

Requerimiento Hídrico, Coeficiente de Cultivo y Productividad de Pasto Híbrido Convert 330 (*Brachiaria sp*) en un Clima Semiárido Cálido de México Water Requirement, Crop Coefficient and Productivity of Convert 330 Hybrid Grass (*Brachiaria sp*) in a Warm Semiarid Climate of Mexico

Jesús Enrique López-Avendaño¹ , Hugo de Jesús López-Inzunza¹ ,
Martín Abraham Tirado-Ramírez¹ , Mitzi Dayanira Estrada-Acosta¹ y
José Ángel Martínez-Gallardo¹

¹ Universidad Autónoma de Sinaloa, Facultad de Agronomía. Carretera Culiacán-El Dorado km 17.5. 80398 Culiacán, Sinaloa, México; (J.E.L.A.), (H.J.L.I.), (M.A.T.R.), (M.D.E.A.), (J.A.M.G.).

† Autor para correspondencia: jmartinez@uas.edu.mx

RESUMEN

La región central del estado de Sinaloa en el noroeste mexicano, se caracteriza por un clima semiárido cálido donde la precipitación es insuficiente para el desarrollo adecuado de algunas especies vegetales introducidas, como las correspondientes al género *Brachiaria*, a pesar del avance tecnológico en el desarrollo de sensores, es escaso el acceso de los productores a suficiente información meteorológica; el objetivo del presente trabajo consistió en determinar el requerimiento hídrico, coeficiente de cultivo y productividad del pasto híbrido Convert 330 (*Brachiaria sp*) en un clima semiárido cálido de México, utilizando el método FAO56 con datos medidos y datos limitados; se utilizó una estación meteorológica para medir los parámetros climáticos, y se aplicó el método FAO56 con kc dual para estimar la evapotranspiración de cultivo bajo condiciones no estándar, y posteriormente, la productividad del agua. El consumo de agua estimado para el pasto Convert 330 en clima semiárido cálido del noroeste de México fue de 1849 mm con datos medidos y 1973.5 mm con datos limitados; el análisis estadístico arrojó un coeficiente de determinación (R^2) de 0.92, coeficiente de concordancia de Willmott (d) de 0.90, RMSE de 0.694 mm d⁻¹, BIAS=0.380 mm d⁻¹ y un coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (EF) de 0.98. Los valores de kc obtenidos fueron de 0.49, 1.11 y 1.04 para las etapas inicial, media y final, respectivamente; la productividad del agua (EUA) fue de 2.666 kg m⁻³ para forraje verde y 0.726 kg m⁻³ para materia seca; asimismo, se requirieron 375.1 y 1378 L kg⁻¹ para la producción de forraje verde y materia seca, respectivamente. Finalmente, se concluye que, aunque la estimación de la ETc con datos limitados sobrestimó en un 6.7% la ETc con datos medidos, la estadística muestra que es confiable el procedimiento.

Palabras clave: evapotranspiración, método Fao56, valle de Culiacán.

SUMMARY

The middle area of the state of Sinaloa in Northwestern Mexico is characterized by a warm semi-arid climate where rainfall is insufficient for the adequate development of some introduced plant species. For example, those that correspond to the genus *Brachiaria*, despite technological advances in sensor development, the producers have limited access to sufficient meteorological information. Therefore, the aim in the present study is to determine water requirement, crop coefficient, and productivity of Convert 300 hybrid grass (*Brachiaria sp*) in a warm semiarid climate of Mexico by using the Food and Agriculture Organization (FAO56 Penman-Montiel equation)



Cita recomendada:

López-Avendaño, J. E., López-Inzunza, H. J., Tirado-Ramírez, M. A., Estrada-Acosta, M. D., & Martínez-Gallardo, J. A. (2024). Requerimiento Hídrico, Coeficiente de Cultivo y Productividad de Pasto Híbrido Convert 330 (*Brachiaria sp*) en un Clima Semiárido Cálido de México. *Terra Latinoamericana*, 42, 1-15. e1797. <https://doi.org/10.28940/terra.v42i0.1797>

Recibido: 15 de agosto de 2023.
Aceptado: 16 de febrero de 2024.
Artículo. Volumen 42.
Abril de 2024.

Editor de Sección:
Dr. Juan Pedro Flores Margez

Editor Técnico:
Dr. David Cristóbal Acevedo



Copyright: © 2024 by the authors.
Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC ND) License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

method with complete and limited data; a meteorological station was used to measure climatic parameters, and the FAO56 method with dual kc was applied to estimate crop evapotranspiration under non-standard conditions, and subsequently, water productivity. The estimated water consumption for the Convert 330 hybrid in the warm semiarid climate of northwest Mexico was 1849 mm with measured data and 1973.5 mm with limited data. The statistical analyses yielded a coefficient of determination (R^2) of 0.92, Willmott's coefficient of agreement (d) of 0.90, RMSE of 0.694 mm d⁻¹, BIAS of 0.380 mm d⁻¹ and a Nash-Sutcliffe coefficient of efficiency (EF) of 0.98. The kc values were 0.49, 1.11 and 1.04 for initial, middle and end of season, respectively; the water productivity (WUE) was 2.666 kg m⁻³ for green forage, and 0.726 kg m⁻³, for dry matter, in the same way, 375.1 and 1378 L kg⁻¹ were required to produce green forage and dry matter, respectively. To conclude, although the ETc estimation with limited data overestimated the ETc with measured data by 6.7%, statistics showed that the procedure is reliable.

Index words: *evapotranspiration, Fao56 method, Culiacan valley.*

INTRODUCCIÓN

En México, la ganadería extensiva se practica en la mayor parte del país y en todo tipo de ecosistemas, tanto tropicales y subtropicales como corresponde a los estados de Veracruz, Chiapas, Oaxaca y Tabasco, así como, en ecosistemas áridos y semiáridos como en Sinaloa, Sonora, Tamaulipas y Chihuahua (SIAP, 2021); los sistemas extensivos de producción de bovinos basan su alimentación en el pastoreo de gramíneas tanto nativas como introducidas o bien, pasturas de gramíneas introducidas-naturalizadas; el pastoreo es la manera más práctica y económica para la alimentación de bovinos, garantizando bajos costos de producción, sin embargo, existe la necesidad de intensificar los sistemas de producción de forrajes optimizando los factores relevantes de gestión; uno de los factores que determinan los índices zootécnicos bajos, es la estacionalidad de la producción de forrajes en los períodos más secos (Dantas, Faria, Santos, Dalri y Palaretti, 2016).

Entre las especies forrajeras de mayor importancia en México, figuran las del género *Brachiaria*, que cubren el 6.5% aproximadamente de la superficie total de pasturas sembradas en la región tropical; entre las especies de este género destacan *Brachiaria brizantha* (Merlo-Maydana, Ramírez, Ayala y Ku, 2017) y *Brachiaria ruziziensis* (Poblete-Vargas, Valadez, García, Martínez y Peralta, 2018). Por otro lado, de acuerdo con Merlo *et al.* (2017), entre los factores que influyen decisivamente en la productividad de una especie forrajera, particularmente en gramíneas forrajeras de pastoreo, además de la edad del pasto, es la variación climática, particularmente la distribución de la precipitación y cambios de temperatura a lo largo del año.

Asimismo, Dantas *et al.* (2016) señalan que, entre las posibilidades para mejorar el manejo de los pastos, el riego representa una tecnología que proporciona incrementos y estabilidad de la productividad, ya que puede suplir la demanda de agua durante la estación seca del año y complementar la cantidad hídrica necesaria durante la falta en la temporada de lluvias; el alto costo de la técnica de riego, la escasez de agua y la falta de información sobre las necesidades hídricas de los pastos *Brachiaria* en la región semiárida, son las limitaciones más importantes para la implementación de esta técnica en el manejo de pastos; la falta de criterios técnicos para el riego de los pastos conlleva a la aplicación excesiva de agua en el riego, lo que podría causar daños al medio ambiente, alto costo de energía eléctrica, lixiviación de nutrientes, compactación del suelo, disminución de la productividad y vida útil del pastizal.

