



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN

**Acumulación de unidades calor y su
relación con la fenología del cultivo de frijol**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERA AGRÍCOLA

P R E S E N T A:

AMANDA LÓPEZ MAYA

ASESOR: Dr. GUSTAVO MERCADO MANCERA

CUAUTITLÁN IZCALLI, ESTADO DE MÉXICO 2024



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN
SECRETARÍA GENERAL
DEPARTAMENTO DE TITULACIÓN

ASUNTO: VOTO APROBATORIO



DR. DAVID QUINTANAR GUERRERO
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLAN
PRESENTE

ATN: DRA. MARÍA DEL CARMEN VALDERAMA BRAVO
Jefa del Departamento de Titulación
de la FES Cuautitlán.

Con base en el Reglamento General de Exámenes, y la Dirección de la Facultad, nos permitimos comunicar a usted que revisamos el: **Trabajo de Tesis.**

Acumulación de unidades calor y su relación con la fenología del cultivo de frijol

Que presenta la pasante: **Amanda López Maya.**
Con número de cuenta: **418068485** para obtener el título de: **Ingeniera Agrícola**

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el **EXAMEN PROFESIONAL** correspondiente, otorgamos nuestro **VOTO APROBATORIO.**

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cuautitlán Izcalli, Méx. a 07 de diciembre de 2023.

PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO

	NOMBRE	FIRMA
PRESIDENTE	Dr. Gustavo Mercado Mancera	
VOCAL	Dr. Julio Cesar Corzo Sosa	
SECRETARIO	M. en C. Nancy Berenice Martínez Valles	
1er. SUPLENTE	Ing. Priscila Anaid Rivera Cruz	
2do. SUPLENTE	Ing. Ana Karen Granados Mayorga	

NOTA: los sinodales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional.

MCVB/ntm*

AGRADECIMIENTOS

A mi mamá, que es mi mayor soporte y fortaleza en la vida, que se mantuvo a mi lado y no me dejó cuando quise desistir, porque sin sus consejos y enseñanzas no sería la persona que hoy soy.

A mi papá, que a pesar de la distancia me ha brindado su apoyo en todo momento y me ha dado consejos para concluir esta etapa.

A mis hermanas Mez y Dani que son mis más grandes compañeras de vida, que están para mí siempre que lo necesito y que de alguna manera hacen que los momentos difíciles sean más ligeros.

A mis amigos, con quienes compartí esta etapa universitaria y me brindaron su apoyo, consejos y compañía.

A mi profesor y asesor el Dr. Gustavo Mercado, por ser mi guía en la elaboración de este trabajo y tenerme paciencia en cada paso.

A los sinodales, que con sus comentarios y sugerencias mejoraron este trabajo.

A la Universidad, que contribuyó a mi formación como Ingeniera Agrícola y me brindó las herramientas para llegar a esta meta.

DEDICATORIA

A mi familia, por su apoyo incondicional, porque este logro es tanto mío como suyo y hoy lo celebro junto a ustedes.

CONTENIDO

	Página
ÍNDICE DE FIGURAS	<i>i</i>
ÍNDICE DE TABLAS	<i>ii</i>
RESUMEN	<i>iii</i>
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivo general	2
1.1.1. Objetivos particulares	2
II. ANTECEDENTES	3
2.1. Fenotipo vegetal	3
2.1.1. Crecimiento vegetal	3
2.1.1.1. Variables que determinan el crecimiento vegetal	4
2.1.2. Desarrollo vegetal	5
2.1.2.1. Variables que determinan el desarrollo vegetal	5
2.2. Acumulación de calor	6
2.2.1. Importancia de las unidades calor	6
2.2.2. Aplicación de las unidades calor en la agricultura	7
2.3. Métodos de cálculo de unidades calor	8
2.4. Descripción fenológica del frijol	9
2.5. Investigaciones sobre el uso de las unidades calor en la agricultura	11
III. MATERIALES Y MÉTODOS	15
3.1. Localización geográfica	15
3.1.1. Descripción climática de la zona de estudio	16
3.2. Metodología	16
3.2.1. Variables evaluadas	17
3.3. Materiales	17

	Página
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	18
4.1 Acumulación de unidades calor	18
4.2 Fenología del frijol var. Vaquita negro con base a la acumulación de unidades calor	21
4.3 Importancia en las actividades agrícolas	30
V. CONCLUSIONES	32
VI. LITERATURA CITADA	33

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Fenología del frijol (calameo.com, 2023).	11
Figura 2. Localización geográfica del municipio de Cuautitlán Izcalli. México (Infoabe, 2023).	15
Figura 3. Vista de la estación meteorológica Almaraz, FES-C, UNAM.	16
Figura 4. Unidades calor acumuladas del cultivo de frijol var. Vaquita negro, ciclo primavera-verano 2014-2022 y etapa fenológica. Cuautitlán Izcalli, Méx.	18
Figura 5. Tendencia de la temperatura media diaria durante el ciclo de cultivo de frijol, del año 2014 al 2022. Cuautitlán Izcalli, Méx.	19
Figura 6. Ocurrencia de lluvia diaria durante el ciclo de cultivo de frijol, del año 2014 al 2022. Cuautitlán Izcalli, Méx.	20
Figura 7. Días acumulados por etapa fenológica, del cultivo de frijol var. Vaquita negro, de los ciclos primavera-verano 2014 al 2022, Cuautitlán Izcalli, México.	22
Figura 8. Siembra y fase de emergencia del cultivo de frijol var. Vaquita negro (Elaboración personal).	23
Figura 9. Días a emergencia del cultivo de frijol var. Vaquita negro por año de estudio, Cuautitlán Izcalli, Méx.	24
Figura 10. Etapa vegetativa del frijol var. Vaquita negro (Elaboración personal).	24
Figura 11. Duración de la etapa vegetativa del cultivo de frijol var. Vaquita negro por año de estudio, Cuautitlán Izcalli, Méx.	25
Figura 12. Etapa reproductiva de frijol var. Vaquita negro (Elaboración personal).	26
Figura 13. Duración de la etapa reproductiva del cultivo de frijol var. Vaquita negro por año de estudio, Cuautitlán Izcalli, Méx.	26
Figura 14. Etapa de fructificación del frijol var. Vaquita negro (Elaboración personal).	27
Figura 15. Duración de la etapa de fructificación del cultivo de frijol var. Vaquita negro por año de estudio, Cuautitlán Izcalli, Méx.	27
Figura 16. Etapa de madurez y cosecha de frijol var. Vaquita negro (Elaboración personal).	28
Figura 17. Duración de la etapa de madurez del cultivo de frijol var. Vaquita negro por año de estudio, Cuautitlán Izcalli, Méx.	29
Figura 18. Duración del ciclo biológico del cultivo de frijol var. Vaquita negro por año de estudio, Cuautitlán Izcalli, Méx.	29
Figura 19. Rendimiento del cultivo de frijol var. Vaquita negro ($t\ ha^{-1}$) por año de estudio, Cuautitlán Izcalli, Méx.	30

