

Efectos del cambio climático sobre la evapotranspiración de referencia y su impacto en la producción de maíz

Alejandro Cruz-González¹
Ramón Arteaga-Ramírez¹
Ignacio Sánchez-Cohen^{2,§}
Héctor Flores-Magdaleno³
Jesús Soria-Ruiz⁴
Alejandro Ismael Monterroso-Rivas⁵

1 Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua-Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo, Estado de México. CP. 56230. Tel. 712 2474131. (alex-cg20@hotmail.com; rarteagar@taurus.chapingo.mx).

2 Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera-INIFAP. Margen derecha canal Sacramento km 6.5, Zona industrial Gómez Palacio, Durango. CP. 35140. Tel. 871 1590105.

3 Colegio de Postgraduados-Campus Montecillo. Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo, Texcoco, Estado de México. CP. 56264. (mhector@colpos.mx).

4 Laboratorio de Geomática-Sitio Experimental Metepec-INIFAP. Carretera Toluca-Zitácuaro, Zinacantepec, Estado de México. CP. 52176. (soria.jesus@inifap.gob.mx).

5 Departamento de Suelos-Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco km 36.5, Chapingo, Estado de México. CP. 56230. Tel. 595 9521633. (aimrivas@correo.chapingo.mx).

Autor para correspondencia: sanchez.ignacio@inifap.gob.mx.

Resumen

Se evaluó el efecto del cambio climático sobre la evapotranspiración de referencia (ET_0) en el Distrito de Desarrollo Rural Atlacomulco, la cual, es considerada una de las variables más importantes en la gestión de los recursos hídricos y la programación del riego agrícola. Los escenarios de cambio climático se proyectaron mediante el modelo de circulación general, HadGEM2-ES con dos trayectorias de concentración representativa 4.5 y 8.5, para dos horizontes de tiempo 2021-2040 y 2041-2060 mediante el software LARS-WG, posteriormente se determinó la ET_0 con el programa Ref-ET, para finalmente modelar la precipitación efectiva, la evapotranspiración del cultivo y el requerimiento de riego, para el cultivo de maíz con el software de la FAO CROPWAT. Los resultados muestran que durante el periodo base 1985-2020, la ET_0 oscila de 3.93 a 4.17 mm día⁻¹, con el RCP 4.5 se proyecta un incremento de hasta 2.6 y 4.1% mientras en el RCP 8.5, sea de 4.2 y 7.4% respectivamente para ambos horizontes, este incremento se ve reflejado sobre la precipitación efectiva, evapotranspiración del cultivo y requerimiento de riego hacia los cuatro escenarios, las zonas más vulnerables son el sureste y noroeste. Mediante las variables analizadas, se pudo identificar que la precipitación efectiva no es suficiente para satisfacer las demandas de evapotranspiración del cultivo en maíz, por lo que es necesario cubrir el requerimiento de riego con algún aporte hídrico. Con los datos obtenidos se pueden generar estrategias de adaptación y mitigación para mejorar la eficiencia del uso del agua en el Distrito de Desarrollo Rural Atlacomulco y proponer alternativas de manejo agrícola.

Palabras clave:

CROPWAT, evapotranspiración de cultivo, LARS-WG, precipitación efectiva, requerimiento de riego.

Introducción

Las actuales emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero aceleran las condiciones que contribuyen al cambio climático a nivel global (IPCC, 2019). El aumento de la temperatura del aire, la distribución irregular de las precipitaciones, la presencia de tormentas extremas, el aumento de la evapotranspiración y la fluctuación entre periodos secos, son algunos efectos visibles del fenómeno de cambio climático que contribuyen al balance hídrico cambiante, lo que puede afectar significativamente el ciclo del agua y los patrones ecohidrológicos (Zeng *et al.*, 2021).

En la agronomía se emplean los términos evapotranspiración de referencia (ET_0) y evapotranspiración del cultivo (ET_c), el primero representa la evapotranspiración de un cultivo hipotético de referencia (pasto), en crecimiento activo, adecuadamente regado y caracterizado por valores definidos de altura, resistencia superficial y albedo, que está, por lo tanto, asociado con la demanda evaporativa meteorológica, mientras que la ET_c se refiere a las necesidades reales de agua de los cultivos y el seguimiento operativo del equilibrio hídrico del suelo y las plantas, en el enfoque de la FAO-56, la evapotranspiración de los cultivos se estima mediante la combinación de una evapotranspiración de referencia (ET_0) y coeficientes del cultivo (K_c) que expresan tanto la transpiración de las plantas como la evaporación del suelo (Xiang *et al.*, 2020; Allen *et al.*, 1998).

