

**Unidades de calor relacionadas con el desarrollo del cultivo de maíz (*Zea mays* L.)**

Alejandro Cruz-González<sup>1\*</sup> ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3804>

Ramón Arteaga-Ramírez<sup>2</sup> ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9459-3588>.

Alejandro-Ismael Monterroso-Rivas<sup>3</sup> ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4348-8918>.

Jesús Soria-Ruiz<sup>4</sup> ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6226-6598>.

Ignacio Sánchez-Cohen<sup>5</sup> ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9063-7114>.

Abel Quevedo-Nolasco<sup>6</sup> ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3303-5077>.

<sup>1</sup>Universidad Intercultural del Estado de México. Libramiento Francisco Villa s/n, C.P. 50640 San Felipe del Progreso, Estado de México, México.

<sup>2</sup>Departamento de Irrigación, Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco 56230, Estado de México, México.

<sup>3</sup>Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco 56230, Estado de México, México.

<sup>4</sup>Laboratorio de Geomática-Sitio Experimental Metepec - Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Zinacantepec 52176, Estado de México, México.

<sup>5</sup>Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias - Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera, Gómez Palacio 35140, Durango, México.

<sup>6</sup>Colegio de Postgraduados Campus Montecillo. Texcoco 56264, Estado de México, México.

Autor para correspondencia: alex\_cg20@hotmail.com

## **Resumen**

La temperatura es una medida de la cantidad de calor que afecta el crecimiento y desarrollo del cultivo de maíz. El concepto de unidades de calor se utiliza en varios estudios fenológicos, tal es el caso de la predicción de los cambios fenológicos de los seres vivos. Una forma directa para calcular las unidades de calor es mediante el cálculo de los grados días de desarrollo (GDD), este concepto cuantifica la relación entre la fenología del maíz y la temperatura. Se realizó una revisión de literatura sobre el efecto de la temperatura, en especial los GDD para evaluar los cambios fenológicos y su relación con las actividades culturales en el cultivo de maíz. Esta investigación se realizó durante el año 2024, obteniéndose información reciente de las plataformas científicas Science Direct y Redalyc, consultando artículos de investigación centrados en los índices agroclimáticos aplicados al cultivo de maíz. En éste se describe un marco teórico que concentra diferentes casos de estudio, retomando la información generada en los principales sitios maiceros a nivel mundial, lo que dio como resultado un amplio conjunto de conceptos interrelacionados para una mejor comprensión del tema. A partir de la presente revisión, ha sido documentado que los GDD son un método simple y ampliamente utilizado para monitorear y estimar los estados fenológicos del cultivo de maíz, sin embargo, su aplicación depende del conocimiento de información agronómica y ambiental.

**Palabras clave:** temperatura del aire, unidades calor, tiempo térmico, fenología del maíz.

## **Abstract**

**Key words:** air temperature, heat units, thermal time, maize phenology.

**Fecha de recibido:** 16 marzo, 2025

**Fecha de aceptado:** 20 enero, 2026

## Introducción

Los estudios de zonificación agroclimática contribuyen a la adaptación de los sistemas agrícolas y a determinar las características específicas de una región, brindan información para la planificación de actividades agrícolas, incorporan indicadores climáticos y agroclimáticos, que son útiles para identificar áreas potenciales en el establecimiento de sistemas productivos, además, contribuyen a la generación de estrategias de prevención y adaptación al cambio climático (Mathieu & Aires, 2018). Los índices agroclimáticos se definen en función de las relaciones entre cultivos, rendimiento, manejo, variación del clima, además, se utilizan para medir las condiciones climáticas óptimas requeridas para el rendimiento agrícola deseado (Satapathy et al., 2021).

El clima es un factor restrictivo que influye directamente en las prácticas agrícolas; por lo tanto, se debe considerar en la planificación agrícola (Cruz-González et al., 2024). La temperatura es un factor que controla la tasa de desarrollo de las plantas y el rendimiento de los cultivos, sin embargo, ciertas temperaturas extremas pueden ser un factor limitante que ralentiza el crecimiento de las plantas, provocando lesiones o incluso la muerte (Mishra et al., 2023). La disminución o el aumento de las temperaturas por encima de umbrales específicos durante el período de vegetación, desencadena estrés por frío y calor en diversos cultivos agrícolas, que limitan su crecimiento y metabolismo, esto provoca pérdidas de cultivos en todo el mundo (Kim & Lee, 2023).

Se han definido un conjunto de índices agroclimáticos con base en la temperatura del aire para su uso en diferentes prácticas agrícolas, mediante un valor numérico único, se pueden comprender las diferencias en las condiciones de crecimiento de un cultivo, así como la descripción de las adaptaciones de especies de cultivos y regiones de adaptación (Lysiak & Szot, 2023; Lu et al., 2021). Algunos índices mencionados en la literatura son; la temperatura biológica, el índice de noches frías, el índice cálido, la temperatura promedio de la temporada de crecimiento, la temperatura acumulada efectiva, la suma de temperaturas efectivas, los grados día de desarrollo, entre otros (Mathieu & Aires, 2018).