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1. Fenología del frijol (SIAP, 2019).	10
Tabla 2. Unidades calor acumuladas del cultivo de frijol var. Vaquita negro, ciclo primavera-verano 2014-2022 y etapa fenológica. Cuautitlán Izcalli, Méx.	18
Tabla 3. Días acumulados por etapa fenológica del cultivo de frijol var. Vaquita negro, de los ciclos primavera-verano 2014 al 2022, Cuautitlán Izcalli, México.	21
Tabla 4. Promedio de días y unidades calor acumulados por etapa fenológica, del cultivo de frijol var. Vaquita negro, de los ciclos primavera-verano 2014 al 2022, Cuautitlán Izcalli, México.	22

RESUMEN

El crecimiento y desarrollo de un cultivo están determinados por la acumulación de calor, y junto a la disponibilidad de humedad en el suelo, influyen en la duración de las diversas etapas fenológicas de las plantas. Se le ha dado seguimiento al cultivo de frijol en los últimos años, por lo que este trabajo tuvo como objetivo el analizar la acumulación de calor y su relación con la fenología del cultivo de frijol, en el área de Cuautitlán Izcalli, Estado de México. Se consideraron los datos diarios de temperatura media y de precipitación. Además, se emplearon los datos de campo de la fenología del frijol, registrados del año de 2014 al 2022. Fue determinada la acumulación de calor de cada etapa fenológica, con una temperatura base de 7 °C. Los resultados mostraron una variación en las condiciones climáticas, que influyeron en la duración de las diversas etapas fenológicas del frijol. En general, se acumularon 170.2, 453.6, 152.0, 167.9, 199.9 y 198.6 UC, para las etapas de germinación, vegetativa, reproductiva, fructificación, madurez fisiológica y maduración-cosecha, respectivamente. La duración del ciclo del cultivo osciló entre 107 y 128 días, en los años 2015 y 2017-2020-2021, respectivamente. En particular, la etapa vegetativa es la que mayor duración tuvo, con 41 días en promedio, y la menor fue la reproductiva con 13 días. El ciclo del frijol var. Vaquita negro tuvo una duración promedio de 120 días y una acumulación de 1,342.2 UC. El uso de las unidades calor ayuda a pronosticar la aparición de las diversas fases de los cultivos, así como, la selección de los cultivos más adecuados con base al potencial agroclimático de una zona en particular, estimar épocas de siembra y cosecha, entre otros. La falta de información y observaciones de campo sobre la fenología de los cultivos y la acumulación de calor durante el ciclo del cultivo hace necesario continuar investigando y generar información para el apoyo a los productores y con ello, lograrse mayores rendimientos.

I. INTRODUCCIÓN

El frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) es uno de los cultivos más importantes en México, por la superficie sembrada y la producción obtenida; se siembra en todas las regiones agrícolas del país y es componente fundamental de la dieta del mexicano. Es una de las leguminosas más importantes para el consumo humano directo; es considerado como una fuente económica y esencial de proteínas, minerales como hierro y zinc, y carbohidratos como fibra dietaria y oligosacáridos (INIFAP, 2021).

El ciclo biológico de muchos organismos depende estrechamente de la temperatura, este hecho ha llevado al establecimiento del concepto unidades calor (UC), que ha sido utilizado con éxito en la predicción del desarrollo de diferentes organismos en distintas partes del mundo. Hoy en día ha resultado mejor evaluar el tiempo de manera fisiológica, ya que, está determinado únicamente por la temperatura y si el tiempo es evaluado de manera cronológica (días) este se verá influenciado por todas las variables ambientales (ProNAP, 2015).

Barrera *et al.* (2010) señalaron que el crecimiento de los diferentes órganos de las plantas es un proceso fisiológico complejo, que depende directamente de la fotosíntesis, la respiración, la división celular, la elongación, la diferenciación, entre otros; y la temperatura del aire es un elemento climático que promueve el aumento de la masa vegetativa (Morales *et al.*, 2006).

Por su parte Ruiz (2018), indicó que la temperatura controla la tasa de desarrollo de muchos organismos; plantas y animales, que necesitan cierta acumulación de calor para poder pasar de una etapa de desarrollo a la siguiente.

Una UC es una unidad que combina el tiempo y la temperatura para estimar el desarrollo de un organismo a partir de un punto a otro en su ciclo de vida. Las plantas deben acumular determinada cantidad de calor medida en grados día (GD) para pasar de una etapa de desarrollo a otra (Nájera, 2016).

El método residual es uno de los más utilizados para el cálculo de las UC, y las estima con base en la ocurrencia de temperatura en un intervalo, entre la temperatura máxima y mínima para el desarrollo, tomando en cuenta la temperatura umbral inferior o temperatura base (Ruisánchez *et al.*, 2020).