Según el estudio de Monterroso-Rivas *et al.* (2021) identificaron que los cambios proyectados para las variables meteorológicas asociadas con el cambio climático, afecta en el comportamiento de la ET_0 , modificando los requerimientos de agua de los cultivos y pronunciando un periodo de sequía a largo plazo, por ello, una mejor comprensión y evaluación de las tendencias espacio-temporales de esta variable, es de gran importancia para el manejo de los cultivos y la planificación del recurso hídrico en el sector agrícola a escala regional y global.

Es probable que la ET_0 y en consecuencia, la ET_c así como el requerimiento de riego (RR) de un cultivo, se perciban severamente afectadas por el cambio climático dada su estrecha relación con la temperatura del aire y la precipitación, como resultado de esta variabilidad, la ET_0 presenta incrementos o decrementos, según sea la región global, por ello es fundamental comprender el cambio de tendencia de esta variable, para mejorar el crecimiento de los cultivos y la gestión del agua de riego, la variación de ET_0 es un paso crítico para comprender cómo el cambio climático afecta los procesos hidrológicos (Fan *et al.*, 2016).

En esta investigación, el objetivo fue modelar y analizar ET_0 y como consecuencia sus variables relacionadas: ET_c , PE y RR para el cultivo de maíz en el DDRA, ante escenarios de cambio climático, con el uso de los programas Long Ashton research station weather generator (LARS-WG), reference evapotranspiration-standardized calculations (Ref-ET) y crop water and irrigation requirements program of FAO (CROPWAT). Este distrito tan solo en el año 2020 aportó aproximadamente el 35.3% de la superficie cosechada con 122 088 ha y el 41.4% de la producción con 516 438 t de maíz en el Estado de México, siendo la zona agrícola más importante en cuanto a productividad de maíz a nivel estatal (SIAP, 2021).

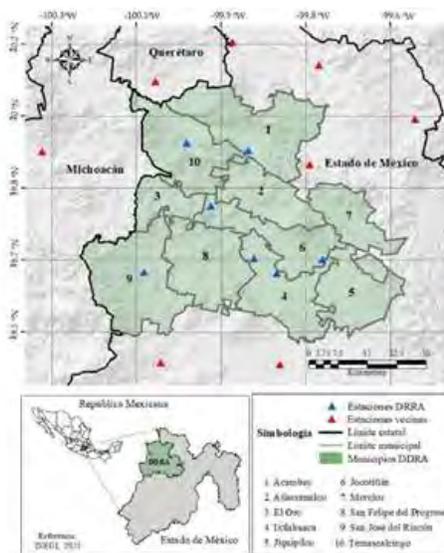
Materiales y métodos

Área de estudio

El DDRA se localiza en la provincia fisiográfica del Eje Neovolcánico, el cual, forma parte de la cuenca alta del Río Lerma, se ubica entre los paralelos 19° 25' y 20° 5' latitud norte, así como entre los 99° 30' y 100° 17' de longitud oeste (INAFED, 2018). El DDRA está conformado por 10 municipios; Acambay, Atlacomulco, El Oro, Ixtlahuaca, Jocotitlán, Jiquipilco, Morelos, San Felipe del Progreso, San José del Rincón y Temascalcingo (Figura 1), pertenecientes a la región norte del Estado de México (SIAP, 2021).



Figura 1. Ubicación espacial del DDRA y de las estaciones meteorológicas.



En el DDRA predomina un clima templado subhúmedo con lluvias en verano (CW), la temperatura media anual es de 13.4 °C, una temperatura promedio mínima de 5.1 °C y una máxima de 21.7 °C presentándose las más altas temperaturas durante abril y mayo, mientras que las temperaturas más bajas ocurren en los meses de diciembre y enero, la precipitación promedio anual es de 780 mm año⁻¹, siendo los meses de junio a septiembre en los que se presenta tan solo el 75% del total anual (Cruz-González *et al.*, 2023).

Datos de clima

Las variables meteorológicas de precipitación, temperatura máxima y mínima, así como radiación solar, se obtuvieron de 15 estaciones del sistema de datos meteorológicos ESSENGER, del Instituto Nacional de investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) (Rodríguez-Moreno, 2021), con un registro diario continuo de 36 años durante el periodo 1985-2020. Estas estaciones se localizan en las áreas de aprovechamiento y potencial productivo agrícola en el DDRA (Figura 1).