El índice Grados Días de Desarrollo (GDD) se basa en la relación lineal entre la cantidad de tiempo que lleva alcanzar una etapa fenológica con la temperatura en el rango, entre la temperatura media y la temperatura base (Jan et al., 2022). Los GDD se utilizan ampliamente para determinar la duración de las etapas fenológicas de las plantas y permiten evaluar la duración de la temporada de

crecimiento para diferentes ubicaciones, predecir las fechas de siembra, el inicio de la cosecha y la duración de los ciclos de cultivo (Ortez et al., 2023; Elnesr & Alazba, 2016). En el cultivo de maíz, el tiempo entre etapas y la cantidad de hojas de una planta pueden cambiar, esto se debe a que existen variedades de maduración temprana que producen menos hojas, o desarrollan sus etapas de crecimiento con mayor rapidez, con respecto a una variedad de maduración tardía, la cual, realiza sus etapas de desarrollo de manera más lento, ésta importante variación en el tiempo de desarrollo, puede deberse a diferencias en las ubicaciones geográficas, genética, fechas de siembra, manejo cultural, estaciones del año y estrés ambiental (Khalilzadeh & Wang, 2022).

El maíz representó más del 30% de la producción global de cereales en el año 2023 con una superficie cultivada de más 1,600 millones de hectáreas. Éste se considera el cultivo más relevante en términos de volumen de producción y consumo humano después del trigo (FAO, 2024). El objetivo de este estudio fue realizar una revisión de literatura sobre el efecto de la temperatura, en especial los Grados Días de Desarrollo (GDD) para evaluar los cambios fenológicos en el cultivo de maíz.

## **Temperatura del aire y su influencia en los cultivos**

En la agricultura, el rendimiento de los cultivos depende de varios factores como la genética, las propiedades del suelo, el riego, el manejo, la fertilización, entre otros; pero el clima es un factor ambiental no controlable que interviene en el desarrollo de los cultivos y determina su éxito y rentabilidad (Mathieu & Aires, 2018). Las variables de mayor impacto sobre los cultivos son la precipitación y la temperatura, esta última, es un factor clave en la agricultura debido a que cualquier cambio en ella afecta el suministro de calor en las plantas, lo que condiciona la productividad y la calidad de los cultivos (Lu et al., 2021; Elnesr & Alazba, 2016).

La temperatura afecta los procesos básicos que ocurren en las plantas, como la fotosíntesis, la transpiración y la respiración (Mishra et al., 2023). Se considera que la temperatura del aire, se asocia con otras variables como la fotoperiodicidad, la radiación solar y la temperatura del suelo

(Lysiak & Szot, 2023). La fisiología de los cultivos durante la temporada de crecimiento está impulsada por la acumulación de unidades de calor, más que por la temperatura del aire (Kukal & Irmak, 2018). La acumulación de calor se emplea para predecir el crecimiento y desarrollo, el potencial de rendimiento, la absorción de agua, la absorción de nutrientes y el estrés de los cultivos (Mishra et al., 2023).

### **Acumulación de calor en los cultivos**

En las plantas, el crecimiento y desarrollo se puede caracterizar por el número de días entre etapas o fases fenológicas (Ortez et al., 2023), un ejemplo de ello son los días que se necesitan para que una especie pase de la floración a la madurez de frutos. Estas etapas están influenciadas por la temperatura, pero no es una variable que ayude a medirlas directamente, para lograr una mejor aproximación, se pueden medir los eventos en unidades de desarrollo, o también definido como tiempo fisiológico, en lugar de tiempo cronológico; para ello, se usan las unidades calor (UC) (Klepper, 2023).

Las UC sirven para medir la acumulación del calor o unidades de temperatura a través del tiempo, se utilizan como indicadores del tiempo en el cual un cultivo ha estado expuesto a temperaturas adecuadas para su desarrollo, además de estimar la etapa de crecimiento de las plantas (Khalilzadeh & Wang, 2022; Gilmore & Rogers, 1958). El uso de UC incrementa la precisión para determinar la duración del ciclo de desarrollo, pero sólo se logra si el cálculo de las UC se hace con valores cercanos a las temperaturas umbrales (máxima y mínima) que controlan el desarrollo de la especie (Lysiak & Szot, 2023; Mangani et al., 2023).

### **Temperaturas cardinales del maíz**

La temperatura del aire es el parámetro climático más importante porque los procesos físicos y químicos dentro de las plantas de maíz, se rigen por la temperatura y, a su vez, controlan las reacciones biológicas (Waqas et al., 2021). Cada accesión de maíz tiene sus propios límites de temperatura máxima, óptima y mínima para su normal crecimiento y reproducción, estos tres niveles se conocen como temperaturas cardinales (Beegum et al., 2023; Rai et al., 2014).

A medida que la temperatura disminuye, la tasa de desarrollo del maíz se ralentiza y, si la temperatura desciende lo suficiente, el desarrollo cesará en el umbral inferior de desarrollo del organismo; a menudo se le llama temperatura base ( $T_{base}$ ). Cuando se aumenta la temperatura, la tasa de desarrollo aumenta hasta alcanzar la temperatura óptima ( $T_{opt}$ ), por encima de la cual, la tasa de desarrollo del maíz disminuye y eventualmente cesa en un valor llamado temperatura máxima ( $T_{max}$ ) (Walne & Kambham, 2022).

