los escenarios de cambio climático. Las etapas son descritas a continuación:

Seleccionamos 37 estaciones meteorológicas (Tabla 1) distribuidas en el país, desde los 5 metros sobre el nivel del mar hasta los 2586, asegurando la represen-

tatividad de la mayoría de los grupos climáticos presentes en México. Se obtuvo la información climática del Extractor Rápido de Información Climática -ERIC versión III (IMTA, 2002), cuidando que las estaciones contaran con información climática completa sobre temperatura, humedad relativa, viento, insolación y radiación solar. Para cada estación se tomaron 10 años de información mensual de cada variable, comprendidos entre los años 1997 y 2012 (variando según cada estación). Con el objetivo de calibrar el método se tomó la estación Chapingo para comparar la ETo estimada con la información de evapotranspiración medida (con lisímetro), facilitando la calibración (Ojeda-Bustamante *et al.*, 2011).

Numero	Nombre de la estación	Altura (msnm)	Longitud	Latitud	Estado
30153	San Rafael	5	-96.869	20.194	Veracruz
18034	Santiago Ixcuintla	16	-105.203	21.814	Nayarit
25078	Rosario, Rosario	23	-105.860	22.990	Sinaloa
30107	Minatitlán	31	-94.559	17.989	Veracruz
6058	Tecomán	32	-103.874	18.908	Colima
27044	Teapa	40	-92.953	17.549	Tabasco
28086	San Fernando	49	-98.158	24.847	Tamaulipas
25015	Culiacán	61	-107.398	24.792	Sinaloa
30102	La Torre	97	-97.064	20.079	Veracruz
2056	San Vicente	104	-116.248	31.329	Baja California
28003	Aldama	127	-98.075	22.920	Tamaulipas
7200	Tapachula	156	-92.261	14.910	Chiapas
28084	San Carlos	468	-98.947	24.585	Tamaulipas
7094	La Mesilla	620	-92.287	16.184	Chiapas
2035	Ojos Negros	697	-116.265	31.912	Baja California
14019	Autlán	914	-104.369	19.771	Jalisco
18038	Tepic	916	-104.883	21.500	Nayarit
2121	El Hongo	1050	-116.303	32.516	Baja California
30179	Teocelo	1181	-96.974	19.386	Veracruz
30026	Coatepec	1182	-96.944	19.456	Veracruz
8044	Delicias	1227	-105.464	28.100	Chihuahua
7055	Finca Chayabe	1415	-91.711	16.381	Chiapas
16165	Uruapan	1595	-102.052	19.395	Michoacán
11028	Irapuato	1715	-101.348	20.670	Guanajuato
11060	Salvatierra	1748	-100.886	20.215	Guanajuato
11009	Celaya	1757	-100.815	20.529	Guanajuato
32059	Villa De Cos	1982	-102.344	23.289	Zacatecas
21035	Puebla	2135	-98.193	19.013	Puebla
15170	Chapingo	2251	-98.886	19.485	México
32054	Sombrerete	2302	-103.640	23.635	Zacatecas
30032	Coscomatepec	2382	-97.046	19.720	Veracruz
30128	Perote	2385	-97.248	19.581	Veracruz
20342	San José del Pacifico	2467	-96.500	16.167	Oaxaca
15009	Atacomulco	2526	-99.883	19.800	México
29035	Calpulalpan	2586	-98.564	19.586	Tlaxcala

Tabla 1. Estaciones meteorológicas, coordenadas geográficas y altitud.

El cálculo de ETo fue con base en la metodología propuesta por Penman-Monteith adoptada por FAO (Allen *et al.*, 2010) de acuerdo con la ecuación:

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)} \quad (1)$$

En donde ETo es la evapotranspiración de referencia (mm/día);  $R_n$  es la radiación neta en la superficie del cultivo (MJ/m<sup>2</sup>/día);  $R_a$  es radiación extraterrestre (mm/día);  $G$  es el flujo de calor del suelo (MJ/m<sup>2</sup>/día);  $T$  es la temperatura media del aire a 2 m de altura (°C),  $u_2$  es la velocidad del viento a 2 m de altura (m/s);  $e_s$  se refiere a la presión de vapor a saturación (kPa);  $e_a$  la presión real de vapor (kPa);  $e_s - e_a$  es el déficit de presión de vapor;  $\Delta$  es la pendiente de la curva de presión de vapor (kPa/°C) así como  $\gamma$  es una constante psicrométrica (kPa/°C).

Toda vez que se calibró una estación se aplicó la fórmula para todo el país en 313,283 áreas de influencia climática (AIC) mejor descritas en Gómez (2008). Cabe señalar que no se utilizó interpolación espacial. Para cada una de las AIC se calculó la ETo actual y futura bajo escenarios de cambio climático. Todos los cálculos de ETo fueron de acuerdo con el método de Penman–Monteith y la fórmula 1.