Los estudios fenológicos permiten entender las respuestas de los organismos a los factores ambientales, así como las etapas críticas de las plantas cultivadas, lo cual ayuda a maximizar el uso eficiente de los insumos disponibles (Vázquez *et al.*, 2008).

El frijol presenta diez etapas fenológicas a saber: V0 Germinación, V1 Emergencia, V2 Hojas primarias, V3 Primeras hojas trifoliadas, V4 Tercera hoja trifoliada, R5 Prefloración, V6 Floración, R7 Formación de las vainas, R8 Llenado de vainas y R9 Maduración (SIAP, 2019).

Para el presente trabajo se plantaron los siguientes objetivos:

1.1. Objetivo general

- Analizar la acumulación de calor y su relación con la fenología del cultivo de frijol, en el área de Cuautitlán Izcalli, Estado de México.

1.1.1. Objetivos particulares

- Determinar la acumulación de calor en el área de influencia de la estación meteorológica Almaraz, con datos climáticos del año 2014 al 2022, en Cuautitlán Izcalli, Estado de México.
- Describir la fenología del cultivo de frijol con base a la acumulación de calor en la zona de estudio, del año de 2014 al 2022.
- Razonar la importancia del estudio de la acumulación de unidades calor en las actividades agrícolas.

II. ANTECEDENTES

2.1. Fenotipo vegetal

El fenotipo es el rasgo que se observa, bien como una característica física o como un comportamiento. Este depende del genotipo, y adicionalmente es influenciado por factores ambientales y nutricionales (Zita, s/f). En una planta, resulta de la interacción de su genoma con condiciones ambientales cambiantes, e involucra procesos de regulación génica que modulan respuestas de adaptación, aclimatación y tolerancia a condiciones desfavorables (Gastón *et al.*, 2013).

2.1.1. Crecimiento vegetal

Se define al crecimiento como el aumento irreversible de volumen de una célula, tejido, órgano o individuo, generalmente acompañado de un aumento de masa; durante el crecimiento de una planta ocurren muchos cambios morfogénéticos y fisiológicos, sujetos a un control muy complejo de factores internos y externos (Courtis, 2014). El crecimiento denota los cambios cuantitativos que tienen lugar durante el desarrollo.

Fernández *et al.* (1985) definieron al crecimiento como un cambio en volumen o en peso. Es un fenómeno cuantitativo que puede ser medido con base en algunos parámetros tales como anchura, longitud, acumulación de materia seca, número de nudos, índice de área foliar, entre otros.

Hunt (1978), Radosevich y Holt (1984) y Gardner *et al.* (1985) definieron el crecimiento como un incremento irreversible en el tamaño de las plantas, el cual a menudo es acompañado por cambios en la forma. Otros autores indican que el crecimiento es un aumento constante en el tamaño de un organismo, acompañado de procesos como la morfogénesis y la diferenciación celular (Taiz y Zeiger, 2006).

Barrera *et al.* (2010) definieron que el crecimiento de los diferentes órganos de las plantas es un proceso fisiológico complejo, que depende directamente de la fotosíntesis, la respiración, la división celular, la elongación, la diferenciación, entre otros, y que además está influenciada por factores como temperatura, intensidad de luz, densidad de población, calidad de la semilla, disponibilidad de agua y de nutrientes.

2.1.1.1. Variables que determinan el crecimiento vegetal

El crecimiento vegetal puede estar determinado por distintas variables como lo es la disponibilidad de agua, temperatura, humedad, radiación solar, entre otras (López, 2023).

La disponibilidad de agua es una condición esencial para la germinación de las semillas, ya que determina la imbibición y posterior activación de procesos metabólicos, como rehidratación, mecanismos de reparación (membranas, proteínas y ADN), elongación celular y aparición de la radícula. En condiciones naturales, las plantas deben sincronizar sus ciclos de crecimiento y reproducción con un adecuado abastecimiento hídrico. Esto es especialmente importante en ambientes áridos, donde los eventos de lluvia son esporádicos o inexistentes. La disponibilidad de agua durante el crecimiento de una planta madre afecta el desarrollo de sus semillas, alterando su capacidad germinativa positiva o negativamente (Maldonado *et al.*, 2002).

El estrés térmico limita el crecimiento en muchas especies de plantas y áreas de cultivo, la supresión del crecimiento está relacionada con cambios en los procesos fisiológicos incluyendo las relaciones hídricas. A elevadas temperaturas, los niveles de determinadas enzimas pueden disminuir por un desequilibrio entre su velocidad de formación y su velocidad de degradación, a favor de esta última. En general, aumentos de temperatura en el rango de 0 a 30 °C promueven la apertura estomática y temperaturas superiores a 30 o 40 °C favorecen el cierre estomático (Morales *et al.*, 2006).

La radiación solar es otro de los elementos ambientales importantes, porque ayuda a controlar los diversos ecosistemas (terrestres y acuáticos), a través de procesos fotobiológicos como: fotosíntesis, fotoperiodo y fototropismos; influye, además, sobre otros factores ambientales, como la temperatura y humedad, y sus ciclos naturales (diarios y anuales) que determinan la distribución final de los organismos (Montero, 2022).

La radiación solar es fuente, de energía, para el crecimiento y desarrollo de las plantas e insumo principal de la bioproductividad vegetal. La parte de la radiación solar que favorece la fotosíntesis, se denomina radiación fotosintéticamente activa o luz (PAR), en la que, la radiación incidente, determina las características agroclimáticas de cada zona (Montero, 2022).