LARS-WG

LARS-WG 6.0, es un generador climático estocástico que se puede emplear para la creación de escenarios de cambio climático, este programa incorpora proyecciones de MCG del conjunto CMIP5 (Semenov y Stratonovitch, 2015). La calibración se realizó de acuerdo con el procedimiento que recomienda Semenov y Barrow. (2002).

Los datos meteorológicos observados de las estaciones del INIFAP (1985-2020), se utilizaron para generar dos trayectorias de concentración representativas: RCP 4.5 (emisiones moderadas) y RCP 8.5 (emisiones altas), para dos horizontes de tiempo: 2021-2040 y 2041-2060, seleccionando el MCG HadGEM2-ES (Hadley Center Global Environment Model), el cual, cuenta con una alta sensibilidad climática efectiva al incremento de CO₂, además de que este modelo, ha sido utilizado en los escenarios de cambio climático para México (INECC, 2022). Posteriormente estos escenarios de cambio climático fueron utilizados como datos de entrada en Ref-ET y CROPWAT.

Ref-ET

Se utilizó el software Ref-ET versión 4.1, el programa proporciona cálculos estandarizados de ET_0 para quince de los métodos y ecuaciones más comunes que se utilizan actualmente en los Estados Unidos de América y Europa. Los cálculos se basan en las mediciones de datos meteorológicos que introduce el usuario. Para esta investigación se empleó el método de Hargreaves-Samani, dadas las condiciones de la disponibilidad de datos meteorológicos históricos y proyectados a cambio climático, realizando el proceso metodológico recomendado por Allen (2016).

CROPWAT

Cropwat 8.0, es un programa informático de apoyo a la toma de decisiones en el sector agrícola, fue desarrollado por Smith (1992). Depende de una serie de ecuaciones para estimar la ET_0 , ET_c , PE y RR y la PR, utilizando como datos de entrada: datos de cultivo, suelo y clima, que respaldan el cálculo de los requerimientos hídricos para diferentes patrones de cultivo en condiciones de riego y temporal (Clarke *et al.*, 2001). Para estimar con precisión los requisitos del cultivo de Maíz en el DDRA, se calcularon los parámetros que describen a la ET_c , PE y el RR a partir de las metodologías propuestas por Smith (1992): Allen *et al.* (1998).

Datos de clima

Las variables climáticas diarias de ET_0 y precipitación total (PT), tanto las del periodo histórico como las proyectadas con escenarios de cambio climático, se agregaron a valores mensuales para ser utilizadas como datos de entrada en el modelo Cropwat.

Datos del cultivo

Los parámetros de cultivo se determinaron a partir de las fechas de siembra, desarrollo y cosecha de algunas variedades de maíz criollas e híbridas para valles altos, reportadas en el DDRA por Tadeo-Robledo *et al.* (2015), en el cual, se determinó un ciclo de 230 días con una fecha de siembra del 25 de abril y a cosecha del 10 de diciembre, la duración de la etapa inicial fue de 35 días ($K_c=0.3$), etapa de desarrollo 55 días ($K_c=1.2$), temporada media 90 días ($K_c=1.2$) y fin de temporada 50 días ($K_c=0.35$), los K_c utilizados en este estudio fueron los recomendados por Smith (1992); Allen *et al.* (1998).

Evapotranspiración del cultivo (ET_c)

La ET_c del cultivo de maíz, se calculó a partir de la ecuación 1: $ET_c = K_c \times ET_0$ (1). Donde: ET_c = evapotranspiración del cultivo en $mm\ día^{-1}$; K_c = coeficiente de cultivo (adimensional); ET_0 = evapotranspiración del cultivo de referencia en $mm\ día^{-1}$

Precipitación efectiva (PE)

Se utilizó el método del servicio de conservación de suelos del USDA, para calcular la PE anual utilizando el siguiente criterio: cuando la precipitación total (PT) es $> 250\ mm\ año^{-1}$, PE se obtiene mediante la ecuación $PE = 125 + 0.1 \times (PT - 250)$ (2). Donde: PE= precipitación efectiva ($mm\ año^{-1}$); PT= precipitación total ($mm\ año^{-1}$).