Finalmente se aplicaron los escenarios de cambio climático (Fernandez *et al.*, 2009) para cinco modelos: HadGEM2-ES (Inglaterra), GFDL\_CM3 (Estados Unidos), MPI-ESM-LR (Alemania), CNRMCM5 (Francia) y el ensamble mexicano REA (*reliability ensemble averaging*); tres horizontes de tiempo: cercano (2015-2039), medio (2039-2069) y lejano (2075-2099); además de dos escenarios de concentración (*representative concentration pathways*) RCP: 4.5 y 8.5 W/m<sup>2</sup>. Lo anterior implicó trabajar con 28 escenarios de cambio climático en total.

### 3. RESULTADOS

**ETo, condiciones actuales.** Las regiones que presentan valores más altos de ETo son el noroeste, la península de Baja California, los estados costeros de sur y Golfo, así como la península de Yucatán. Los valores más bajos de ETo estimados se relacionan con los sistemas montañosos como la Sierra Madre Oriental y Occidental, el Sierra Transversal y la Sierra Madre del Sur, principalmente (Figura 1). La ETo para el escenario base va de 460mm en las zonas de alta montaña del Pico de Orizaba a 2130mm en el norte de Sinaloa. Lo anterior resulta en una diferencia de 1670mm entre ambos valores extremos para el país. En el 67% del territorio nacional se pueden observar de 1200 a 1600mm anuales y en el 7% más de 1800mm y menos de 1000mm anuales en otro 7% de la superficie nacional. El promedio nacional es del orden de los 1280mm y la desviación estándar fue de 218mm.

**Horizonte cercano de cambio climático (2015-2039).** La clase de menos de 1000 mm anuales disminuye 7,369,072.07 has en promedio en relación al escenario base, lo cual representa una disminución del 97.68%. En un escenario RCP de 4.5 el modelo HADGEM pronostica una mayor disminución de dicha clase con 98.49%, mientras que el modelo CNRM es el más amigable con 94.49%. Dentro del RCP 8.5 el modelo GFDL reporta la mayor disminución con 99.06%, mientras que el modelo CNRM

sigue siendo el más bajo con una disminución en 94.86%. El rango de 1400 a 1600 mm resulta ser el más estable con un promedio de aumento de 10.05% en todos los escenarios, con una desviación estándar de 1.89%. La clase de más de 2000 mm de ETP reporta un aumento de 1,974,605.54 has en promedio, representando un aumento de 374.89% en comparación con el mismo rango del escenario base. En un escenario RCP de 4.5, el modelo GFDL pronostica el mayor aumento con 438.09%, mientras que el modelo CNRM pronostica el menor con 234.44%.

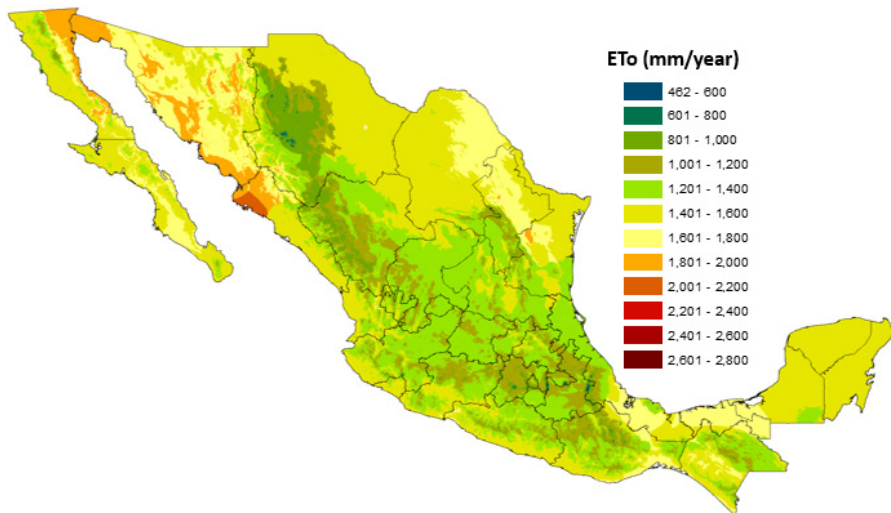


Figura 1: ET0 para condiciones de año base (cada 200mm)

**Horizonte medio de cambio climático (2040-2069).** En el horizonte medio la clase de menos de 1000 mm de ETP disminuye en 99.7% en promedio. Tanto para el RCP 4.5 como 8.5 el modelo GFDL reporta la mayor disminución, mientras que el CNRM pronostica la menor reducción. La clase que en el horizonte cercano permanecía relativamente estable con un aumento de 10.05% (de 1400 a 1600 mm), en este horizonte disminuye en un 13.77% aunque presenta una desviación estándar de 13.12% lo que implica una gran variación en los valores. El modelo GFDL reporta la mayor disminución en ambos RCP 4.5 y 8.5, con 22.03 y 31.26% respectivamente. El rango de más de 2000 mm aumenta en un 1039.33% en promedio, es decir, 665% más que el horizonte cercano. En una concentración RCP de 4.5, el modelo GFDL pronostica el mayor aumento con 1090.5% en relación al escenario base. No obstante, el modelo MPI proyecta sólo un 483.87% de cambio.