La escasa precipitación y la baja captación de agua en las presas de Sinaloa en los últimos años (2019-2021) donde la captación promedio ha sido del 54.4% de su capacidad total (SINA, 2022), ha obligado a tomar medidas de austeridad en la distribución del agua para uso agrícola, es por ello que el conocimiento de la demanda real de agua y la evapotranspiración de los cultivos son consideraciones importantes que se deben tomar en cuenta para mejorar la eficiencia del uso de agua en la agricultura. El método empírico de Evapotranspiración de referencia (ET_0) de Penman-Monteith del boletín de la FAO56, es un método universalmente estandarizado y aceptado por su precisión que se basa en datos meteorológicos, y se ha utilizado en numerosos sitios donde la información requerida se encuentra disponible; este método requiere la medición de variables como la temperatura del aire, humedad relativa, velocidad del viento, presión barométrica y radiación solar; sin embargo, esta cantidad de datos que se necesitan es la principal restricción del método FAO56. Para superar esta dificultad, la metodología FAO56 incluye procedimientos para estimar los datos meteorológicos faltantes a partir de otros datos comúnmente medidos como la temperatura máxima y mínima (Valle Júnior *et al.*, 2021).

El pasto híbrido Convert 330 (híbrido *Brachiaria*) es una gramínea generada a partir de dos especies del mismo género, *Brachiaria ruziziensis* y *Brachiaria brizantha*; ambas especies son de origen africano, y en cuanto a requerimientos de agua, se sabe que se adaptan perfectamente a zonas de clima tropical y subtropical con precipitación promedio anual superior a 1000 mm (Gaspari, Menezes, Gomes, Azevedo y Borges, 2015; Merlo *et al.*, 2017), por lo que, el pasto híbrido Convert 330 fue desarrollado para esas mismas condiciones climáticas. De esta manera, considerando que, Sinaloa y particularmente, la zona del valle de Culiacán se localiza en una región semiárida del noroeste mexicano con precipitación promedio anual de 705 mm, inferior a los requerimientos de precipitación anual registrados para este pasto, así como la falta de información sobre las necesidades hídricas del híbrido convert 330 (*Brachiaria sp.*), y los coeficientes de cultivo necesarios para la aplicación de métodos económicos como FAO56 para determinar el consumo de agua, se estableció como objetivo de este trabajo, determinar el requerimiento de agua, coeficientes de cultivo y productividad del pasto híbrido Convert 300 (*Brachiaria sp.*) para las condiciones de clima semiárido cálido en el noroeste de México, utilizando datos medidos y datos limitados.

MATERIALES Y MÉTODOS

La zona de estudio se localizó en el valle de Culiacán al noroeste de México, con coordenadas $24^{\circ} 53.25' N$ y $107^{\circ} 29.42' O$ (Figura 1), que se caracteriza por presentar un clima BSh semiárido cálido (clasificación de Köppen) con temperatura promedio mensual que varía desde $19.2^{\circ} C$ hasta $30^{\circ} C$, llegando a presentar una temperatura máxima de $43^{\circ} C$ en julio y mínima de $0.6^{\circ} C$ en febrero; la precipitación promedio anual es de 705 mm con una temporada de lluvias comprendida desde julio a septiembre donde se concentra el 75% de la precipitación anual, y la temporada más seca es de febrero a mayo con una precipitación concentrada del 3%. La textura del suelo es arcillosa con un 48% de arcilla, 34% de arena y 18% de limo, el contenido de humedad a capacidad de campo es de $0.513\text{ cm}^3\text{ cm}^{-3}$ y a punto de marchitez permanente de $0.287\text{ cm}^3\text{ cm}^{-3}$. El período de estudio considerado para este trabajo fue del 01 de noviembre de 2019 al 31 de octubre del 2020.

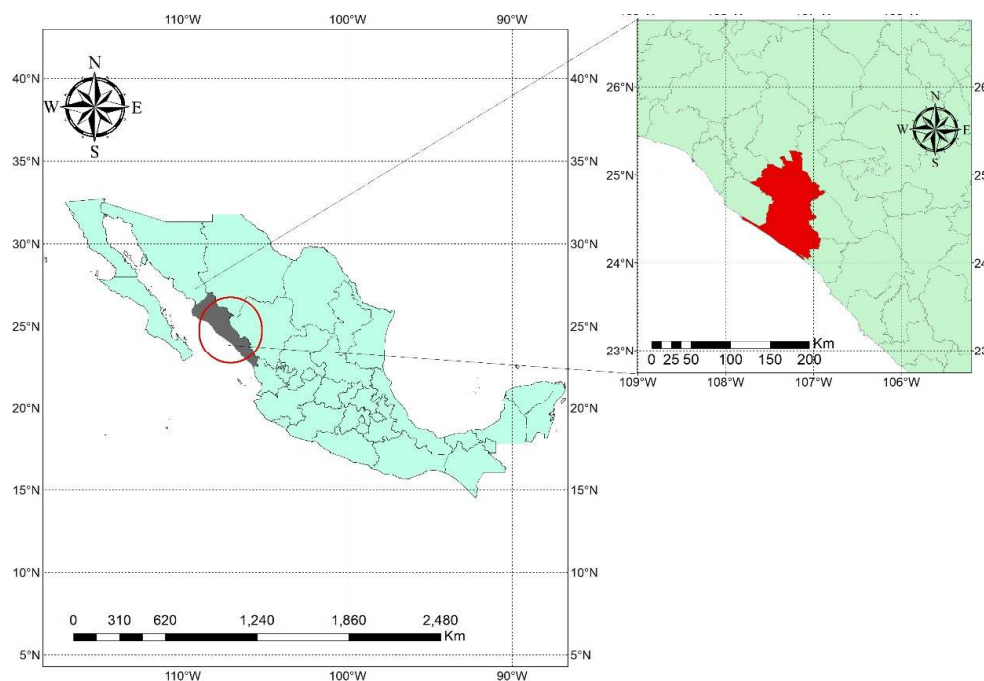


Figura 1. Localización de la zona de estudio, el sitio corresponde a las coordenadas geográficas $24^{\circ} 53.25' N$ y $107^{\circ} 29.42' O$.

Figure 1. Location of the study zone, the site corresponds to the geographic coordinates $24^{\circ} 53.25' N$ y $107^{\circ} 29.42' W$.

Información Meteorológica

Para la obtención de los datos climatológicos de la zona de estudio, se utilizó una torre meteorológica, la cual contenía los diferentes sensores instalados para medir temperatura del aire, humedad relativa, velocidad del viento, presión barométrica, radiación solar neta y precipitación; las lecturas meteorológicas se registraron cada 10 minutos durante las 24 horas del día, y para el cálculo se obtuvieron los promedios cada 30 min. Considerando que la evapotranspiración ocurre durante el día, mientras existe la presencia de radiación solar, se hizo una depuración de datos para calcular posteriormente los promedios, máximos y mínimos diarios, y finalmente la evapotranspiración de referencia diaria.

Manejo del Cultivo

El trabajo se realizó en una superficie de 12 ha de pradera con zacate híbrido Convert 330 (*Brachiaria* sp) sometida a pastoreo rotativo; para el manejo del cultivo no se hizo ninguna recomendación al productor, sólo se le dio seguimiento, tomando en consideración las prácticas culturales aplicadas. La pradera estaba sembrada en surcos a 80 cm de separación entre surcos y 30 cm de separación entre plantas. Durante el período de estudio se realizaron 6 pastoreos con períodos de rotación de 48, 61, 60, 53, 64 y 64 días. Se aplicaron 6 riegos, uno después de cada pastoreo; el riego se aplicó mediante el método de surcos y se utilizó tubería de pvc con compuertas.