Requerimiento de riego

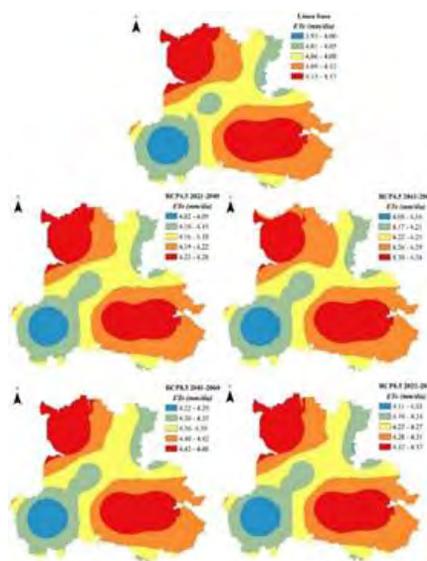
A partir de la ET_c calculada para el cultivo de maíz y los valores de PE, el RR se calculó mediante la ecuación $RR = ET_c - PE$ (3). Donde: RR= requerimiento de riego ($mm\ año^{-1}$); ET_c = evapotranspiración del cultivo ($mm\ año^{-1}$); PE= precipitación efectiva ($mm\ año^{-1}$). La distribución espacial de las variables ET_0 , PE, RR y ET_c , se realizaron con el método de la distancia inversa ponderada (IDW) con el software ArcGIS 10.8.

Resultados y discusión

Cambios potenciales en la ET_0

El resultado presentado en la Figura 2 indica que los valores de ET_0 en la línea base son menores a los cuatro escenarios proyectados en el futuro, el patrón de intensidad se localiza en las zonas sureste y noroeste del DDRA, las zonas contrarias a éstas son las que presentan los valores más bajos de ET_0 . La tendencia de la ET_0 en el primer período RCP 4.5 2020-2041 es similar a la escala de tiempo base. Sin embargo, existe una diferencia considerable con respecto al RCP 4.5 2041-2060 y RCP 8.5 2021-2040, el mayor aumento proyectado es hacia el RCP 8.5 horizonte 2041-2060. Zeng et al. (2021) identificaron que los incrementos de ET_0 , se proyectan en menor escala hacia el RCP 4.5 y en mayor escala hacia el RCP 8.5, debido al mayor forzamiento radiactivo climático impulsado por el incremento de gases de efecto invernadero en ese escenario.

Figura 2. Distribución espacial diaria de la ET_0 diaria promedio en el DDRA.



En escala mensual, la ET_0 presenta un comportamiento similar en todas las estaciones analizadas, durante los meses de marzo, abril, mayo y junio se presentan los valores más altos, alcanzando de 5 a 6 mm día^{-1} , mientras que la menor ET_0 , ocurre durante los meses de noviembre, diciembre y enero con valores cercanos a los 3 mm día^{-1} . En México Monterroso-Rivas y Gómez-Díaz (2021) identificaron un incremento general de la ET_0 como resultado del cambio climático, proyectan un incremento en la temperatura del aire y una disminución sobre la humedad relativa, este aumento de ET_0 podría limitar la productividad en algunas regiones del país.

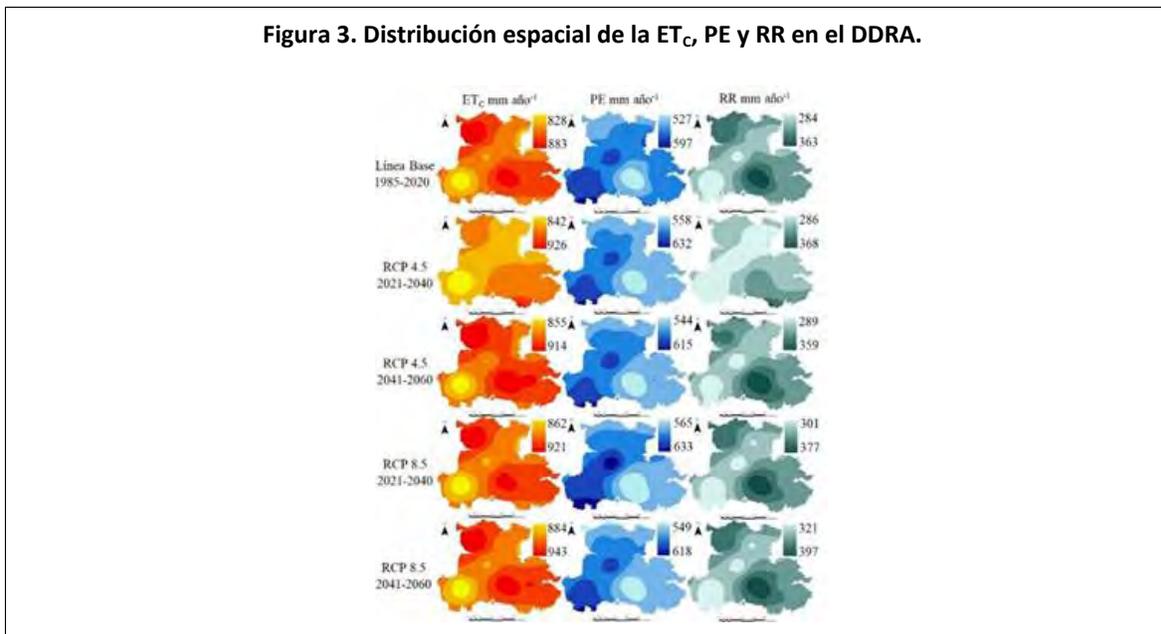
Esta situación ejerce un impacto significativo en el crecimiento y el rendimiento de las plantas de cultivo, el cambio climático presenta una influencia potencial en las demandas de agua de los cultivos (Fan et al., 2016). Ben-Hamouda et al. (2021) en la región italiana de Emilia-Romaña, proyectaron con escenarios de cambio climático de los MCG; RCA4, RACMO22E y Copernicus CDS, la variable ET_0 media anual, en la región se presentan 735 mm año^{-1} en el período de referencia 1981-2005 y se prevé que alcance valores que oscilen entre 764 mm año^{-1} para el RCP 4.5 y 772 mm año^{-1} para RCP8.5 hacia el horizonte 2021-2050.