**Horizonte lejano de cambio climático (2070-2099).** El caso del horizonte lejano se caracteriza por presentar valores extremos aún más drásticos. En el caso del rango de menos de 1000 mm de ETP, prácticamente en todos los escenarios y modelos desaparece con un 99.83 % de disminución. El rango de 1400 a 1600 mm proyecta un 33.68 % de disminución en promedio, 20 % más que el horizonte medio y 43 % más que el horizonte cercano. Esto implica que la superficie que anteriormente proyectaba

una ETP más baja se estaría moviendo hacia rangos superiores de ETP. Por otro lado, el rango de más de 2000 mm aumenta drásticamente pues en promedio se proyecta un 2799.22 % más que el escenario base. En un RCP de 4.5, el modelo GFDL proyecta los mayores cambios con 1496.14 % a diferencia del MPI que arroja un 741.36 %. Finalmente, bajo un RCP 8.5 el modelo HADGEM pronostica el mayor incremento con 6211 %, mientras que el modelo CNRM pronostica sólo un 2026.81 % de cambio. No obstante, la desviación estándar de este rango resulta en 2017.44 %. La línea de tendencia del escenario base tiene un pico de superficie en el rango de 1400 a 1600 mm, mientras que el pico de superficie en el caso de los modelos de cambio climático se presenta en el rango de 1600 a 1800 mm. Además, el valor máximo de ETP base es de 2128.54 mm, mientras que el máximo en el peor escenario de cambio climático alcanza los 2559.66 mm, es decir, una diferencia de 431 mm de ETP. El valor mínimo en el escenario base fue de 461.5 mm, mientras que en el peor escenario de cambio climático apenas llega a los 947.45, es decir, reporta una diferencia de 485.95 mm. Esto denota un evidente “corrimiento” generalizado de la ETP en los diferentes escenarios de cambio climático, siendo claramente visible en la gráfica anterior.

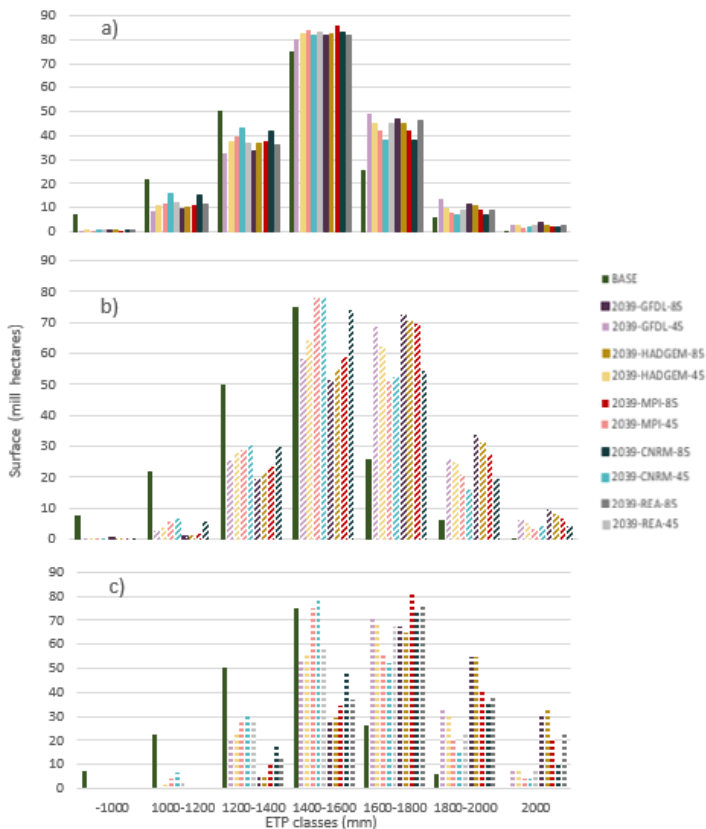


Figura 2: Superficie ocupada por rango de ETo para escenario en horizonte a) corto, b) medio y c) largo de cambio climático