Sánchez et al. (2014) realizaron una recopilación de datos y encontraron que en 140 artículos científicos en las diferentes zonas de producción de maíz a nivel mundial se determinaron los umbrales de temperatura clave y la respuesta a los efectos de las temperaturas extremas en el maíz. En el Cuadro 1, se presentan los promedios obtenidos para temperaturas letales y temperaturas cardinales, para las diferentes fases fenológicas y etapas de desarrollo del cultivo de maíz.

**Cuadro 1.** Resumen sobre las temperaturas para los diferentes estadios fenológicos del maíz.

Proceso		°C
Límites letales	$T_{base}$	-1.8
	$T_{max}$	46
	$T_{base}$	7.3
Iniciación foliar	$T_{opt}$	31.1
	$T_{max}$	41.3
	$T_{base}$	10.9
Crecimiento de brotes	$T_{opt}$	31.1
	$T_{max}$	38.9
	$T_{base}$	12.6
Crecimiento de raíces	$T_{opt}$	26.3

	Tmax	40.1
	Tbase	10
Siembra hasta emergencia	Topt	29.3
	Tmax	40.2
	Tbase	9.3
Siembra a iniciación de panoja	Topt	28.3
	Tmax	39.2
	Tbase	7.7
Floración	Topt	30.5
	Tmax	37.3
	Tbase	8
Llenado de granos	Topt	26.4
	Tmax	36
	Tbase	6.2
Toda la planta	Topt	30.8
	Tmax	42

### Grados días de desarrollo

Los Grados Días de Desarrollo o tiempo térmico, es uno de los indicadores que permite comprender la fenología de un cultivo (Sharma et al., 2021). El índice GDD es el más empleado para estudiar los cambios de las condiciones de crecimiento en el tiempo y espacio, incorporando la temperatura del aire al potencial térmico de una región con diferentes umbrales de temperatura dependiendo del cultivo (Kukul & Irmak, 2018). Los GDD se utilizan comúnmente como medida de la cantidad de calor necesaria para alcanzar una etapa fenológica particular, y se define como el número de

grados en los que la temperatura diaria excede una temperatura de referencia (Mangani et al., 2023; Sharma et al., 2021).

Los GDD son una herramienta en el sector agrícola que se emplea para predecir con precisión la emergencia de las plántulas (Beegum et al., 2023); para clasificar diferentes accesiones de maíz de mayor a menor precocidad y con diferentes temperaturas bases (Arista-Cortes et al., 2018); identificar periodos de déficit hídrico durante diferentes etapas fenológicas (Prasad et al., 2018). Incluso para definir el valor nutrimental de un cultivo, de acuerdo al tiempo de desarrollo (Barrientos-Blanco et al., 2024); establecer una fecha óptima para el trasplante de plántula (Jan et al., 2022); calcular e identificar efectos en diferentes etapas de crecimiento (Anandhi, 2016); identificar años secos o con calor extremo (Jiang et al., 2021). En estudios de zonificación agroclimática se utilizan para delimitar geográficamente las zonas de mejor aptitud (Neamatollahi et al., 2012); rendimiento potencial futuro con proyecciones de cambio climático (Žydelis et al., 2021); como calendario de siembra para minimizar el riesgo de heladas y temperaturas extremas (Prasad et al., 2018), entre otras aplicaciones.

### **Cálculo de GDD**

Los GDD se han utilizado desde que Gilmore & Rogers (1958) los propusieron por primera vez para seguir el progreso de los cultivos. Este método se calcula cada día promediando las temperaturas diarias mínimas y máximas, y restando una temperatura base, de la siguiente manera:

$$GDD = \frac{(T_{max} + T_{min})}{2} - T_{base}$$

Donde: Tmax y Tmin son la temperatura máxima y mínima diaria del aire (°C), mientras que Tbase es la temperatura umbral base en grados por debajo de la cual el proceso de crecimiento no progresa.

El concepto GDD supone que existe una temperatura base o umbral para la cual las plantas no crecen o crecen muy lentamente (Sharma et al., 2021). Se supone una temperatura base de 10 °C



para cultivos de estación cálida como maíz, sorgo y mijo; mientras que comúnmente se supone una temperatura base más baja de 5 °C a 0 °C para cultivos de estación fría como el trigo, la avena y la cebada (Anandhi, 2016). La tasa de crecimiento de las plantas aumenta a medida que la temperatura aumenta por encima de la temperatura base o umbral. La duración de la temporada de crecimiento de los cultivos está estrechamente relacionada con las acumulaciones de GDD desde la siembra hasta la madurez (Ren et al., 2022).

### GDD en el cultivo de maíz

El ciclo de crecimiento del maíz consta de tres fases: vegetativas, reproductivas y maduración, pero existen etapas de desarrollo más detalladas dentro de estas fases. En cada etapa fenológica, el maíz requiere diferentes acumulaciones de GDD para alcanzar una siguiente etapa (**Cuadro 2**) (Beegum et al., 2023; Sifuentes-Ibarra et al., 2020).