Evapotranspiración de Referencia (ET_0)

Para estimar la evapotranspiración de referencia (ET_0) se utilizó la ecuación (1), propuesta por Penman-Monteith (Allen, Pereira, Raes y Smith, 1998):

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

Donde, ET_0 es la evapotranspiración de referencia (mm d^{-1}), R_n es la radiación solar neta ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), G es el flujo de calor en el suelo ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), Δ es la pendiente de la curva de presión de vapor ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$), γ es la constante psicométrica ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$), T es la temperatura media del aire ($^\circ\text{C}$), u_2 es la velocidad del viento ajustada 2 m de altura (m s^{-1}), $(e_a - e_s)$ representa el déficit de presión de vapor del aire a 2 m de altura (kilo Pascal).

Evapotranspiración de Referencia con Datos Limitados

Dos de los datos más importantes para estimar la evapotranspiración es la radiación solar neta (R_n) y el flujo de calor en el suelo (G), sin embargo, esta información regularmente no está disponible en las estaciones climatológicas convencionales. Para este trabajo se consideró el valor $G = 0$ tal como lo indica Allen *et al.* (1998) y para calcular R_n se hizo a partir de las ecuaciones 2 a 11.

$$R_n = R_{ns} - R_{nL} \quad (2)$$

Donde R_n es la radiación solar neta ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), R_{ns} es la radiación solar de onda corta ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$) y R_{nL} es la radiación solar de onda larga ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$).

$$R_{ns} = (1 - \alpha) R_s \quad (3)$$

Donde R_s es la radiación solar ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$) y α es el albedo, al cual se le asigna un valor de 0.23 para el cultivo hipotético considerado en FAO56.

$$R_s = \left(a_s + b_s \frac{n}{N} \right) R_a \quad (4)$$

Donde n es el número de horas luz durante el día (h), N es la máxima duración de horas luz (h), R_a es la radiación solar extraterrestre ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), a_s y b_s son constantes de una regresión lineal local que dependen de la localización geográfica de la zona de estudio, para este caso se utilizaron 0.25 y 0.50, respectivamente.

$$R_a = \frac{24(60)}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \sin(\phi) \sin(\delta) + \cos(\phi) \cos(\phi) \sin(\omega_s)] \quad (5)$$

Donde G_{sc} es la constante solar con un valor de $0.082 \text{ MJ m}^{-2} \text{ min}^{-1}$, d_r es la distancia relativa inversa de la tierra al sol, ω_s es el ángulo a la puesta del sol (rad), ϕ es la latitud de la estación meteorológica (rad), y δ es el ángulo de declinación solar (rad). Los valores de δ , d_r y ω_s se calcularon aplicando las ecuaciones 6, 7 y 8.

$$d_r = 1 + 0.033 \cos\left(\frac{2\pi}{365} J\right) \quad (6)$$

$$\delta = 0.409 \sin\left(\frac{2\pi}{365} J - 1.39\right) \quad (7)$$

Donde J es el número de día juliano del año entre 1 y 365.

$$\omega_s = \cos^{-1}[-\tan(\phi) \tan(\delta)] \quad (8)$$

El valor de N se calculó con la ecuación 9.

$$N = \left(\frac{24}{\pi}\right) \omega_s \quad (9)$$

Para calcular la radiación solar de onda larga (R_{nL}) se utilizó la ecuación 10.

$$R_{nL} = \sigma \left(\frac{Tk_{max}^4 + Tk_{min}^4}{2}\right) (0.34 - 0.14\sqrt{e_a}) \left(1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35\right) \quad (10)$$

Donde σ es la constante de Stefan-Boltzman con un valor de $4.903 \times 10^{-9} \text{ MJ K}^{-4} \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, Tk_{max} es la temperatura máxima absoluta del aire en un período de 24 h (°K), Tk_{min} es la temperatura mínima absoluta del aire en un período de 24 h (°K), e_a es la presión de vapor actual (kPa), R_s ya se definió y R_{so} es la radiación solar en un día despejado ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) y se calculó con la ecuación 11.

$$R_{so} = (0.75 + 2 \times 10^{-5} z) R_a \quad (11)$$

Donde z es la elevación sobre el nivel del mar (m) y R_a ya se definió anteriormente.

Por otro lado, la presión barométrica se calculó en función de la altitud de la zona en estudio con la ecuación 12.

$$P = 101.3 \left(\frac{293 - 0.0065 z}{293}\right)^{5.26} \quad (12)$$

Asimismo, la velocidad del viento se ajustó con la ecuación 13, señalada en Allen *et al.* (1998).

$$u_z = u_2 \left(\frac{4.87}{\ln(67.8 \text{ hz} - 5.42)}\right) \omega_s \quad (13)$$

Donde u_z es la velocidad del viento (m s^{-1}) ajustada a 2 m de altura de acuerdo con la metodología FAO56, u_2 es la velocidad del viento medida en campo (m s^{-1}) y hz es la altura de medición de la velocidad del viento (metros).

Coefficiente Dual de Cultivo (Kc)

Para calcular el coeficiente dual de cultivo se aplicó el procedimiento sugerido por Allen *et al.* (1998), (ecuación 14).

$$Kc = Ks Kcb_{ajust} + Ke \quad (14)$$

Donde, Ke es el coeficiente de evaporación del suelo. Por otro lado, Ks es el coeficiente de estrés hídrico del cultivo, Kcb_{ajust} es el coeficiente basal del cultivo ajustado con la ecuación 15.

$$Kcb_{ajust} = Kcb + [0.04 (u_2 - 2) - 0.004(HR_{min} - 45)] \left(\frac{h}{3}\right)^{0.3} \quad (15)$$

K_{cb} es el coeficiente basal del cultivo (Cuadro 1) tabulado en Allen *et al.* (1998) u₂ es la velocidad del viento ajustada a 2 m s⁻¹, HR_{min} es a humedad relativa mínima registrada en el día (%) y h es la altura de la planta (metros) (Cuadro 2).

K_s aplica únicamente para el coeficiente que afecta la transpiración de la planta (K_{cb}); de este modo, cuando se presentó un déficit de agua en el suelo K_s se calculó con las ecuaciones 16 a y 16 b.

$$K_s = \left(\frac{TAW - D_{r,i}}{TAW - RAW} \right) \text{ Si } D_{r,i} > RAW \quad (16a)$$

$$K_s = 1 \text{ si } D_{r,i} \leq RAW \quad (16b)$$

Donde TAW es la humedad totalmente disponible en el suelo y RAW es la humedad fácilmente disponible en el suelo, ambas variables relacionadas con la profundidad radical (mm), y RAW = p TAW (p es a fracción de abatimiento de la humedad totalmente disponible bajo condiciones de suficiencia de agua), y D_{r,i} es el agotamiento de la humedad en el suelo en la zona de raíces al final del día i (mm) (Allen *et al.*, 1998; Pereira, Paredes y Jovanovic, 2020).

El coeficiente de evaporación (K_e) calculado con la ecuación 17, describe el componente de la evaporación que ocurre en la superficie del suelo, si el suelo se encuentra húmedo después de una lluvia o riego, el valor de K_e puede ser grande, sin embargo, en ningún caso, la suma de los coeficientes K_{cb} y K_e puede exceder un valor máximo (K_{c max}) calculado con la ecuación 18, el cual es definido por la cantidad de energía disponible en la superficie del suelo para el proceso de evapotranspiración; el valor de K_e se reduce a medida que se seca la superficie del suelo y será igual a cero cuando no exista agua para la evaporación (Allen *et al.*, 1998).

$$K_e = K_r (K_{c \max} - K_{cb}) \leq f_{ew} K_{cb} \quad (17)$$

Donde; K_e es el coeficiente de evaporación en el suelo, K_{c max} es el valor máximo de K_c después del riego o lluvia, K_r es el coeficiente unidimensional de reducción de la evaporación (calculado con la ecuación 19) que depende de la lámina acumulada de agua agotada (evaporada) de la capa superficial del suelo, y f_{ew} es la fracción del suelo que se encuentra simultáneamente expuesto y humedecido, es decir, la fracción de la superficie del suelo a partir de la cual ocurre la mayor parte de la evaporación.