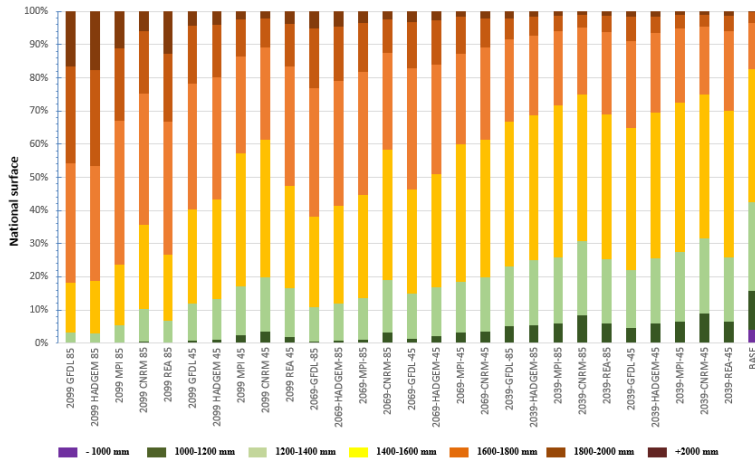


Figura 3: Superficie ocupada (%) de clases de ET<sub>0</sub>, actual y potencial con cambio climático (todos los escenarios futuros)

La tendencia general de ETP es a aumentar los valores extremos, así como la superficie que presenta rangos altos. El modelo HADGEM resultó arrojar valores más altos de ETP en los horizontes lejanos, mientras que para horizonte cercano y medio fue el modelo GFDL. El modelo CNRM resultó proyectar los valores más bajos dentro de los escenarios de cambio climático en cuanto a ETP respecta. El horizonte cercano presentó en promedio un 48.44 % de cambio, mientras que el medio un 176.5 % y el lejano un 447.11 %. Ello indica que a medida que varían los horizontes futuros, la ETP presenta incrementos acelerados.

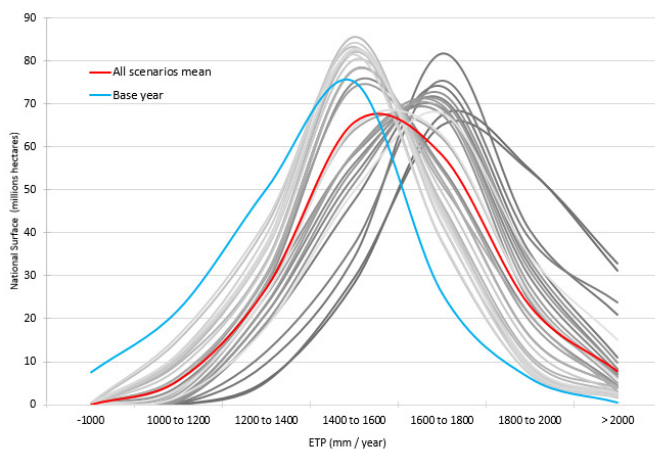


Figura 4. Escenarios de evapotranspiración comparados con el año base: horizonte corto (líneas grises claro), horizonte medio (líneas grises medio), horizonte lejano (líneas grises oscuro) y media de todos los escenarios de cambio climático (línea roja)

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo financiero del Centro de Investigación en Medio Ambiente y Recursos Naturales –CIRENAM–, al programa PROFONI y proyectos Estratégicos Institucionales, de la Universidad Autónoma Chapingo.

## REFERENCIAS

- Allen, C., Macalady, A., Chenchouni, H., Bachelet, D., McDowell, N., Vennetier, M., Kizberger, T., Rigling, A., Breshears, D., Hogg, E., Gonzalez, P., Fensham, R., Zhang, Z., Castro, J., Demidova, N., Lim, J., Allard, G., Running, S., Semerci, A., Cobb, N., 2010. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *For. Ecol. Manage.* 259, 660–684.
- Dunne, T., 1978. *Water in environmental planning*. W. H. Freeman and Co, New York, USA.
- FAO, 2007. *Cambio climático y seguridad alimentaria: un documento marco*. FAO, Roma, Italia.
- Fernandez, E.A., Zavala, H.J., Romero, C.R., 2009. *Atlas Climático Digital de México*. [WWW Document]. URL <http://uniatmos.atmosfera.unam.mx>
- Gómez-Díaz, J., Etchevers-Barra, J., Monterroso-Rivas, A., Gay-García, C., Campo-Alves, J., Martínez-Menes, M., 2008. Spatial estimation of mean temperature and precipitation in areas of scarce meteorological information. *Atmósfera* 21, 35–56.
- IMTA, 2002. *Extractor rápido de información meteorológica (ERIC)*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Morelos, México.
- Ojeda-Bustamante, W., Sifuentes-Ibarra, E., Íñiguez-Covarrubias, M., Montero-Martínez, M., 2011. Impacto del cambio climático en el desarrollo y requerimientos hídricos de los cultivos. *Agrociencia* 45, 1-11.
- Ortiz-Solorio, C., 1987. *Elementos de agrometeorología cuantitativa con aplicaciones en la República Mexicana*. Departamento de Suelos. Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México.