2.1.2. Desarrollo vegetal

Fernández *et al.* (1985) señaló que el desarrollo es cualitativo, que se refiere a procesos de diferenciación o cambios estructurales y fisiológicos conformados por una serie de fenómenos o eventos sucesivos, por ejemplo, el evento de la aparición de botones florales o racimos marca el cambio de la fase vegetativa a la fase reproductiva de la planta.

El desarrollo es el conjunto de eventos que contribuyen a la progresiva elaboración del cuerpo de la planta y que la capacitan para obtener alimento, reproducirse y adaptarse plenamente a su ambiente. El desarrollo comprende dos procesos básicos: crecimiento y diferenciación. El término crecimiento, denota los cambios cuantitativos que tienen lugar durante el desarrollo, mientras que la diferenciación se refiere a los cambios cualitativos. El término desarrollo se considera sinónimo de morfogénesis. Dicho esto, el desarrollo (o morfogénesis) puede definirse, por tanto, como el conjunto de cambios graduales y progresivos en tamaño (crecimiento), estructura y función (diferenciación) que hace posible la transformación de un cigoto en una planta completa (Segura, 2013).

2.1.2.1. Variables que determinan el desarrollo vegetal

En extensas áreas del mundo, la disponibilidad de humedad en el suelo limita del crecimiento, desarrollo y rendimiento de los cultivos en los sistemas agrícolas de temporal. Las temperaturas altas durante la estación de crecimiento reducen severamente el rendimiento de grano y pueden acentuar el efecto del estrés hídrico en las etapas fenológicas más sensitivas del cultivo. También afectan los diferentes procesos de crecimiento y desarrollo de las plantas; pueden reducir la tasa de fotosíntesis a través de cambios en la membrana, organización estructural y propiedades físico-químicas de los tilacoides (Gómez *et al.*, 2011).

Asimismo, la temperatura ambiental determina qué tan rápido se desarrollan los insectos y plantas. El desarrollo de estos organismos empieza solamente cuando la temperatura está arriba de un cierto punto crítico o temperatura umbral inferior de desarrollo. A medida que la temperatura aumenta por arriba de este punto crítico, la velocidad de desarrollo se incrementa en forma casi lineal hasta alcanzar un punto máximo, para luego decaer, debido a la degradación enzimática causada por temperaturas altas, hasta que el organismo muere al alcanzar una temperatura letal (Medina y Mena, 2007).

2.2. Acumulación de calor

Las plantas deben “consumir” o “acumular” determinada cantidad de calor medida en grados/día o unidades calor (UC), desde la germinación hasta la madurez. Dicha cantidad es aproximadamente constante de acuerdo con la especie considerada y se le denomina constante térmica (Medina y Mena, 2007). La temperatura controla la tasa de desarrollo de muchos organismos, que requieren de la acumulación de cierta cantidad de calor para pasar de un estado a otro en su ciclo de vida. La medida de este calor acumulado se conoce como Tiempo Fisiológico, y teóricamente este concepto involucra la combinación adecuada de grados de temperatura y el tiempo cronológico, el cual siempre es el mismo (De la Rosa, 2013).

2.2.1. Importancia de las unidades calor

La temperatura controla la tasa de desarrollo de muchos organismos; plantas y animales, incluidos insectos y microorganismos, que requieren una cierta acumulación de calor para poder pasar de una etapa de desarrollo a la siguiente (Ruiz, 2018). Las unidades calor son una forma de medir la acumulación de calor a través del tiempo, esto es debido a que la temperatura ambiental impacta en el desarrollo y crecimiento de la mayoría de los cultivos, plagas y enfermedades (Ramírez *et al.*, 2019).

Cada especie vegetal tiene cierta temperatura crítica, llamadas temperaturas cardinales, que definen los requerimientos de calor necesarios para su crecimiento y desarrollo; estas temperaturas generalmente incluyen la mínima (la temperatura más baja a la cual la planta crece), la óptima (la temperatura a la cual el crecimiento y desarrollo son máximos) y la máxima (la temperatura más alta a la cual la planta crece). A la temperatura más baja a la cual la planta crece y la temperatura más alta a la cual la planta crece también se les llama temperaturas umbrales. Además de las temperaturas cardinales existen las temperaturas letales, las cuales provocan la muerte de la planta. Estas temperaturas letales son más extremas que los valores máximos o mínimos (Medina y Mena, 2007).

2.2.2. Aplicación de las unidades calor en la agricultura

De acuerdo con Mercado (2023), las unidades térmicas se aplican para la agricultura en:

- Zonificación de variedades de cultivo, de acuerdo con las U.C. disponibles en la región y a las requeridas por el cultivo.
- Definición de fechas de siembra.
- Predicción de fases fenológicas de los cultivos, hasta la época de cosecha.
- Programación de labores de cultivo.
- Establecimiento de calendarios de riegos.
- Medición y estudio de etapas fenológicas.
- Herramienta en el manejo integrado de plagas.
- Diseño y ejecución de programas de asistencia técnica.
- Mapas de isófanos.

Para el caso de predecir los eventos del ciclo biológico de un insecto, lo ideal es utilizar unidades calor en lugar de los datos originales de temperatura. Con relación a la biología y ecología del insecto plaga, conocer el momento en que ocurre el pico poblacional de huevos o la eclosión de larvas de primer instar, permite optimizar la liberación de parasitoides, o la aplicación de un insecticida para controlar las larvas de un insecto plaga justo en el momento cuando son más susceptibles, y a la vez, ocasionar el menor daño al cultivo (Medina y Mena, 2007).

Por su parte, Ruisánchez (2020) señaló que el cálculo de unidades calor en insectos permite una toma de decisión más acertada en el manejo integrado de estos. Así mismo este cálculo ayuda a determinar el momento adecuado para la liberación de insectos benéficos ya que su desarrollo biológico está relacionado de igual modo con las condiciones abióticas.