$$K_{c \max} = \max \left(\left\{ 1.2 + [0.04 (u_2 - 2) - 0.004(HR_{\min} - 45)] \left(\frac{h}{3} \right)^{0.3} \right\}, \{K_{cb} + 0.05\} \right) \quad (18)$$

Con h igual a la altura máxima promedio de las plantas durante el período de cálculo considerado para cada una de las etapas de desarrollo del cultivo (metros).

$$K_r = \left(\frac{AET - D_{e,i-1}}{AET - AFE} \right) \text{ Si } D_{e,i-1} > AFE \quad (19)$$

Donde K_r es el coeficiente adimensional de reducción de la evaporación, que depende del agotamiento de la humedad (lámina acumulada de evaporación), en la parte superior del suelo (K_r = 1 cuando D_{e,i-1} ≤ AFE); D_{e,i-1} es la lámina acumulada de evaporación (agotamiento) en la capa superficial del suelo al final del día_{i-1} (el día anterior)(mm); AET es la lámina acumulada máxima de evaporación (agotamiento) en la capa superficial del suelo cuando K_r = 0 (AET = agua evaporable total), (mm); AFE es la lámina acumulada de evaporación al final de la etapa 1 (AFE = agua fácilmente evaporable), (mm).

Cuadro 1. Valores de K_{cb} tabulados en Allen, Pereira, Raes y Smith (1998) para forrajes de pastoreo de rotación.
Table 1. K_{cb} values tabulated in Allen, Pereira, Raes y Smith (1998) for rotational grazing forages.

	Etapa de desarrollo		
	Ini	Med	Fin
K _{cb}	0.30	1.00	0.80

Cuadro 2. Valores de altura de la planta (h) considerados por etapa de desarrollo.
Table 2. Plant height values (h) considered by development stage.

	Altura de la planta			
	Ini	Des	Med	Fin
h	0.05	0.45	0.70	0.05

Para calcular el valor de f_{ew} se aplicó la ecuación 20.

$$f_{ew} = \min(1 - fc, fw) \quad (20)$$

Donde $1-fc$ es la fracción expuesta promedio del suelo, la cual no se encuentra cubierta (o sombreada) por la vegetación (0.01-1), los valores de cobertura (fc) utilizados se muestran en la Cuadro 3; mientras que, fw es la fracción promedio de la superficie del suelo humedecida por el riego o lluvia (0.01-1), considerando que se aplicó el riego por surcos, se tomó un valor de $fw = 0.8$ de acuerdo con Allen *et al.* (1998).

Evapotranspiración Bajo Condiciones no Estándar (ETc)

Para calcular el valor de evapotranspiración bajo condiciones no estándar (ETc) se aplicó la metodología FAO56 propuesta por Allen *et al.* (1998), y se utilizó la ecuación 21.

$$ETc = Kc ETo \quad (21)$$

Donde Kc representa el coeficiente dual del cultivo y se calculó con la ecuación (21) y ETo se calculó con la ecuación (1).

Productividad y Eficiencia de Uso del Agua

La productividad del agua se calculó en función de la eficiencia del uso de agua, para este trabajo se utilizó la masa de forraje verde (kg) y la masa de materia seca producida, todos los valores expresados por unidad de superficie (Condori-Vargas, Ruiz, Ticona y Chipana, 2018).

$$EUA = \frac{Rd}{VAU} \quad (22)$$

EUA es la eficiencia de uso del agua en $kg\ m^{-3}$, Rd es la masa del parámetro a evaluar (kg) y VAU es el volumen de agua utilizado (m^3).

Asimismo, se determinó la eficiencia de uso de agua en función del volumen de agua necesario para producir un kilogramo de materia fresca y seca, mediante la ecuación 23.

$$EUA = \frac{VAU}{Rd} \quad (23)$$

Cuadro 3. Factores de cobertura considerados para las diferentes etapas de desarrollo del cultivo (fc).
Table 3. Coverage factors considered for the different stages of crop development (fc).

	Factor de cobertura (fc)			
	Ini	Des	Med	Fin
Altura (h)	0.4	0.7	0.9	0.4

Donde EUA se expresa en $L\ kg^{-1}$, VAU en $L\ y\ Rd$ en kilogramo.

Para determinar el porcentaje de materia seca (24), las muestras vegetales se pesaron en húmedo (FV) y posteriormente, mediante una estufa de secado a temperatura constante de $65\ ^\circ C$ durante 72 horas (Serrano, Shahidian y Marques, 2016) se obtuvo el valor de materia seca (MS).

$$\%MS = \frac{MS}{FV} \times 100 \quad (24)$$

Análisis Estadístico

Al calcular el valor de la ET_c , la diferencia entre la falta de datos y la disponibilidad de los mismos afecta directamente al valor de la ET_0 , por lo que el análisis estadístico se realizó en esta etapa del cálculo. El desarrollo de los modelos fue evaluado utilizando el índice de concordancia de Willmott (d), coeficiente de determinación (R^2), la raíz media del error cuadrático (RMSE), BIAS y el coeficiente de eficiencia de modelación de Nash-Sutcliffe (EF).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Comportamiento de la ET_0 con Respecto a las Condiciones Climáticas Locales

La temperatura es uno de los factores climáticos que más afecta la evapotranspiración de referencia (ET_0) junto con la humedad relativa, velocidad del viento y radiación solar (Al-Hasani y Shahid, 2022). La temperatura máxima diaria registrada durante el período de análisis fue de $39.6\ ^\circ C$ que se presentó en el mes de julio y la temperatura mínima diaria fue de $5.3\ ^\circ C$ que se presentó en el mes de febrero; la lámina de riego aplicada fue de 1220 mm, mientras que, la precipitación total acumulada durante el período de estudio fue de 492.5 mm, sin embargo, la precipitación efectiva estimada fue de 269.9 mm, lo que representa un 54.8% del total precipitado.

Se determinó la ET_0 diaria para todo el período de estudio considerado, registrando el dato máximo medido de $10.2\ mm\ d^{-1}$ en el mes de septiembre de 2020, mientras que, el dato mínimo medido fue de $1.0\ mm\ d^{-1}$ que se presentó en el mes de febrero de 2020; la ET_0 máxima estimada fue de $10.3\ mm\ d^{-1}$ y la mínima de $1.6\ mm\ d^{-1}$. La ET_0 total con datos medidos fue de 2033.4 mm durante el periodo estudiado, mientras que, la ET_0 estimada con datos limitados fue de 2166.3 mm, lo que representa una sobrestimación de 6.5% de la ET_0 con datos limitados (Figura 2).

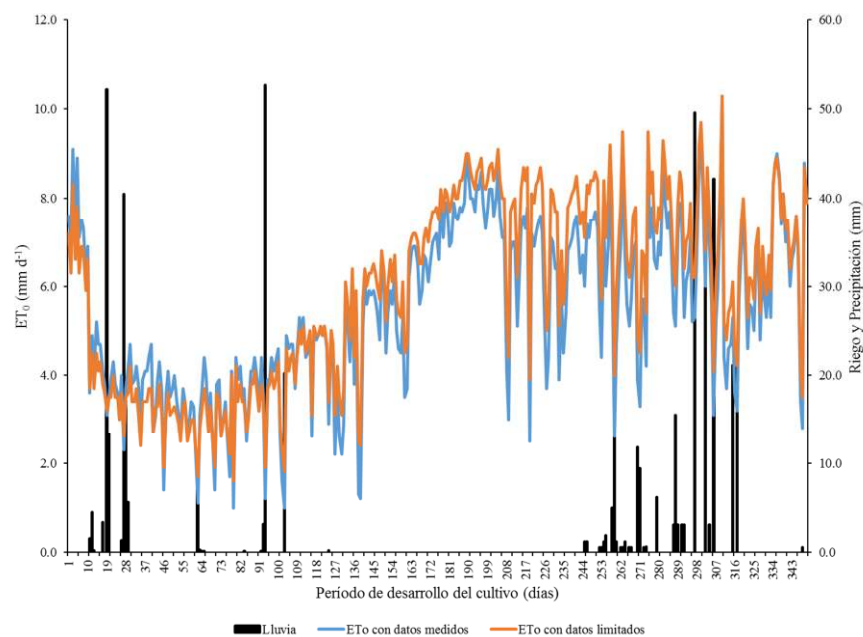


Figura 2. Evapotranspiración de referencia (ET_0) con datos medidos y datos limitados.
Figure 2. Reference evapotranspiration (ET_0) with measured data and limited data.