**Cuadro 2.** Requerimientos de los GDD en diferentes etapas de crecimiento del maíz:-

<b>Comer et al., 2017</b>		<b>Leguizamón, et al., 2012</b>		<b>Neamatollahi et al., 2012</b>		<b>Qian et al., 2019</b>		<b>Lozano, 2021</b>		<b>Ojeda et al., 2006</b>	
Ontario, Canadá		Córdoba, Argentina		Jorasán, Irán		Iowa, EUA		Veracruz, México		Sinaloa, México	
Etapas	GDD	Etapas	GDD	Etapas	GDD	Etapas	GDD	Etapas	GDD	Etapas	GDD
VE	180	V4	520	V2	200	V2	123	VE	63	VE	109
V1	330	V8	778	V6	475	V4	417	VT	811	V4	316
V4	630	V13	963	V12	870	V8	744	R1	873	V8	502
V6	680	VT	1067	VT	1135	V10	916	R2	1000	V10	576
V8	930	R5	1289	R1	1400	V14	1279	R3	1094	VT	665
V12	1270			R5	2450	VT	1673	R4	1194	R1	823
VT	1310			R6	2700	R1	1888	R5	1302	R3	1102

R1	1480	R5	2500	R6	1633	R6	1451
R2	1825	R6	2899				
R3	2000						
R4	2165						
R5	2475						
R6	2800						

---

VE-Emergencia, V1-Primera hoja desarrollada, V4-Segunda hoja desarrollada, V6-Sexta hoja desarrollada, V8-Octava hoja desarrollada, V12-Doceava hoja desarrollada, VT Panojamiento/Floración, R1-Emergencia de estigmas/sedosa, R2-Ampolla, R3-Grano lechoso, R4-Grano masoso, R5-Grano dentado y R6-Madurez fisiológica.

### Fenología del cultivo de maíz

La fenología define las etapas de desarrollo fisiológico de los cultivos, desde la siembra hasta la cosecha (Jan et al., 2022). La gestión del crecimiento de los cultivos y la estimación del rendimiento requieren información precisa sobre la fenología del cultivo durante la temporada de crecimiento (Gao & Zhang, 2021). La fenología vegetal se analiza cuantitativamente mediante la acumulación de unidades de calor, porque las necesidades energéticas de la planta tienen un intervalo determinado; el cálculo de las unidades de calor en un cultivo estacional se estima para los periodos de crecimiento, desarrollo y cosecha (Łysiak & Szot, 2023). La necesidad de energía térmica para alcanzar una etapa de crecimiento o desarrollo de la planta, se puede calcular registrando la temperatura del ambiente de la misma (Walne & Kambham, 2022).

La fenología estudia la relación entre las etapas de desarrollo vegetal y los factores del medio ambiente (Klepper, 2023). Es un indicador ecológico para entender la respuesta de las plantas a la variación climática (Łysiak & Szot, 2023), su estudio es necesario para mejorar el crecimiento y desarrollo de las plantas, así como facilitar la aplicación del manejo agrícola. La etapa fenológica es un solo punto durante el desarrollo del cultivo de maíz, como la floración; mientras que la fase

fenológica es el tiempo entre dos etapas, como el llenado del grano a maduración (Alsubhi & Alzahrani, 2023; Ren et al., 2022).

La fenología de los cultivos (etapa de crecimiento) varía según el año y la ubicación geográfica, ésta se ve afectada por la variación climática, el tiempo local, las propiedades del suelo y las actividades antropogénicas. La etapa de crecimiento del cultivo comienza con la siembra o emergencia y finaliza con la cosecha. Las fechas de siembra de cultivos dependen de la temperatura y la humedad del suelo, las condiciones climáticas y las prácticas de los agricultores (Gao & Zhang, 2021).

Los factores ambientales, como la temperatura, la precipitación y la radiación solar, controlan directa o indirectamente el momento de los eventos fenológicos o pueden actuar como indicadores que determinan el reloj biológico interno de una planta. Además, los cambios fenológicos que ocurren debido a factores ambientales difieren según la respuesta y la sensibilidad de las partes de la planta, como hojas, tallos, flores, frutos y el sistema de raíces (Alsubhi & Alzahrani, 2023; Guo et al., 2020).

El crecimiento y desarrollo del maíz se puede dividir en distintas etapas vegetativas (V) y reproductivas (R), las tasas a las que se alcanzan diversas etapas de desarrollo pueden cuantificarse mediante la disponibilidad de unidades de calor de cultivo. Con base en la temperatura, las etapas de crecimiento del maíz (desde la emergencia hasta la madurez fisiológica) se presentan en el **Cuadro 3** y se ilustran en la Figura 1 (Vega-Serratos et al., 2018; Linker & Kisekka, 2017).