Evapotranspiración del cultivo

La línea base presenta un acumulado durante el ciclo agrícola (25 abril a 10 diciembre) de 828-883 mm año^{-1} , con una mayor incidencia hacia el noreste y sureste del distrito, donde se focalizan bien las zonas con mayor ETC, mientras que para los cuatro escenarios la tendencia futura es hacia un incremento, el cual, se percibe con un mayor pronunciamiento en el RCP 8.5 2041-2060, llegando a alcanzar de 884-943 mm año^{-1} .

El escenario con el menor cambio es el RCP 4.5 2021-2040, en el que se presentan valores que oscilan de 842-926 mm año⁻¹ para la mayor superficie del DDRA (Figura 3). La ET_c proyecta un incremento de 1.9% en el escenario RCP 4.5, 21-40 hasta alcanzar un 6.4%. hacia el RCP 8.5, 41-60.

Figura 3. Distribución espacial de la ET_c, PE y RR en el DDRA.



En comparación con este estudio, Şen (2023) documentó un aumento más severo en la ETC de maíz para la Provincia de Adana, Turquía, en la cual determinó un promedio de 615.5 mm año⁻¹ para el periodo 1971-2000, reportó que bajo el escenario RCP 4.5, la ETC aumentó un 9.2% para 2025-2054 y 11.7% para 2069-2098, en el RCP 8.5, los valores de la ETC mostraron un aumento sustancial del 20% para 2069-2098, en comparación con el período histórico. Mientras que Gabr (2023), reportó en un estudio para Egipto, que la ETC para maíz aumentará en 5.1% y 5.9% según el RCP 4.5 2023-2080 y 2081-2100, respectivamente, en tanto que, para el RCP 8.5 2023-2080 y 2081-2100, incrementará en un 7.7% y 9.7%, correspondientemente, en comparación con la ETC histórica calculada para el periodo de 1990-2022, la cual corresponde a 1 060 mm año⁻¹. Estas investigaciones, permitieron dimensionar los incrementos de la ETC a nivel global a causa del cambio climático.

Precipitación efectiva

La Figura 3 muestra los resultados de la PE, en la línea base durante el ciclo agrícola, se presenta una PE mínima de 527 y máxima de 597 mm año⁻¹, distribuidos heterogéneamente en el DDRA, los valores más bajos se encuentran en la parte sur, mientras que los mayores se localizan en la zona sureste.

Para las proyecciones de cambio climático, se mantiene un comportamiento muy similar en la distribución espacial de PE, identificando incrementos en todos los escenarios con respecto a la línea base, en el RCP 4.5 horizontes 2021-2040 y 2041-2060 donde se identificó un incremento de 558-633 y 544-615 mm año⁻¹, mientras que para el RCP 8.5 hacia los horizontes 2021-2040 y 2041-2060, la PE alcanza los 565-633 y 549-618 mm año⁻¹ respectivamente. Se observa que los mayores incrementos ocurran en ambos horizontes del escenario RCP 4.5. Para la PE se identifica un incremento en el RCP 4.5 de 5.1% y 6.3% respectivamente en ambos horizontes y hacia el RCP 8.5 se proyecta un incremento menor con 2.7% y 3.3%.