En la Figura 3 se señala el análisis estadístico para el comportamiento de la ET_0 con datos medidos y datos limitados, el cual muestra un RMSE de 0.694 mm d^{-1} , que representa un 12.5% de desviación respecto a la media de los datos observados, un coeficiente de determinación (R^2) de 0.92, lo que indica una fuerte correlación, un índice de concordancia modificado de Willmott (d) de 0.9, un sesgo (BIAS) de 0.380 mm d^{-1} y el índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe de 0.98, lo que señala que el modelo que simula la ET_0 a partir de una limitación de datos es adecuado y existe una buena concordancia entre datos medidos y estimados (Saldaña-Villota y Cotes, 2021; Le Duc y Sawada, 2023).

Comportamiento de los Coeficientes Involucrados en el Kc Dual

Se determinó el coeficiente dual de cultivo para el pasto híbrido *Brachiaria sp.* (Convert 330) en un clima semiárido cálido del noroeste mexicano. El coeficiente dual del cultivo (K_c dual) esta integrado por el coeficiente basal del cultivo (K_{cb}), el coeficiente de evaporación del suelo (K_e) y el coeficiente de estrés hídrico en la planta (K_s).

La curva del coeficiente de evaporación del suelo (Figura 4) muestra numerosos "picos" que representan la respuesta del coeficiente a los eventos de riego o lluvia durante las diferentes etapas de desarrollo del cultivo, con puntos máximos que coinciden con un evento de riego, y pastoreo de la predera cuando el suelo quedaba descubierto, caso similar es señalado por Puig-Sirera *et al.* (2021), que utilizaron el modelo FAO56 con coeficiente dual de cultivo para estimar el consumo de agua en una huerta de olivo en Italia, lo que es un comportamiento característico de cultivos perenes; asimismo, Paredes *et al.* (2018) señalan que, la curva de K_e muestra una fuerte dependencia de los eventos de humedecimiento, donde los valores mayores de K_e coinciden con los momentos de corte en zacate bermuda (Tifton 85), debido a que se reduce la cobertura de la superficie, incrementando la energía disponible para la evaporación del suelo. El coeficiente de estrés hídrico (K_s) se mantuvo en 1 considerando los eventos frecuentes de riego y precipitación que no permitieron que la humedad en el suelo descendiera más allá de la humedad fácilmente aprovechable, este coeficiente ha sido motivo de estudio particularmente para conocer la respuesta del cultivo a condiciones de sequía considerando que no se aplica el total de la humedad requerida (Hunsaker y Bronson, 2021).

En el Cuadro 4 se muestran los valores de K_c dual promedio por ciclo o corte para las etapas fenológicas inicial, media y final del cultivo; asimismo, se muestra el promedio general del cultivo híbrido de *Brachiaria sp.* (Convert 330). De Souza *et al.* (2021) señalan que *Brachiaria brizantha* es un cultivo de muy alta demanda de agua, y los valores de K_c promedio que obtuvieron para este pasto en condiciones de clima subtropical fueron de 0.59, 0.88 y 0.85 para las etapas inicial, media y final, respectivamente; mientras que, los valores obtenidos en este trabajo fueron 0.49, 1.11 y 1.04 para las mismas etapas pero en condiciones de clima semiárido; los valores mayores de K_c indica que para condiciones semiáridas el cultivo requiere mayor cantidad de agua que en condiciones de clima subtropical donde la demanda atmosférica es menor, registrando una ET_0 de 1266.7 mm (De Souza *et al.*, 2021), menor en un 37.7% que la registrada en este trabajo.

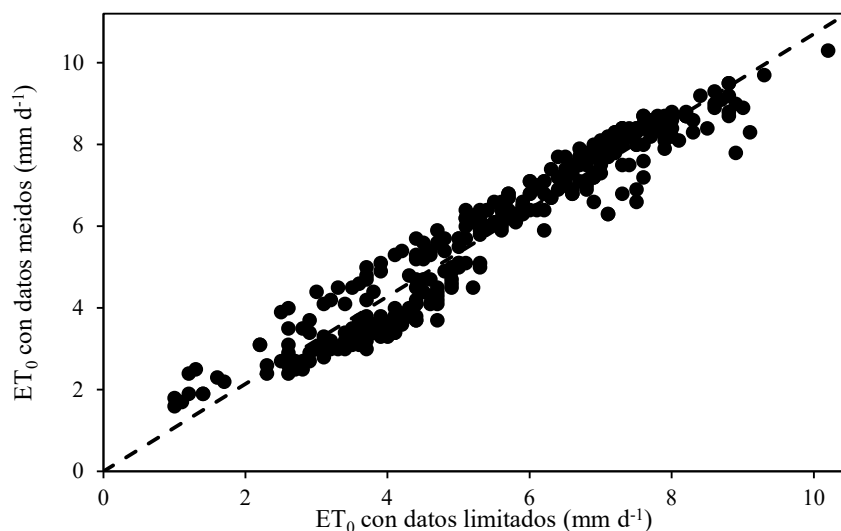


Figura 3. Análisis estadístico del cálculo de ET_0 con datos medidos y datos limitados.
Figure 3. Statistical analysis of ET_0 calculation with measured data and limited data.

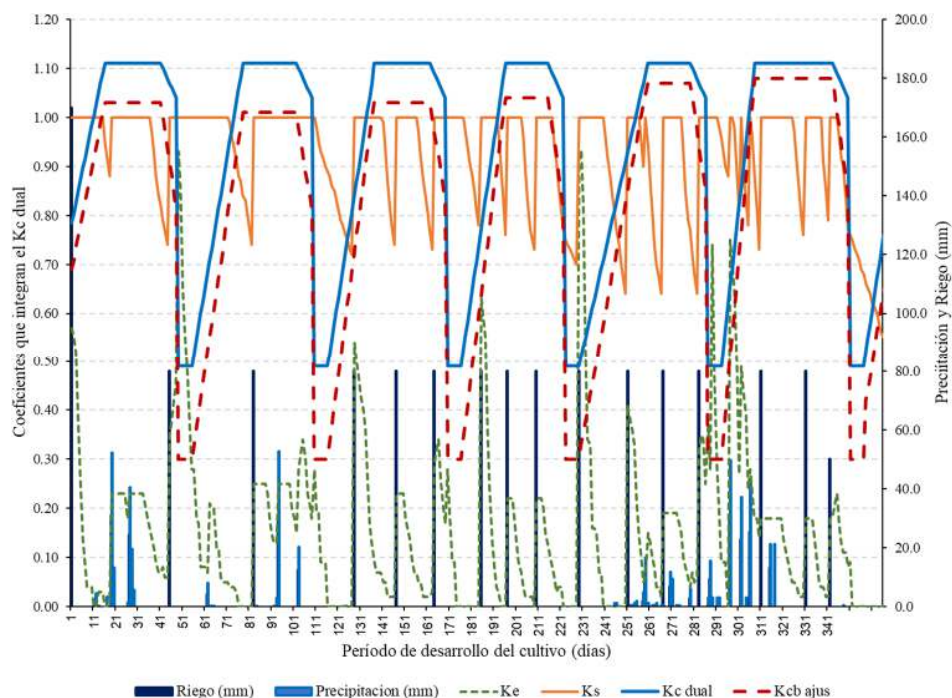


Figura 4. Comportamiento de los coeficientes que integran el Kc dual durante el período de estudio.

Figure 4. Behavior of the coefficients that make up the dual Kc during the study period.