**Cuadro 3.** Etapas fenológicas del desarrollo del maíz y los GDD necesarios para desarrollar cada etapa.

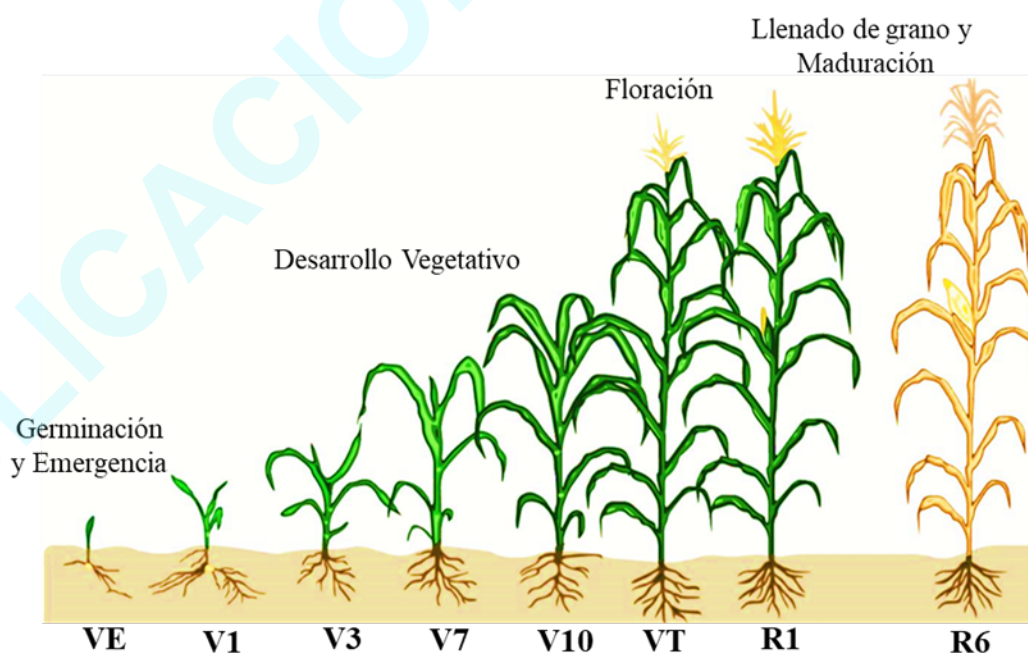
<b>Etapas</b>	<b>Descripción</b>	<b>GDD</b>	<b>Estado fenológico</b>
VE	Emergencia	120	Siembra y Germinación
V1	Primera hoja desarrollada	75-85	
V4	Segunda hoja desarrollada	75-85	
V6	Sexta hoja desarrollada	75-85	Desarrollo vegetativo
V8	Octava hoja desarrollada	75-85	
V12	Doceava hoja desarrollada	75-85	
VT	Panojamiento/Floración	55-65	Floración
R1	Emergencia estigmas/sedosa	de 60-65	

R2	Ampolla	70-75	Llenado de grano
R3	Grano lechoso	80-85	y maduración
R4	Grano masoso	90-95	
R5	Grano dentado	100-105	
R6	Madurez fisiológica	110-130	

**Fuente:** Ransom y Endres, 2020, Comer et al., 2017.

Alam et al. (2021) y Linker & Kisekka (2017) identificaron que la etapa de emergencia (VE) comienza alrededor de 4 a 5 días después de la siembra en condiciones ideales, pero hasta 2 semanas o más en condiciones frescas o secas. Durante las etapas de V1–V5, aparecen de 1 a 5 hojas, en esta etapa, se determina el número potencial de hojas y mazorcas. V6–V8 se presenta a partir de 4 a 6 semanas después de VE. V9-V11 ocurre alrededor de 6 a 8 semanas después de la VE. Para V12, la planta mide aproximadamente 121 cm de altura o más. La floración (VT) comienza alrededor de 9 a 10 semanas después de la emergencia. En la etapa de R1, las plantas de maíz entran en crecimiento reproductivo después de completar la emergencia de las espigas, aunque las etapas reproductivas están determinadas por el desarrollo del grano. R6 corresponde a la madurez fisiológica del grano, en este punto, el grano ha alcanzado su máximo peso en seco, el cual se alcanza aproximadamente 60 días después de la etapa de floración.

**Figura 1.** Etapas de crecimiento del maíz desde emergencia hasta madurez



Fuente: Figura tomada de Alam et al., 2021.

## GDD reportados en México

En el municipio de Celaya, Guanajuato, Noriega et al. (2011) identificaron que son necesarios 757 GDD acumulados en cuatro genotipos de maíz híbrido, desde la emergencia del cultivo hasta la madurez fisiológica. Arista-Cortes et al. (2018) determinaron los GDD necesarios para llegar a la etapa de floración femenina para diferentes accesiones de maíz criollo en los estados de Chiapas, Hidalgo, San Luis Potosí, Veracruz y Yucatán, los cuales corresponden a 1362, 1860, 1713, 1447 y 1139 GDD respectivamente, con diferentes temperaturas bases. Marcial et al. (2021) realizaron una caracterización en La Comarca Lagunera, identificando que la emergencia del maíz se presentó a los 300 GDD, el desarrollo vegetativo se presentó entre 300 a 900 GDD, la formación de espiga fue entre los 900 a 1100 GDD, mientras que el llenado de grano fue de 1100 a 1600 GDD y finalmente la madurez fisiológica correspondió a 1600 a 1650 GDD. Corral-Ruiz et al. (2011) promediaron para el periodo histórico 1961-2003, los GDD necesarios para alcanzar la etapa a madurez en maíz, informando un acumulado de 2061 GDD para los estados de Jalisco, Michoacán, Morelos, Puebla y Chiapas. Sifuentes-Ibarra et al. (2020) calcularon los GDD para un ciclo agrícola durante una serie de 20 años, desde 1998 a 2018. En el Distrito de Riego 075 “Valle del Fuerte” ubicado en Sinaloa, el valor más bajo en el tiempo fue en el ciclo 2006-2007, acumulando un total de 1226 GDD a partir de una temperatura media de 18.1 °C y una duración de 167 días, mientras que el valor más alto, se presentó durante el ciclo 2016-2017, con 1528 GDD con una temperatura media de 20.1 °C y 147 días. Ruiz-Corral et al. (2002) calcularon la duración promedio del ciclo de madurez del híbrido de maíz H311 en diferentes localidades del estado de Zacatecas, el cual alcanzó 1424 GDD en la etapa de madurez fisiológica; a partir de esta información se pudo determinar que el cultivar se clasificaría como de ciclo intermedio-tardío.