Los resultados de Ruiz et al. (2011), reportaron que para los Valles Altos en México (2 200 a 2 600 msnm) como el DDRA, se proyectará una disminución de la precipitación a causa del cambio climático; -4.1% (2011-2020), -3.3% (2031-2040) y -0.4% (2051-2060) con el escenario de emisiones más bajo. A pesar de estos cambios, se menciona que la precipitación seguiría siendo suficiente para cubrir la demanda de agua en el cultivo de maíz, este estudio discrepa de estos escenarios; sin embargo, la incertidumbre fue mayor en sus tendencias de precipitación probablemente debido a la escala proyectada y el tipo de MCG empleado. A nivel mundial se han documentado casos en donde la PE incrementa con respecto al periodo base, como en Roba et al. (2021), donde el periodo base (1984-2013) registra una PE de 813 mm año⁻¹, bajo el forzamiento del escenario RCP 4.5, mientras que para los periodos 2014-2043 y 2044-2073 se estima una PE de 844 mm año⁻¹ y 828 mm año⁻¹, respectivamente.

Requerimiento de riego

De las cuatro trayectorias de cambio climático en este estudio, tres presentan un aumento en los requerimientos de riego con respecto a la línea base, a excepción del RCP 4.5 2041-2060 como se observó en la Figura 3, en la cual, se identificó un rango de 284-363 mm año⁻¹ ubicándose los menores requerimientos de riego en la zona central del distrito, mientras que los mayores RR se ubican en la zona sureste, esta condición prevalece para los cuatro escenarios.

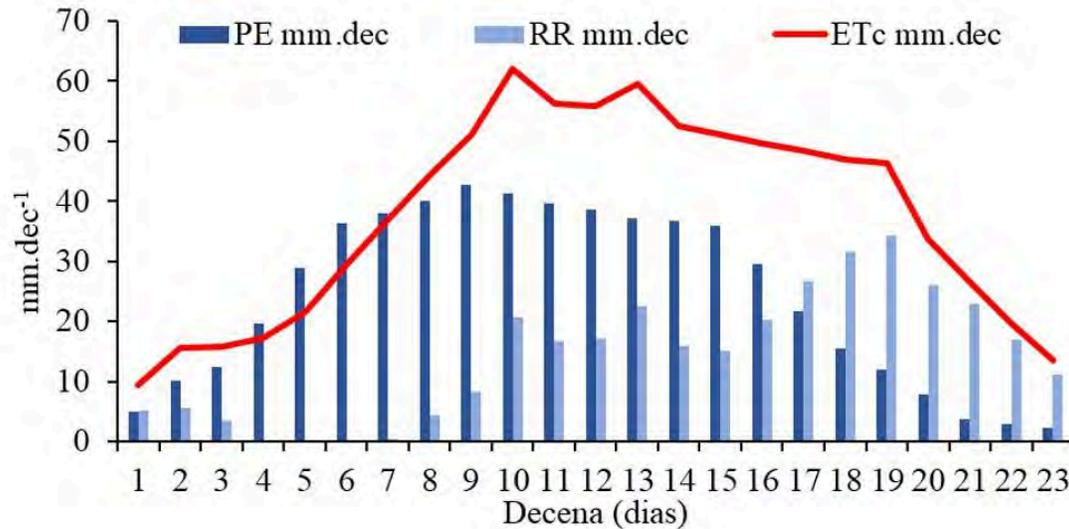
Para la proyección en el RCP 8.5 horizonte 2041-2060, se proyecta un rango de 321-397 mm año⁻¹ siendo éste, el escenario con mayor aumento en la demanda de riego, mientras que el menor incremento de RR fue para el RCP 4.5 horizonte 2041-2060, se prevé pueda alcanzar de los 289-359 mm año⁻¹. #en (2023) reportó el RR para el periodo 1971-2000, el cual fue de 459.2 mm año⁻¹, mientras que para el RCP 4.5 2025-2054 el RR calculado fue de 546.5 mm año⁻¹, en tanto que, para el periodo 2069-2098 fue de 558.8 mm año⁻¹, en el escenario RCP 8.5, los valores de RR para los periodos 2025-2054 y 2069-2098 se determinaron en 558.4 mm año⁻¹ y 618.9 mm año⁻¹, respectivamente.