Otros autores como Sanches, Souza, Jesus, Mendonça y Gomes (2019) reportaron valores de Kc promedio para pasto Mombasa (*Megathyrus maximus*) de 1.09, 1.09, 0.95 y 1.12 para las estaciones del año: otoño, invierno, primavera y verano, respectivamente, mientras que, en este trabajo los valores de Kc promedio obtenidos fueron 0.95, 0.88, 0.89 y 0.97, para las mismas estaciones. Antoniel *et al.* (2016) obtuvieron los valores de Kc para *Brachiaria Brizantha* en condiciones de clima subtropical húmedo, quienes reportan un valor de Kc único promedio para cada ciclo o corte, ellos realizaron 4 cortes (ciclos) y los valores obtenidos fueron 0.90, 1.33, 1.24 y 1.02, respectivamente; mientras que, en este trabajo se realizaron 6 ciclos o cortes y los valores de Kc promedio obtenidos por ciclo fueron 0.85, 1.06, 0.86, 0.79, 0.81 y 0.93, respectivamente.

Por otro lado, considerando que el Kc dual es un factor que depende fuertemente de las condiciones del suelo (textura y humedad), así como, del sometimiento y respuesta al estrés hídrico por parte del cultivo, en este trabajo se obtuvieron los valores del coeficiente basal del cultivo (Kcb), los cuales se muestran en el Cuadro 5. El coeficiente basal del cultivo (Kcb) se ajustó de acuerdo con la ecuación 15.

Estos valores difieren ligeramente a los reportados por Allen *et al.* (1998) para pastos de rotación, principalmente para la etapa final, donde hay un incremento del 15% del Kcb, mientras que en la etapa media el incremento es de 4% de los valores aquí calculados.

Cuadro 4. Valores de Kc obtenidos por ciclo y promedio para cada una de las etapas fenológicas.
Table 4. Kc values obtained per cycle and average for each of the phenological stages.

Etapa/Ciclo	1	2	3	4	5	6	Kc Prom
INICIAL	0.24	0.89	0.42	0.39	0.36	0.64	0.49
MEDIA	1.17	1.14	1.05	1.09	1.07	1.15	1.11
FINAL	1.07	1.16	1.11	0.88	1.01	1.01	1.04
Kc prom	0.85	1.06	0.86	0.79	0.81	0.93	0.88

Cuadro 5. Valores de Kcb ajustados obtenidos para pasto híbrido Convert 330 (*Brachiaria sp.*)
Table 5. Adjusted Kcb values obtained for Convert 330 hybrid grass (*Brachiaria sp.*)

	Etapa de desarrollo		
	Ini	Med	Fin
Kcb	0.30	1.04	0.92

Evapotranspiración del Pasto Híbrido Convert 330 (*Brachiaria sp.*) Bajo Condiciones no Estándar (ETc)

Se calculó la evapotranspiración del cultivo híbrido Convert 330 (*Brachiaria sp.*) bajo condiciones no estándar (ETc) para una zona semiárida del noroeste mexicano considerando un período de 365 días, la ETc estimada con datos medidos fue de 1849 mm, mientras que la lámina de riego aplicada (R) fue de 1200 mm, y la precipitación (P) registrada durante el período de estudio fue de 492.5 mm, la relación ETc/(R+P) fue de 1.09. Por otro lado, la ETc estimada con datos limitados fue de 1973.5 mm, lo que representa una sobrestimación del 6.7%, en la misma proporción que la diferencia de ET_0 (Figura 5).

San José, Montes, Herrera, Maia y Nikonova (2019) reportaron una ETc de 731 mm para *Brachiaria decumbens* en la cuenca de Orinoco en Venezuela, para un clima subtropical con precipitación media anual de 1014 mm, y una temperatura promedio de 25.9 °C y donde la relación ETc/P fue de 0.52, sin embargo, para las condiciones semiáridas del noroeste mexicano la relación ETc/P fue de 3.8, donde la necesidad hídrica del híbrido Convert 330 (*Brachiaria sp.*) es muy superior a la precipitación registrada.

En la Figura 6 se muestra el análisis estadístico para el comportamiento de la ET_c con datos medidos y datos limitados, los parámetros estimados son similares a los obtenidos para la ET_0 (Figura 3). Sousa, Bittar, y Buso (2022) aplicaron una lámina de agua total de 431.8 mm para *Brachiaria brizantha* estimada para la temporada de invierno en Brasil con un clima tropical e invierno seco, para ello, utilizaron el método del tanque evaporímetro tipo A y un Kc general de 0.8, la precipitación registrada durante el período de estudio fue de 154 mm; lo cual difiere completamente para las condiciones de clima semiárido cálido como las registradas en la presente investigación (Cuadro 6).

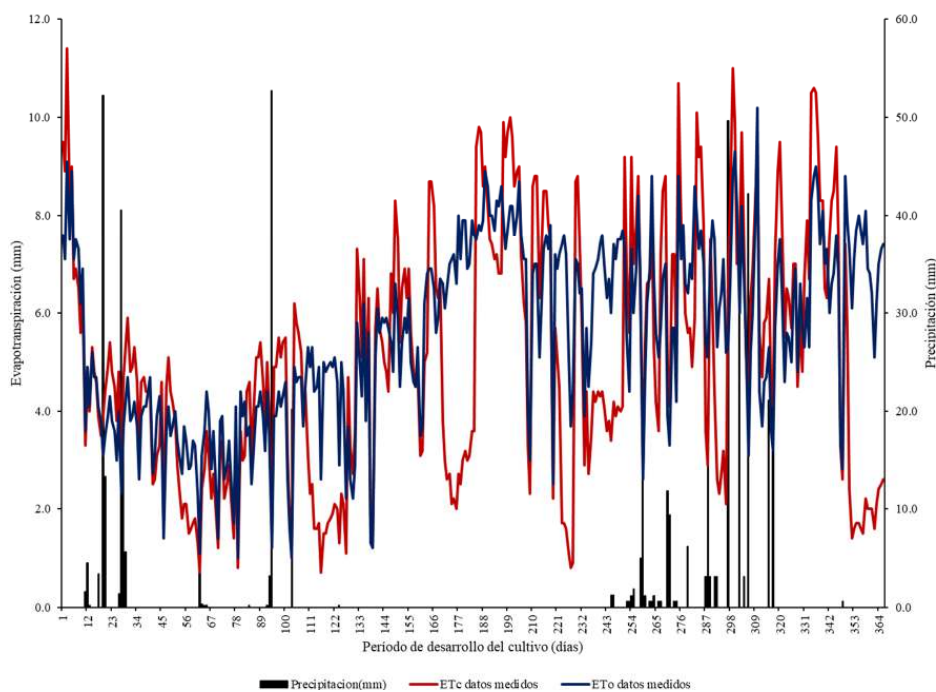


Figura 5. Evolución de la Evapotranspiración del cultivo (ETc) con respecto a la Evapotranspiración de referencia (ET_0) y precipitación.
Figure 5. Evolution of crop evapotranspiration (ETc) with respect to reference evapotranspiration (ET_0) and precipitation.

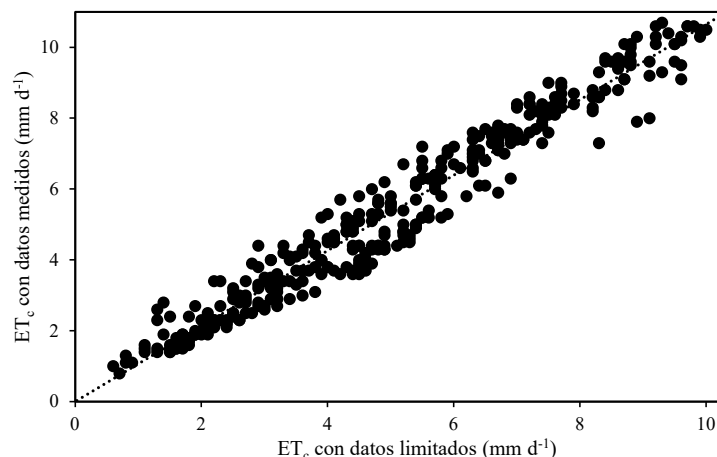


Figura 6. Análisis estadístico del cálculo de ET_c con datos medidos y datos limitados.