## Conclusiones

La temperatura es uno de los factores que influye directa o indirectamente la productividad agrícola, ya que está ligado a los procesos fisiológicos que ocurren en la planta. En el cultivo de maíz, las temperaturas superiores a la óptima afectan negativamente la función fisiológica de la planta, la actividad de las raíces, la floración, el llenado de grano y el rendimiento. Mientras que las temperaturas bajas, retrasan la germinación de las semillas, reducen las tasas de crecimiento e impactan negativamente en el vigor de las plantas de maíz.

Las unidades de calor GDD proporcionan un método relativamente simple para monitorear el desarrollo fisiológico de los cultivos y ajustar las prácticas culturales para que correspondan a las condiciones favorables de la temporada de cultivo. Mediante el empleo del índice de los GDD, se permite identificar el momento óptimo para mejorar las prácticas agrícolas del cultivo de maíz, estimar la cantidad de crecimiento y desarrollo estacional del cultivo, predecir el crecimiento, la madurez o el rendimiento del cultivo.

Se recomienda usar los GDD promedio, ya que pueden ser la base para comprender que a veces pueden ocurrir grandes variaciones entre lugares y entre años debido a cambios en los patrones climáticos. Además, los GDD funcionan como indicador para determinar el impacto que ocasiona el cambio climático en el cultivo de maíz, ya que, con el aumento de la temperatura global se espera que este índice incremente su promedio en las diferentes zonas de producción agrícola, lo cual conlleva a un desbalance natural por parte de la planta de maíz, en el cual, su desarrollo será más rápido y por ende podría sufrir un cambio positivo o negativo en su producción.

## Referencias

- Alam, M. R., Nakasathien, S., Molla, M. S. H., Islam, M. A., Maniruzzaman, M., Ali, M. A., Sarobol, E., Vichukit, V., Hassan, M. M., Dessoky, E. S., Abd El-Ghany, E. M., Brestic, M., Skalicky, M., Jagadish, S. V. K., & Hossain, A. (2021). Kernel water relations and kernel



filling traits in maize (*Zea mays* L.) are influenced by water-deficit condition in a tropical environment. *Frontiers in Plant Science*, 12(10), 1–18. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.717178>.

Alsubhi, N. H., & Alzahrani, S. M. (2023). Plant phenology: definition, history, and response to environmental factors. *Egyptian Journal of Botany*, 640(1), 49–580. <https://doi.org/10.21608/ejbo.2023.209652.2323>.

Anandhi, A. (2016). Growing degree days - Ecosystem indicator for changing diurnal temperatures and their impact on maize growth stages in Kansas. *Ecological Indicators*, 61(1), 149–158. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.08.023>.

Arista-Cortes, J., Quevedo Nolasco, A., Zamora Morales, B. P., Bauer Mengelberg, R., Sonder, K., & Lugo Espinosa, O. (2018). Temperaturas base y grados días desarrollo de 10 accesiones de maíz de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 9(5), 1023–1033. <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i5.1507>.

Barrientos-Blanco, J. A., Moraes, L., Lawrence, J. R., Havekes, C. D., Cerosaletti, P., Lucas, A., Romack, J., Ketterings, Q. M., & Reed, K. F. (2024). Partitioning of nutrient variation in alfalfa and maize silage by source on New York dairy farms. *Journal of Dairy Science*, 107(8), 5722–5737. <https://doi.org/10.3168/jds.2023-24287>.

Beegum, S., Walne, C. H., Reddy, K. N., Reddy, V., & Reddy, K. R. (2023). Examining the maize seedling emergence–temperature relationship for recent hybrids: insights from experimental studies. *Plants*, 12(21), 3699. <https://doi.org/10.3390/plants12213699>.

Comer, N., Robinson, D., Morand, A., Douglas, A., Sparling, E., Auld, H., Eyzaguirre, J., De La Cuevo, B. P. & Lafrenière, C. (2017). The Ontario climate and agriculture assessment framework (OCAAF): design document. A collaboration between the Ontario centre for climate impacts and adaptation resources, risk sciences international, ESSA technologies Ltd. and Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue. Funded in part through the Ontario Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs.

Corral-Ruiz, A. J., García-Medina, G., Díaz-Ramírez, J. L., López-Flores, H. E., Ojeda-Ramírez, G., Olmos-Manrique, J. D., Villaseñor-Zarazúa, P., Eguiarte-González, D. R., Padilla-Díaz, G., & De la mora-Orozco, C. (2011). Cambio climático y sus implicaciones en cinco zonas productoras de maíz en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2, 309–323.