2.3. Métodos de cálculo de unidades calor

Existen varios métodos para calcular la acumulación de calor, entre ellos se tienen los siguientes:

a) Método directo. Procedimiento propuesto por Réaumur para calcular la constante térmica. En él se suman las temperaturas medias diarias, con excepción de los valores bajo cero, entre dos límites.

Mensual: se suman todas las temperaturas medias diarias mayores a 0°C, durante la totalidad de días de un mes determinado.

Anual: se suman todas las temperaturas medias diarias mayores a 0°C, durante los 365 días del año.

b) Método Residual. En este método las UC se estiman con base en la ocurrencia de temperaturas en un intervalo entre la temperatura máxima y mínima para el desarrollo de las plantas, tomando en cuenta, además, la temperatura umbral inferior o temperatura base (T_b) y no se requieren datos previamente calculados, haciéndolo sencillo y práctico (Ruisánchez *et al.*, 2020).

$$UC = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{2} = T_b$$

Donde:

UC = Unidades calor.

T_{\max} = Temperatura máxima.

T_{\min} = Temperatura mínima.

T_b = Temperatura base.

c) Método exponencial. En el método mencionado se obtiene la constante térmica comparando las velocidades de las reacciones físico-químicas a una determinada temperatura, con la velocidad de la reacción correspondiente a 4.5 °C (velocidad unidad). En cada caso el exponente se calcula restando a la temperatura media diaria el valor 4.5 °C y el residuo obtenido se divide entre 10°C. Según esta forma exponencial, la eficiencia de las temperaturas se eleva en forma notable para las temperaturas altas. Sin embargo, se ha comprobado, que a partir de las temperaturas óptimas cualquier aumento térmico, no resulta beneficioso sino perjudicial.

d) Método termofisiológico. La eficiencia de una temperatura se establece comparando la velocidad de crecimiento de una planta de maíz expuesta a esa temperatura, respecto de la velocidad de crecimiento que registra a 4.5 °C (velocidad unidad). Para calcular la constante térmica de un cultivo se sustituye la temperatura media diaria por el índice termofisiológico correspondiente (en tablas especiales), posteriormente se suman todos los índices obtenidos. Este método se basa en experiencias fisiológicas realizadas en un solo cultivo (maíz), en condiciones de uniformidad de temperaturas durante 12 horas y sometida a oscuridad.

2.4. Descripción fenológica del frijol

El frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) es una planta herbácea perteneciente a la familia de las Fabaceae, de tallos delgados y débiles, cuadrangulares, a veces rayados de purpura, hojas trifoliadas, ápice acuminado, laterales más o menos tubulosos. Alcanza una altura de 50 a 70 cm y sus raíces se desarrollan con una raíz pivotante principal y muchas ramificaciones. El fruto es una vaina suavemente curvada y dehiscente, lo que significa que se abre naturalmente cuando está madura. Esta vaina puede medir de 10 a 12 cm y es de color verde, morada o casi negra. En su interior las semillas pueden ser oblongas, ovals o redondeadas (según la variedad), poco comprimidas y de color café o negro, o moteadas café, rojo o negro (SAGARPA, 2017).

- Condiciones edáficas y clima: Las temperaturas óptimas para el desarrollo del cultivo de frijol oscilan entre 10 y 27 °C, pues es muy susceptible a condiciones extremas y debe sembrarse en suelos de textura ligera y bien drenados. El pH adecuado fluctúa entre 6.5 y 7.5, ya que dentro de estos límites la mayoría de los elementos nutritivos del suelo presenta su máxima disponibilidad, no obstante, se comporta bien en terrenos que tienen un pH de 4.5 a 5.5 (*Ídem*).

- Establecimiento de la plantación: La siembra se realiza a mano o con sembradora, enterrando la semilla a una profundidad de 3 a 5 cm, con una distancia entre plantas de 6 cm y entre hileras de 60 a 80 cm. Antes de sembrar se debe verificar que el suelo tenga suficiente humedad para garantizar una germinación uniforme (*Op Cit.*).

En la Tabla 1 se presentan algunos aspectos de la fenología del frijol, y en la Figura 1 de forma gráfica se muestra ella.

Tabla 1. Fenología del frijol (SIAP, 2019).

V0 Germinación	Se toma como iniciación de esta etapa el día que la semilla tiene humedad suficiente para el comienzo de este proceso; es decir, el día del primer riego, o de la primera lluvia si se siembra en un suelo seco.
V1 Emergencia	Se inicia cuando los cotiledones de la planta aparecen a nivel del suelo.
V2 Hojas primarias	Comienza cuando las hojas primarias (unifoliadas y compuestas) están desplegadas.
V3 Primeras hojas trifoliadas	Se inicia cuando la planta presenta la primera hoja trifoliada completamente abierta y las láminas de los folíolos se ubican en un plano.
V4 Tercera hoja trifoliada	Cuando la tercera hoja trifoliada se encuentra desplegada.
R5 Prefloración	Inicia cuando aparece el primer botón o racimo.
R6 Floración	Cuando la planta presenta la primera flor abierta.
R7 Formación de las vainas	Cuando la planta presenta la primera vaina con corola de la flor colgada o desprendida.
R8 Llenado de la vaina	Se inicia cuando la primera vaina empieza a llenar. Es el inicio del crecimiento activo de la semilla. Las vainas presentan abultados que corresponden a las semillas en crecimiento.
R9 Maduración	Se caracteriza por el inicio de coloración y secado en las primeras vainas, continúa el amarillamiento, la caída de hojas y todas las partes de la planta se secan; las vainas al secarse pierden su pigmentación. El contenido de agua en las semillas baja hasta alcanzar 15%, momento en el cual las semillas adquieren su color típico. Termina el ciclo biológico y el cultivo se encuentra listo para su cosecha.