Figure 6. Statical analysis of ET_c calculation with measured data and limited data.

En el Cuadro 6 se muestra que, en las condiciones de clima semiárido cálido de la región central del estado de Sinaloa en el noroeste mexicano, el 59.9% de la evapotranspiración del cultivo de Convert 330 (*Brachiaria sp*) y el 53.7% de la precipitación se concentran en la temporada primavera-verano.

Productividad y Uso del Agua

Mediante laboratorio y método gravimétrico para materia seca vegetal, se determinó que el forraje verde de pasto Convert 330 contiene un 27.2% de materia seca y 72.8% de agua en sus tejidos (usando el promedio de los 6 cortes realizados). El volumen de agua total consumido (ET_c) fue de 18 490 m³ ha⁻¹, mientras que el volumen de agua total recibido (riego + precipitación) fue de 16 925 metros cúbicos por hectarea.

La productividad y eficiencia de uso del agua fue evaluada en función del forraje verde producido y la materia seca. El rendimiento promedio de forraje verde total producido fue de 49 290 kg ha⁻¹ y de materia seca fue de 13 418 kg ha⁻¹, lo que representa una productividad del agua de 2666 kg m⁻³ y una eficiencia de uso de agua de agua (EUA) de 375.1 L kg⁻¹. Mientras que, considerando la producción de materia seca, la productividad del agua y EUA fue de 0.726 kg m⁻³, y 1378 L kg⁻¹, respectivamente. En el Cuadro 7 se considera además, el volumen de agua recibido por el cultivo con el riego y precipitación (R+P).

Dantas *et al.* (2016) evaluaron la productividad de *Brachiaria brizantha* en un clima subhúmedo seco en invierno y lluvioso en verano, donde obtuvieron una productividad en materia seca de 0.769 kg m⁻³ y una EUA de 1331.9 L kg⁻¹, valores muy similares a los obtenidos en esta investigación. Por otro lado, Condori-Vargas *et al.* (2018) al evaluar la productividad del pasto *Pennisetum sp* en campo abierto y la eficiencia de uso de agua en el altiplano boliviano, reportaron valores de productividad desde 0.17 kg m⁻³, y uso de agua desde 5804.5 L kg⁻¹, donde la productividad y eficiencia de uso de agua resultaron menores que los valores obtenidos en esta investigación para el pasto *Brachiaria sp* (Convert 330) al requerir 3.2 veces más agua por kg de materia seca producida. Asimismo, Thaiana-Rueda *et al.* (2020) evaluaron la eficiencia de uso de agua de *Brachiaria brizantha* y obtuvieron valores desde 6.10 kg m⁻³ hasta 2.03 kg m⁻³, considerando diferentes niveles de humedad en el suelo en un clima tropical cálido subhúmedo (Aw).

Cuadro 6. Distribución estacional de la evapotranspiración del cultivo y la precipitación.

Table 6. Seasonal distribution of crop evapotranspiration and precipitation.

Temporada anual	ET _c		Precipitación	
	mm	%	mm	%
Otoño	448.5	24.3	142.9	29.0
Invierno	293.1	15.9	85.3	17.3
Primavera	538.6	29.1	0.0	0.0
Verano	568.6	30.7	264.3	53.7

Cuadro 7. Productividad y eficiencia en el uso de agua para forraje verde y materia seca.
Table 7. Productivity and efficiency in the use of water for green fodder and dry matter.

Forraje verde				
Parámetro hídrico	Volumen de agua	Rendimiento	Productividad	EUA
	m ³ ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	kg m ⁻³	L kg ⁻¹
ETc	18 490	49 290	2.666	375.1
R+P	16 925	49 290	2.912	343.4
Materia seca				
ETc	18 490	13 418	0.726	1378.0
R+P	16 925	13 418	0.793	1261.4

Es evidente que para pastizales en condiciones de temporal limitado, la escasez de agua limita el crecimiento y desarrollo de las plantas como resultado de una reducción en la evapotranspiración comparando con un pastizal bajo riego. En el sur de México donde existe un clima cálido subhúmedo es posible identificar tres épocas relacionadas con la precipitación durante el año (época de lluvias, secas y de nortes) en estas condiciones Merlo *et al.* (2017) analizaron el efecto de la época del año sobre el rendimiento de *Brachiaria brizantha* bajo condiciones de temporal y obtuvieron rendimientos promedio de 1.30, 1.54 y 0.51 tonelada MS ha⁻¹, para las épocas de secas, lluvias y nortes, respectivamente, y registrando una precipitación de 316, 692 mm y 156.8 mm por cada época, la productividad estimada fue de 0.411, 0.222 y 0.325 kg MS m⁻³, con una media anual de 0.319 kg MS m⁻³ valor inferior a los obtenidos en la presente investigación bajo condiciones de riego en clima semiárido. Asimismo, Robles-Vega *et al.* (2020) evaluaron el rendimiento de forraje de diferentes especies de *Urochloa* (*Brachiaria*) para condiciones de clima cálido subhúmedo en México y reportaron rendimientos de 1.525, 1.857 y 5.790 tonelada MS ha⁻¹ para las épocas de nortes, secas y lluvias, respectivamente; los registros de lluvia para esas mismas épocas fueron 45, 35 y 304 mm, lo que representa una productividad de 3.388, 5.306 y 1.905 kg MS m⁻³, respectivamente, para una media anual de 3.533 kg MS m⁻³, sin embargo, los autores reportan que fue un año atípico en cuanto a las precipitación, ya que sólo se registró un 42.8% de la precipitación media anual. Aniano-Aguirre *et al.* (2022) reportaron un rendimiento de 4091 kg ha⁻¹ en pasto Convert 330 (*Brachiaria sp.*) para clima cálido subhúmedo (Aw) del suroeste mexicano, y una precipitación acumulada durante el periodo de estudio de 854 mm, con lo que la productividad del agua sería de 0.479 kg MS m⁻³, inferior a la obtenida para este trabajo de investigación.

CONCLUSIONES

Se aplicó el método FAO56 con Kc dual para determinar la evapotranspiración del pasto híbrido Convert 330 del género *Brachiaria* para las condiciones de clima semiárido cálido del noroeste de México, donde la precipitación media anual es inferior al valor requerido para esta gramínea. El requerimiento hídrico obtenido fue de 1849 mm con datos medidos y 1973.5 mm con datos limitados; el procedimiento FAO56 con datos limitados sobrestimó en un 6.7% la ETc calculada con datos medidos, sin embargo, el análisis estadístico muestra una buena aproximación entre ambos valores calculados, por lo que, el uso del procedimiento FAO56 con datos limitados es confiable, sin embargo, es necesario validar el procedimiento para otros cultivos y otras condiciones climáticas. Asimismo, se determinaron los valores de Kc para las etapas inicial, media y final del pasto híbrido Convert 330 (*Brachiaria sp.*), resultando los valores 0.49, 1.11 y 1.04 para las tres etapas en el orden mencionado. Las diferencias en productividad y eficiencia de uso de agua se deben básicamente a las diferentes condiciones climáticas de las regiones comparadas, sin embargo, también es importante considerar las características físicas y químicas del suelo, así como, el manejo de cultivo. Por otro lado, considerando la productividad del agua calculada para este cultivo y las condiciones de escasez de recursos hidráulicos registradas en las presas de la zona central del estado de Sinaloa en los últimos años, hacen no recomendable la siembra de este pasto híbrido para la región.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los conjuntos de datos generados o analizados durante el estudio actual no están disponibles públicamente debido a regulaciones institucionales pero están disponibles del autor correspondiente a solicitud razonable.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización, metodología, investigación y supervisión: J.E.L.A. Escritura e investigación: H.J.L.I. Curación de datos y análisis formal de datos: M.A.T.R. Revisión y Edición: M.D.E.A. Curación de datos y preparación de borrador original: JAMG.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece la colaboración y facilidades otorgadas para la realización del trabajo de campo al productor y Presidente de la Unión Ganadera Regional de Sinaloa (UGRS) Luis Fernando Velázquez Serrano (2020).