- Cruz-González, A., Arteaga-Ramírez, R., Sánchez-Cohen, I., Soria-Ruiz, J., & Monterroso-Rivas, A. I. (2024). Impacts of climate change on maize production in Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 15(1), e3327. <https://doi.org/10.29312/remexca.v15i1.3327>.
- Elnesr, M. N., & Alazba, A. A. (2016). An integral model to calculate the growing degree-days and heat units, a spreadsheet application. *Computers and Electronics in Agriculture*, 124, 37–45. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.03.024>.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). (2024).. FAOSTAT-Agriculture URL: <https://www.fao.org/faostat/en/#home>. Consultada el 03 de Julio de 2024.
- Gao, F., & Zhang, X. (2021). Mapping crop phenology in near real-time using satellite remote sensing: challenges and opportunities. *Journal of Remote Sensing*, 2021, 8379391. <https://doi.org/10.34133/2021/8379391>.
- Gilmore, E. C., & Rogers, J. S. (1958). Heat Units as a Method of Measuring Maturity in Maize 1. *Agronomy Journal*, 50(10), 611–615. <https://doi.org/10.2134/agronj1958.00021962005000100014x>.
- Guo, Y., Wu, W., Liu, Y., Wu, Z., Geng, X., Zhang, Y., Bryant, C. R., & Fu, Y. (2020). Impacts of climate and phenology on the yields of early mature rice in China. *Sustainability*, 12(23), 10133. <https://doi.org/10.3390/su122310133>.
- Jan, B., Anwar Bhat, M., Bhat, T. A., Yaqoob, M., Nazir, A., Ashraf Bhat, M., Mir, A. H., Wani, F. J., Kumar Singh, J., Kumar, R., Gasparovic, K., He, X., Nasif, O., & Tan Kee Zuan, A. (2022). Evaluation of seedling age and nutrient sources on phenology, yield and agrometeorological indices for sweet maize (*Zea mays saccharata* L.). *Saudi Journal of Biological Sciences*, 29(2), 735–742. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.10.010>.
- Jiang, H., Hu, H., Li, B., Zhang, Z., Wang, S., & Lin, T. (2021). Understanding the non-stationary relationships between maize yields and meteorology via a spatiotemporally varying coefficient model. *Agricultural and Forest Meteorology*, 301-302, 108340. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108340>.
- Khalilzadeh, Z., & Wang, L. (2022). Maize planting and harvest scheduling under storage capacity and growing degree units uncertainty. *Scientific Reports*, 12(1), 22482. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-25797-9>.
- Kim, K. H., & Lee, B. M. (2023). Effects of climate change and drought tolerance on maize growth. *Plants*, 12(20), 3548. <https://doi.org/10.3390/plants12203548>.



- Klepper, B. (2023). Growing-degree days and development of the wheat plant Oregon. URL: <https://cropwatch.unl.edu/documents/gdd.pdf> (2023). Consultada el 22 de marzo de 2024.
- Kukal, M. S., & Irmak, S. (2018). U.S. Agro-climate in 20th century: growing degree days, first and last frost, growing season length, and impacts on crop yields. *Scientific Reports*, 8(1), 6977. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-25212-2>.
- Leguizamón, E. S., Verdelli, D. M., & Acciaresi, H. (2012). Variations in weed population densities, rate of change and community diversity in RR-soybeans and RR-maize strip crops under two herbicide strategies. *Planta daninha*, 30(4), 871–882. <https://orcid.org/10.1590/S0100-83582012000400022>.
- Linker, R., & Kisekka, I. (2017). Model-based deficit irrigate, on of Maize in Kansas. *Transactions of the ASABE*, 60(6), 2011–2022. <https://doi.org/10.13031/trans.12341>.
- Lozano, P. (2021). Determinación del momento oportuno de cosecha de maíz (*Zea mays* L.) para la producción de semilla. Tesis de Maestría en Ciencias. Postgrado en Recursos Genéticos y Productividad. Colegio de Postgraduados.
- Lu, M., Sun, H., Yan, D., Xue, J., Yi, S., Gui, D., Tuo, Y., & Zhang, W. (2021). Projections of thermal growing season indices over China under global warming of 1.5 °C and 2.0 °C. *Science of the Total Environment*, 781(1), 146774. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146774>.
- Łysiak, G. P., & Szot, I. (2023). The use of temperature based indices for estimation of fruit production conditions and risks in temperate climates. *Agriculture*, 13(5), 960. <https://doi.org/10.3390/agriculture13050960>.
- Mangani, R., Gunn, K. M., & Creux, N. M. (2023). Projecting the effect of climate change on planting date and cultivar choice for South African dryland maize production. *Agricultural and Forest Meteorology*, 341(8), 109695. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109695>.
- Marcial, M. de J., Ontiveros, R. E., Jiménez, S. I., Sifuentes, E., Ojeda, W. S., Sifuentes, E., & Ojeda, W. (2021). Estimación del coeficiente de cultivo basado en la metodología cobertura vegetal-índices de vegetación. Congreso Nacional de Riego, Drenaje y Biosistemas, 1–9.
- Mathieu, J. A., & Aires, F. (2018). Assessment of the agro-climatic indices to improve crop yield forecasting. *Agricultural and Forest Meteorology*, 253–254, 15–30. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.01.031>.