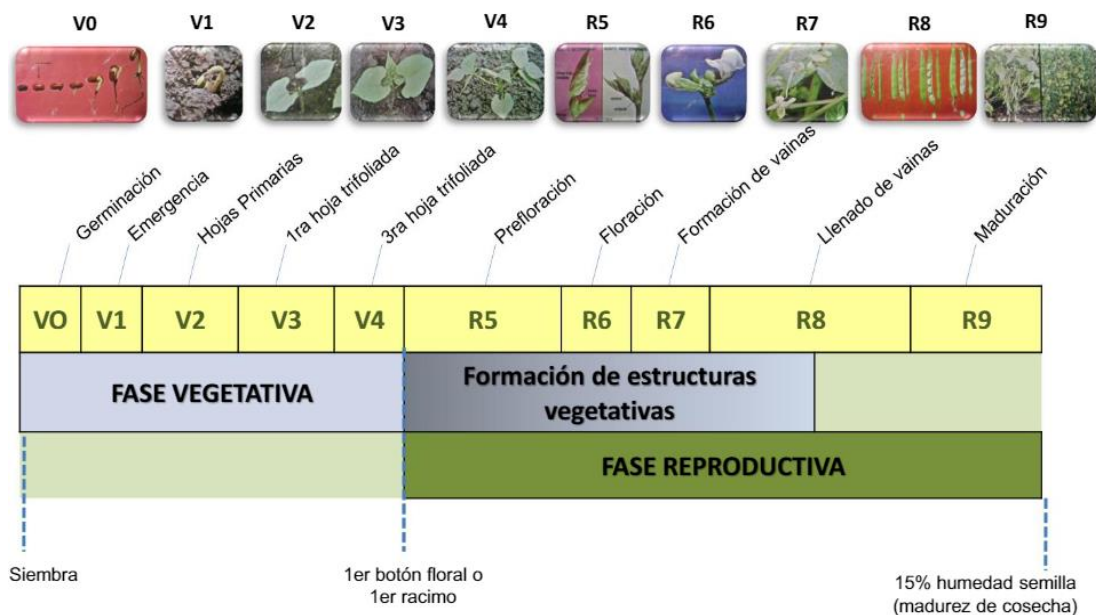


Figura 1. Fenología del frijol (calameo.com, 2023).

2.5. Investigaciones sobre el uso de las unidades calor en la agricultura

Ventura (1991) realizó un estudio en el que mencionó que la fenología del cultivo de frijol puede presentar diferencias entre un periodo de tiempo y otro. Asimismo, la duración del ciclo es directamente proporcional a una buena distribución de la precipitación pluvial, principalmente al inicio de la formación de guías. En este estudio se determinaron seis etapas fenológicas para el cultivo de frijol: emergencia, inicio de formación de guías, floración, formación de vainas, llenado de vaina y maduración. Las unidades calor necesarias para cada etapa fenológica fueron: 12.89, 61.09, 89.08, 99.31, 114.97, 156.74 (con una temperatura base de 18.9 °C), respectivamente.

Escalante *et al.* (2001) realizaron un estudio sobre la relación que tenían la evapotranspiración, las unidades calor y la radiación solar en la producción de biomasa y rendimiento en frijol (*Phaseolus vulgaris* L.). Se realizaron distintas siembras tanto en invierno (bajo un sistema de riego) y en verano siendo una siembra de secano. Como resultado de este trabajo se obtuvo que las siembras invernales fueron superiores en producción de biomasa y rendimiento con 41 y 38%, respectivamente, en ambas épocas las unidades calor fueron similares, esto por dos razones: a) La siembra en época de menor demanda evaporativa del aire, como es el invierno, conduce a una

mayor producción de los cultivos, y b) La producción de las siembras de verano estuvo sujeta a la variabilidad en la disponibilidad de agua, producto de la distribución de la precipitación y a la temperatura alta, lo que limitó una mayor respuesta del cultivo a la evapotranspiración (ET) y radiación solar (Rg). Por otra parte, el valor de las UC determinado en este trabajo, en ambos ciclos de siembras fue inferior al reportado por Robertson y Frazier (1978) para un óptimo crecimiento del frijol (1,800 UC), sin embargo, se considera que este valor en parte está en función del genotipo utilizado y de la fecha de siembra. Finalmente, en concordancia con otros autores, este tipo de estudios pueden contribuir a la identificación de los principales factores ambientales de riesgo para la producción en cada región agrícola, así como apoyar a la generación de modelos de predicción del rendimiento.

Por su parte, Vázquez *et al.* (2008) evaluaron la fenología de cuatro genotipos de papayo y su relación con la acumulación de unidades calor en las condiciones de clima y suelo del sur del Estado de Tamaulipas. Las variables evaluadas fueron altura de planta y ancho de copa. Como parte de los resultados se registró un lento crecimiento durante los meses fríos debido a una baja acumulación de UC, seguido de un incremento en la tasa de crecimiento durante los meses cálidos, cuando se presentó la mayor acumulación de UC, esto es, el calor estimuló el desarrollo de las plantas de papayo. Definieron también la correlación positiva entre altura de planta, ancho de copa y acumulación de unidades calor. Con 4.8 UC las plantas de papayo presentaron bajas tasas de crecimiento, pero al aumentar a 6.6 UC las tasas de crecimiento se incrementaron notablemente, el mayor cuajado de frutos se presentó entre las 1,936 y 2,293 UC acumuladas y el periodo de cosecha más largo fue de 154 días y con 1,075 UC.

Bracho (2010) realizó un estudio con la fenología del frijol basada en grados día, trabajó con 4 cultivares de frijol (C1, C2, C3, C4). La acumulación de grados días para los cultivares fueron similares durante la etapa vegetativa de las plantas, para C1 y C4 quienes necesitaron 331.4 grados día en la fase V4, mientras que C2 y C3 presentaron requerimientos mayores. Con la llegada de la etapa de la floración en los cultivares evaluados, se notaron las diferencias en las necesidades de calor según la variedad, se observó que la fase en la que se acumula mayor calor fue la R8. El comportamiento de los cultivares para la última fase presentó diferencias entre los mismos, siendo C3 el que acumuló mayor cantidad de unidades calor con 887.9. Las diferencias encontradas entre

los cultivares indicaron que al momento de diseñar planes de manejo o establecer la zonificación de estos cultivos, se debe considerar el valor de las unidades calor.