Relación entre precipitación efectiva, requerimiento de riego y evapotranspiración de cultivo

El resultado que muestra Cropwat, permite identificar el comportamiento temporal y la estrecha relación de la ET_c, PE y RR con respecto a los requerimientos hídricos del cultivo de maíz en el ciclo agrícola. En la Figura 4, se observó el promedio de las estaciones analizadas en el DDRA, el resultado se muestra para cada decena (10 días). Al analizar la línea base se observa que la ET_c se incrementa en el tiempo, alcanzando los máximos valores durante la etapa media y decrece conforme a la etapa tardía, logro hasta 60 mm dec⁻¹ en las decenas número 10 y 13.



Figura 4 Relación promedio entre PE, RR y ET_c para maíz en el DDRA, en escala de tiempo de decena (cada 10 días). A: línea base (1985-2020).



Se pudo identificar que la PE alcanzó su máximo nivel en la decena 9, la cual corresponde al inicio de la etapa media y comienza a decrecer hasta el final del ciclo, también se observa que a partir de la decena 7 la PE deja de cubrir las necesidades de ET_c hasta la decena 23 en donde se concluye el ciclo agrícola, es durante este periodo en el cual, se presentó un incremento en la cantidad de RR para todas las decenas. Las proyecciones de cambio climático RCP 4.5 y 8.5 para ambos horizontes de tiempo, muestran una condición muy similar a la línea base para cada variable.

Conclusiones

Utilizando proyecciones climáticas del MCG HadGem-2, en este estudio se indicó un incremento sobre la ET_0 con respecto a la línea base (1985-2020), la cual se presentó en una escala de 3.9 a 4.2 $mm\ día^{-1}$; el escenario con menor impacto es RCP 4.5 con un rango de 4 a 4.3 $mm\ día^{-1}$, mientras el escenario de mayor incremento es para el RCP 8.5 con un rango de 4.1 a 4.5 $mm\ día^{-1}$. Como consecuencia de los incrementos de la ET_0 , se esperan incrementos importantes sobre las variables relacionadas; ET_c y RR.

La ET_c para maíz en el DDRA, no se alcanzó a satisfacer en su totalidad por la PE, por ello, es necesario proporcionar una cantidad de agua mediante algún sistema de riego, para poder cubrir el déficit hídrico de la planta. Sin embargo, es notable la necesidad del RR en el ciclo agrícola, durante las etapas críticas de floración, jiloteo y llenado de grano, que coinciden con el mayor déficit hídrico, lo que impacta potencialmente en el rendimiento del cultivo. Con la metodología planteada en esta investigación, se permitió identificar los cambios potenciales futuros sobre la ET_0 y las variables relacionadas, con lo cual, es posible realizar estrategias de gestión, mitigación y adaptación ante los impactos del cambio climático en el sector agrícola.

Bibliografía

- Allen, R. G. 2016. Ref-ET user's guide. Reference Evapotranspiration Calculation Software for FAO and ASCE Standardized Equations; version 4.1 for Windows. University of Idaho, Kimberly Research and Extension Center ID, USA. <https://www.uidaho.edu/cals/kimberly-research-and-extension-center/research/water-resources/crops>.