LITERATURA CITADA

- Aniano-Aguirre, H., Maldonado-Peralta, M. A., Gasga-Pérez, L., Pelaez-Estrada, U. V., Hernández-Marín, J. A., & Rojas-García, A. R. (2022). Características estructurales de pastos: Mulato II, Convert 330 y Convert 431 (*Urochloa* híbrido). *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 13(5), 863-872. <https://doi.org/10.29312/remexca.v13i5.3230>
- Al-Hasani, A. A. J., & Shahid, S. (2022). Spatial distribution of the trends in potential evapotranspiration and its influencing climatic factors in Iraq. *Theoretical and Applied Climatology*, 150, 677-696. <https://doi.org/10.1007/s00704-022-04184-4>
- Allen, R.G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56*. Roma, Italia: FAO
- Antonieli, L.S., Prado, G. D., Tinos, A. C., Beltrame, G. A., de Almeida, J. V., & Cuco, G. P. (2016). Pasture production under different irrigation depths. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 20, 539-544. <https://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v20n6p539-544>
- Condori-Vargas, S., Ruiz-Huanca, P., Ticona-Guanto, O., & Chipana-Mendoza, G. J. (2018). Eficiencia del uso del agua y características bromatológicas de maralfalfa (*Pennisetum* sp.) bajo la aplicación de biol bovino en la Estación Experimental Choquenaira. *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales*, 5(2), 68-80.
- Dantas, G. F., Faria, R. T., Santos, G. O., Dalri, A. B., & Palaretti, L. F. (2016). Productividade e qualidade da *Brachiaria* irrigada no outono/inverno. *Engenharia Agrícola*, 36(3), 469-481. <https://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v36n3p469-481/2016>
- De Souza, D. P., Sanches, A. C., Mendonca, F. C., Pezopane, J. R. M., Amorim, D. M., & de Jesus, F. L. F. (2021). Crop coefficient estimated by degree-days for 'Marandu'palisadegrass and mixed forage. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias UNCuyo*, 53(2), 71-81. <https://doi.org/10.48162/rev.39.041>
- Gaspari, P. C., Menezes, S. P., Gomes, C. J. A., Azevedo, R. F., & Borges, V.C. (2015). Estresse por deficiência hídrica em genótipos de *Brachiaria brizantha*. *Ciência Rural, Santa Maria*, 45(5), 871-876. <http://doi.org/10.1590/0103-8478cr20130915>
- Hunsaker, D. J., & Bronson, K. F. (2021). FAO56 crop and water stress coefficients for cotton using subsurface drip irrigation in an arid US climate. *Agricultural Water Management*, 252, 106881. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106881>
- Le Duc & Sawada, Y. (2023). A signal processing based interpretation of the Nash-Sutcliffe efficiency. *Hydrology and Earth System Sciences*, 27, 1827-1839. <https://doi.org/10.5194/hess-27-1827-2023>
- Merlo-Maydana, F. E., Ramírez-Avilés, L., Ayala-Burgos, A. J., & Ku-Vera, J. C. (2017). Efecto de la edad de corte y la época del año sobre el rendimiento y calidad de *Brachiaria brizantha* (A. Rich.) Staff en Yucatán, México. *Journal of the Selva Andina Animal Science*, 4(2), 116-127.
- Paredes, P., Rodrigues, G., Petry, M. T., Severo, P. O., Carlesso, R., & Santos, P. L. (2018). Evapotranspiration partition and crop coefficients of Tifton 85 bermudagrass as affected by the frequency cuttings. Application of the FAO56 dual Kc model. *Water*, 10, 558. <https://doi.org/10.3390/w10050558>
- Pereira, L. S., Paredes, P., & Jovanovic, N. (2020). Soil water balance models for determining crop water and irrigation requirements and irrigation scheduling focusing on the FAO56 method and the dual Kc approach. *Agricultural Water Management*, 241, 106357. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106357>

- Poblete-Vargas, J., Valadez-Moctezuma, E., García- de los Santos, G., Martínez-Flores, C., & Peralta-Martínez, A. (2018). Differentiation of apomictic and sexual genotypes of *Brachiaria spp.* using molecular markers. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 5(13), 71-80. <https://doi.org/10.19136/era.a5n13.1180>
- Puig-Sirera, A., Rallo, G., Paredes, P., Paco, T. A., Minacapilli, M., Provenzano, G., & Pereira, L. S. (2021). Transpiration and water use of an irrigated olive grove with sap-flow observations and the FAO56 dual crop coefficient approach. *Water*, 13, 2466. <https://doi.org/10.3390/w13182466>
- Robles-Vega, F. J., Granados-Rivera, L. D., Joaquin-Cancino, S., Aguado-Lara, G., Rivas-Jacobo, M. A., & Garay-Martínez, J. R. (2020). Forage yield of *Urochloa* cultivars in a warm sub-humid environment. *Agro Productividad*, 13(12), 75-81. <https://doi.org/10.32854/agrop.v13i12.1902>
- Saldaña-Villota, T. M., & Cotes-Torres, J. M. (2021). Comparison of statistical indices for the evaluation of crop models performance. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 74(3), 9675-9684. <https://doi.org/10.15446/rfnam.v74n3.93562>
- Sanches, A. C., Souza, D. P. D., Jesus, F. L. F. D., Mendonça, F. C., & Gomes, E. P. (2019). Crop coefficients of tropical forage crops, single cropped and overseeded with black oat and ryegrass. *Scientia Agricola*, 76, 448-458. <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2017-0386>
- San José, J., Montes, R., Herrera, R., Maia, J. M., & Nikonova, N. (2019). Land-use Changes Alter Energy and Water Balances on an African *Brachiaria* Pasture Replacing a Native Savanna in the Orinoco Llanos. *Journal of Atmospheric Science Research*, 2(2), 22-36. <https://doi.org/10.30564/jasr.v2i2.558>
- Serrano, J., Shahidian, S., & Marques, S. J. (2016). Calibration of GrassMaster II to estimate green and dry matter yield in Mediterranean pastures: effect of pasture moisture content. *Crop & Pasture Science*, 67, 780-791. <http://doi.org/10.1071/CP15319>
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). (2021). Producción Agrícola. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. Consultada el 13 de marzo, 2023, desde <https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/produccion-agricola-33119>
- SINA (Sistema Nacional de Información del Agua). (2022). Situación de la recursos hídricos. Consultada el 13 de marzo, 2023, desde <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/situacion-de-los-recursos-hidricos>
- Sousa, C. M., Bittar, D. Y., & Buso, W. H. D. (2022). Responses of *Panicum* and *Brachiaria* to irrigation during winter in the Goiás' Cerrado-Brazil. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias UNCuyo*, 54(2), 117-125. <https://doi.org/10.48162/rev.39.088>
- Thaiana-Rueda da Silva, C., Bonfim-Silva, E. M., De Araujo da Silva, T. J., Alves Rodrigues Pinheiro, E., Vieira José, J., & Pereira Freire Ferraz, A. (2020). Yield component responses of the *Brachiaria brizantha* forage grass to soil water availability in the Brazilian Cerrado. *Agriculture*, 10(1), 13. <https://doi.org/10.3390/agriculture10010013>
- Valle Júnior, L. C. G. D., Vourlitis, G. L., Curado, L. F. A., Palácios, R. D. S., Nogueira, J. D. S., Lobo, F. D. A., ... & Rodrigues, T. R. (2021). Evaluation of FAO-56 procedures for estimating reference evapotranspiration using missing climatic data for a Brazilian tropical savanna. *Water*, 13(13), 1763. <https://doi.org/10.3390/w13131763>