Salinas *et al.* (2012) llevaron a cabo un estudio con frijol ejotero bajo dos ambientes en Texcoco (Montecillo y San Pablo), Estado de México. Trabajaron con tres variedades, dos de hábito de crecimiento determinado (Strike y Black Valentine) y una de crecimiento indeterminado (Hav-14). Ellos mencionaron que hubo una diferencia significativa para ambas variedades de frijol en las etapas fenológicas, las de crecimiento determinado registraron un promedio de 89 días de la siembra al último corte y la de crecimiento indeterminado duró 110 días en promedio. En Montecillo la variedad Strike mostró el periodo más corto de siembra al último corte con 78 días y la variedad Hav-14 el más largo con 102 días; estas mismas variedades mostraron en San Pablo un ciclo reproductivo 12 y 17 días más prolongado que en Montecillo. Estas diferencias pueden explicarse por una mejor distribución de la precipitación en Montecillo. Los resultados sugieren que la disponibilidad de humedad, la temperatura y su interacción influyen en la fenología del frijol ejotero.

De la Rosa (2013) trabajó con el cultivo de rosa (*Rosa x hibrida*), en el que su objetivo principal fue determinar los estados fenológicos y las unidades calor en dos localidades: Morales y Santa Ana, de la región florícola del Estado de México. Se trabajó con dos variedades de rosa, Vega y Polo, por ser las más cultivadas en la región. Para determinar la fenología del cultivo se consideraron tres variables a evaluar: 1) Altura de brote, 2) Conteo total del ciclo en días manejado por unidades calor y 3) Temperaturas máximas y mínimas. Para calcular las unidades calor se utilizó el método de seno doble, ya que fue el que presentó el menor coeficiente de variación. Como resultado se identificaron doce etapas fenológicas para el cultivo de rosa desde yema floral hasta el corte de flor, se obtuvo una correlación positiva entre la longitud del tallo y las unidades calor acumuladas en las variedades de rosa en ambas localidades. Se observó que hay una interacción entre las variedades y las localidades influyendo en el crecimiento de la planta. Gracias al conocimiento de la fenología de una especie vegetal, la medición de eventos puede ser mejorada si se expresan las unidades de desarrollo en términos de tiempo fisiológico en lugar de tiempo cronológico, por ejemplo, en términos de acumulación de temperatura.

Ruisánchez (2020) planteó el uso de las unidades calor como una herramienta para el monitoreo y diagnóstico para observar el comportamiento de las principales plagas hortícolas en este caso con

la palomilla dorso de diamante (*Plutella xylostella* L.) en el cultivo de col de Bruselas (*Brassica oleracea* L.). Para determinar el comportamiento de *P. xylostella* L. en San Luis Rio Colorado Sonora, México, se tomaron en cuenta los registros climáticos de cinco años, durante el periodo de septiembre a mayo de tres estaciones meteorológicas: Los Pivotes, Moctezuma y Quiroz. Es importante mencionar que la cantidad de unidades calor requeridas para completar un ciclo biológico es variada dependiendo de cada especie, la cual está relacionado principalmente a su temperatura base. El dorso de diamante requiere 365.5 UC para completar su ciclo biológico y una temperatura base de 6.3 °C. Los resultados arrojaron que la mayor presencia de *P. xylostella* en el cultivo de col de Bruselas y su ciclo biológico más corto comprendía los periodos de septiembre-noviembre y marzo-mayo. Además, se observó durante este periodo una duración promedio del ciclo biológico de 18 días y una frecuencia de aplicación de insecticidas de 3 a 4 días.

Rosales *et al.* (2021) reportaron el trabajo con dos variedades de frijol pinto: centauro y saltillo, en Durango. En el 2015 ambas variedades mostraron similitud en los días a emergencia y en acumulación de grados día (ocho días después de la siembra con 84 grados día). Para el año 2016 hubo diferencias, para la variedad pinto centauro la emergencia se retrasó con nueve días después de la siembra, con una acumulación de 100 grados día; la variedad pinto saltillo registró siete días después de la siembra para emergencia y acumuló 78 grados día. También se trabajó en Canatlán, Durango, en el año de 2015, con las mismas variedades de frijol; aquí se registró que la variedad pinto centauro mostró una diferencia de un día en la emergencia, esto es, ocho días después de la siembra con 77 grados día, con respecto a pinto saltillo que presentó la emergencia siete días después de la siembra, con 71 grados día. Independientemente de la variedad, en Canatlán (2015) se redujeron las unidades térmicas con respecto a Durango (2015) debido a la temperatura ambiental más alta en las etapas vegetativa y reproductiva del cultivo. Además, se observó, que la temperatura alta combinada con el estrés hídrico es un factor que considerar para definir la duración de las etapas fenológicas del frijol.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Localización geográfica

El estudio se realizó en la Facultad de Estudios Cuautitlán, UNAM (FES-C), en el centro del valle donde se ubican los municipios de Cuautitlán México y Cuautitlán Izcalli, Estado de México, perteneciendo políticamente al segundo municipio.

El municipio de Cuautitlán Izcalli se localiza en la parte noroeste de la cuenca de México. Tiene una extensión territorial de 109.9 km² que representa el 0.5% de la superficie del Estado de México, con una altitud de 2,256 msnm, el municipio de Cuautitlán Izcalli, se encuentra ubicado dentro del eje Neovolcánico, con las elevaciones al Suroeste y Oeste del municipio, que forman parte de las estribaciones de las sierras de Monte Alto y Monte Bajo, y colinda al Norte con los municipios de Tepotzotlán y Cuautitlán México, al Este con Cuautitlán México y Tultitlán, al Sur con Tlalnepantla de Baz y Atizapán de Zaragoza, al Oeste con Villa Nicolás Romero y Tepotzotlán (Figura 2).