- Mishra, S., Spaccarotella, K., Gido, J., Samanta, I., & Chowdhary, G. (2023). Effects of heat stress on plant-nutrient relations: an update on nutrient uptake, transport, and assimilation. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(21), 15670. <https://doi.org/10.3390/ijms242115670>.
- Neamatollahi, E., Bannayan, M., Jahansuz, M. R., Struik, P., & Farid, A. (2012). Agro-ecological zoning for wheat (*Triticum aestivum*), sugar beet (*Beta vulgaris*) and maize (*Zea mays*) on the Mashhad plain, Khorasan Razavi province. *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 15(1), 99–112. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2012.05.002>.
- Noriega, G. L. A., Preciado, O. R., Andrio, E. E., Terrón, I. A. D., & Covarrubias, P. J. (2011). Fenología, crecimiento y sincronía floral de los progenitores del híbrido de maíz qpm h-374c\* phenology, plant growth and floral synchrony of the parental lines of h-374c qpm maize hybrid. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2(4), 489–500.
- Ojeda-Bustamante, W., Sifuentes-Ibarra, E., & Unland-Weiss, H. (2006). Programación integral del riego en maíz en el norte de Sinaloa, México. *Agrociencia*, 40(1), 13–25.
- Ortez, O. A., Lindsey, A. J., Thomison, P. R., Coulter, J. A., Singh, M. P., Carrijo, D. R., Quinn, D. J., Licht, M. A., & Bastos, L. (2023). Maize response to long-term seasonal weather stressors: A review. *Crop Science*, 63(6), 3210–3235. <https://doi.org/10.1002/csc.2.21101>.
- Prasad, R., Gunn, S. K., Rotz, C. A., Karsten, H., Roth, G., Buda, A., & Stoner, A. M. K. (2018). Projected climate and agronomic implications for maize production in the Northeastern United States. *PLoS ONE*, 13(6), e0198623. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0198623>.
- Rai, S. K., Ghosh, P. K., Kumar, S., & Singh, J. B. (2014). Research in agrometeorology on fodder crops in central India—An overview. *Atmospheric and Climate Sciences*, 4(1), 78–91. <https://doi.org/10.4236/acs.2014.41011>.
- Ransom, J. & Endres G. (2020). Maize Growth and Management Quick Guide [A1173]. Fargo: North Dakota State University. URL: <https://www.ag.ndsu.edu/publications/crops/maize-growth-and-management-quick-guide>. Consultada el 25 de junio de 2024.
- Ren, D., Engel, B., & Tuinstra, M. R. (2022). Crop improvement influences on water quantity and quality processes in an agricultural watershed. *Water Research*, 217(1), 118353. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118353>.
- Ruiz-Corral, J. A., López, H. E. F., Díaz, J. L. R., & Eguiarte, D. R. G. (2002). Cardinal Temperatures and Length of Maturation Cycle. *Agrociencia*, 36(5), 569–577.

- Sánchez, B., Rasmussen, A., & Porter, J. R. (2014). Temperatures and the growth and development of maize and rice: A review. *Global Change Biology*, 20(2), 408–417. <https://doi.org/10.1111/gcb.12389>.
- Satapathy, S. C., Bhateja, V., Favorskaya, M. N., & Adilakshmi, T. (Eds.). (2021). Smart Computing Techniques and Applications. Smart Innovation, Systems and Technologies. doi:10.1007/978-981-16-1502-3.
- Sharma, A., Deepa, R., Sankar, S., Pryor, M., Stewart, B., Johnson, E., & Anandhi, A. (2021). Use of growing degree indicator for developing adaptive responses: A case study of cotton in Florida. *Ecological Indicators*, 124(1), 107383. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107383>.
- Sifuentes-Ibarra, E., Ojeda-Bustamante, W., Ontiveros-Capurata, R. E., & Sánchez-Cohen, I. (2020). Improving the monitoring of maize phenology in large agricultural areas using remote sensing data series. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 18(3), e1204.
- Vega-Serratos, B. E., Domínguez-Mora, R., & Posada-Vanegas, G. (2018). Seasonal flood risk assessment in agricultural areas. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 9(3), 92–127. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2018-03-04>.
- Qian, Y., Yang, Z., Di, L., Rahman, M. S., Tan, Z., Xue, L., Gao, F., Yu, E. G., & Zhang, X. (2019). Crop Growth Condition Assessment at County Scale Based on Heat-Aligned Growth Stages. *Remote Sensing*, 11(20), 2439. <https://doi.org/10.3390/rs11202439>
- Walne, C. H., & Kambham, R. R. (2022). Temperature effects on the shoot and root growth, development, and biomass accumulation of maize (*Zea mays* L.). *Agriculture*, 12(4). <https://doi.org/10.3390/agriculture12040443>.
- Waqas, M. A., Wang, X., Zafar, S. A., Noor, M. A., Hussain, H. A., Azher Nawaz, M., & Farooq, M. (2021). Thermal stresses in maize: Effects and management strategies. *Plants*, 10(2), 293. <https://doi.org/10.3390/plants10020293>.
- Žydelis, R., Weihermüller, L., & Herbst, M. (2021). Future climate change will accelerate maize phenological development and increase yield in the Nemoral climate. *Science of the Total Environment*, 784, 147175. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147175>.