- 2 Allen, R. G.; Pereira, L. S.; Raes, D. and Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Irrigation and drainage paper No 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome, Italy. 50 p.
- 3 Ben-Hamouda, G.; Tomozeiu, R.; Pavan, V.; Antolini, G.; Snyder, R. L. and Ventura, F. 2021. Impacts of climate change and rising atmospheric CO₂ on future projected reference evapotranspiration in Emilia-Romagna (Italy). *Theor. Appl. Climatol.* 146(1):801-820. 10.1007/s00704-021-03745-3.
- 4 Clarke, D.; Smith, M. and El-Askari, K. 2001. CropWat para Windows: guía del usuario IHE. University of Southampton. 80 p.
- 5 Cruz-González, A.; Arteaga-Ramírez, R.; Sánchez-Cohen, I.; Soria-Ruiz, J.; Monterroso-Rivas, A. I. and Flores-Magdaleno, H. (2023). Tendencia y variabilidad climática: efecto en la producción de maíz en el Distrito de Desarrollo Rural Atlacomulco. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*. 10(III):e3868. <https://doi.org/10.19136/era.a10nIII.3868>.
- 6 Fan, J.; Wu, L.; Zhang, F.; Xiang, Y. and Zheng, J. 2016. Climate change effects on reference crop evapotranspiration across different climatic zones of China during 1956-2015. *Journal of Hydrology*. 542(1):923-937. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.09.060>.
- 7 INAFED. 2018. Instituto Nacional para el Federalismo. Enciclopedia de los Municipios y Delegaciones de México. <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM15mexico/municipios/15048a.html>.
- 8 IPCC. 2019. Grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático. calentamiento global de 1.5 °C. <https://www.riob.org/es/documentos/calentamiento-global-de-15-degc>.
- 9 Monterroso-Rivas, A. I. y Gómez-Díaz, J. D. 2021. Impacto del cambio climático en la evapotranspiración potencial y periodo de crecimiento en México. *Terra Latinoamericana*. 39(1):e774. 10.28940/terra.v39i0.774.
- 10 Roba, N. T.; Kassa, A. K. and Geleta, D. Y. 2021. Modeling climate change impacts on crop water demand, middle Awash River basin, case study of Berehet woreda. *Water Practice and Technology*. 16(3):864-885. 10.2166/wpt.2021.033.
- 11 Rodríguez-Moreno, V. M. 2021. Essenger. Sistema de base de datos meteorológicos. In: X Congreso Nacional sobre conservación y utilización de los recursos zoogenéticos y XXII simposio Iberoamericano y X Congreso Nacional CONBIAND. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP). Puebla de Zaragoza, México. RPDA INIFAP-03-2021-120109052200-01.
- 12 Ruiz, C. J.; Medina, G. G.; González, E. D.; Ramírez, D. J.; Flores, L. H.; Manríquez, O. J.; Zarazúa, V. P.; Díaz, P. G.; Ramírez O. G. and Mora, O. C. 2011. Cambio climático y sus implicaciones en cinco zonas productoras de maíz en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 2(1):309-323. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=263121431011>.
- 13 Semenov, M. A. and Barrow, E. M. 2002. LARS-WG: a stochastic weather generator for use in climate impact studies; Rothamsted research. Hertfordshire, UK. 29 p.
- 14 Semenov, M. A. and Stratonovitch, P. 2015. Adapting wheat ideotypes for climate change: Accounting for uncertainties in CMIP5 climate projections. *Climate Research*. 65(1):123-139. 10.3354/cr01297.
- 15 Şenen, B. 2023. Determining the changing irrigation demands of maize production in the cukurova plain under climate change scenarios with the CROPWAT Model. *Water (Switzerland)*. 15(24):1-17. 10.3390/w15244215.
- 16 SIAP. 2021. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Avance de siembras y cosechas resumen por estado. <http://infosiap.siap.gob.mx:8080/agricola-siap-gobmx/ResumenProducto.do>.
- 17 Smith, M. 1992. Cropwat: un programa informático para la planificación y gestión del riego Organización de Alimentos y Agricultura. FAO, Roma. 125. ISBN 92-5-103106-1.

- 18 Tadeo-Robledo, M.; Zamudio-González, B.; Espinosa-Calderón, A.; Turrent-Fernández, A.; Cárdenas-Marcelo, A. L.; López-López, C.; Arteaga-Escamilla, I. y Valdivia-Bernal, R. 2015. Rendimiento de maíces nativos e híbridos en diferente fecha de siembra y sus unidades calor. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 6(1):33-43. <https://doi.org/10.29312/remexca.v6i1.737>.
- 19 Xiang, K.; Li, Y.; Horton, R. and Feng, H. 2020. Similarity and difference of potential evapotranspiration and reference crop evapotranspiration a review. *Agricultural Water Management*. 232(1):106043. 10.1016/j.agwat.2020.106043.
- 20 Zeng, P.; Sun, F.; Liu, Y.; Feng, H.; Zhang, R. and Che, Y. 2021. Changes of potential evapotranspiration and its sensitivity across China under future climate scenarios. *Atmospheric Research*. 261(1):105763-105757. 10.1016/j.atmosres.2021.105763.





Efectos del cambio climático sobre la evapotranspiración de referencia y su impacto en la producción de maíz

Journal Information
Journal ID (publisher-id): remexca
Title: Revista mexicana de ciencias agrícolas
Abbreviated Title: Rev. Mex. Cienc. Agríc
ISSN (print): 2007-0934
Publisher: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias

Article/Issue Information
Date received: 01 February 2025
Date accepted: 01 April 2025
Publication date: 11 May 2025
Publication date: Apr-May 2025
Volume: 16
Issue: 3
Electronic Location Identifier: e3379
DOI: 10.29312/remexca.v16i3.3379

Categories

Subject: Artículo

Palabras clave:

Palabras clave:

CROPWAT

evapotranspiración de cultivo

LARS-WG

precipitación efectiva

requerimiento de riego

Counts

Figures: 4

Tables: 0

Equations: 0

References: 20

Pages: 0