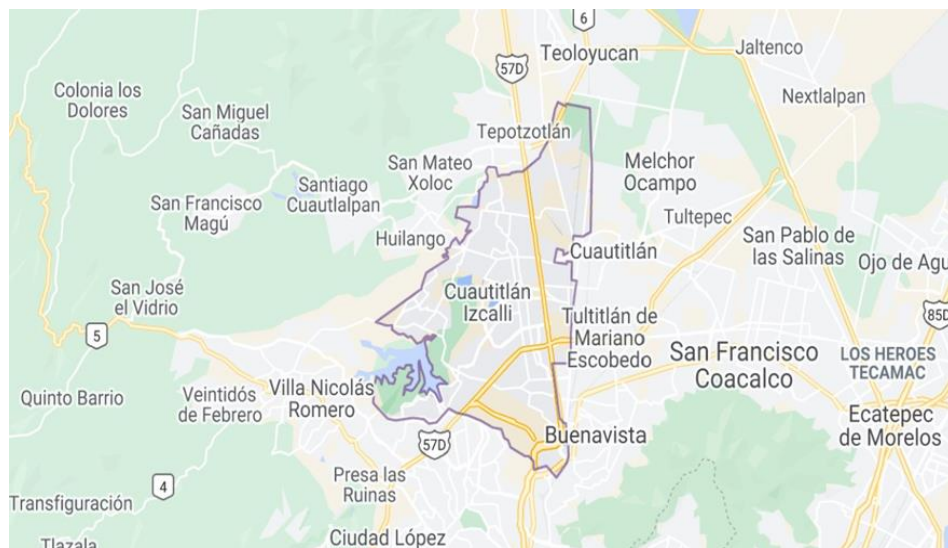


Figura 2. Localización geográfica del municipio de Cuautitlán Izcalli. México (Infoabe, 2023).

3.1.1. Descripción climática de la zona de estudio

La estación meteorológica Almaraz (Figura 3), se localiza en el municipio de Cuautitlán Izcalli, Estado de México, en la Longitud Oeste de 99°11'42" y en la Latitud Norte de 19°41'35"; a una altura de 2,256 msnm.

De acuerdo con la clasificación climática de Köppen modificado por García (1973) la clasificación del clima de la zona es C(w₀) b (i'), esto es, un clima templado subhúmedo con lluvias de verano, el más seco de los subhúmedos, con verano fresco, porcentaje de lluvia invernal de 4.71%, poca oscilación de temperatura, el mes más caliente es junio y sin sequía intraestival. La temperatura media anual es de 15.4 °C y la precipitación anual de 652.1 mm (Angeles, 2022).



Figura 3. Vista de la estación meteorológica Almaraz, FES-C, UNAM.

3.2. Metodología

El estudio se basó en un método cuantitativo, utilizando datos climáticos que fueron capturados durante el periodo de junio a octubre del año de 2014 al 2022 en la estación meteorológica Almaraz, y se consideraron los valores diarios de temperatura media, máxima y mínima, y precipitación.

Además, se analizaron los registros fenológicos del cultivo de frijol var. Vaquita negro, obtenidos en campo, en los ciclos agrícolas primavera-verano del 2014 al 2022, en condiciones de temporal. Se calcularon las unidades por el método residual, con una temperatura base de 7.0 °C, que corresponde al cultivo de frijol.

3.2.1. Variables evaluadas

Se determinó lo siguiente:

a) Unidades calor.

b) Fenología del frijol var. Vaquita negro: Las fechas de siembra fueron entre el 10, 12, 10, 10, 8, 11, 10, 12 y 10 de junio, para los años 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021, 2022, respectivamente; en condiciones de temporal,

3.3. Materiales

- Datos de temperatura media y precipitación de la estación meteorológica Almaraz, de la FES Cuautitlán.

- Datos fenológicos del cultivo de frijol var. Vaquita negro de los ciclos P-V de los años 2014 al 2022, cultivado en la parcela fenológica de la estación meteorológica de la FES Cuautitlán.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Acumulación de unidades calor

En la Tabla 2 se muestra la acumulación de calor que se registró durante cada año de análisis. El promedio durante los años de análisis fue de 1,342.2 UC, mientras que en el año 2020 se acumuló el mayor número con 1,442.5 UC.

Tabla 2. Unidades calor acumuladas del cultivo de frijol var. Vaquita negro, ciclo primavera-verano 2014-2022 y etapa fenológica. Cuautitlán Izcalli, Méx.

Ciclo agrícola	Siembra - emergencia	Emergencia - floración	Floración - fructificación	Fructificación	Madurez fisiológica	Madurez - cosecha	Total
2014	133.5	423.9	142.2	137.3	227.5	127.7	1192.1
2015	139.6	540.7	123.9	95.9	143.0	97.7	1140.8
2016	135.1	473.9	176.2	193.6	256.4	90.1	1325.3
2017	144.7	470.0	177.1	152.8	328.4	149.6	1422.6
2018	154.2	453.3	132.0	241.7	98.9	221.6	1301.7
2019	311.6	334.9	127.9	215.9	306.4	126.4	1423.1
2020	275.0	454.1	171.3	117.7	213.5	210.9	1442.5
2021	106.4	470.9	159.3	167.4	158.0	349.5	1411.5
2022	132.0	460.3	158.1	188.7	67.1	413.8	1420.0
Promedio	170.2	453.6	152.0	167.9	199.9	198.6	1342.2

En la Figura 4 se observa de forma gráfica que durante la etapa de germinación (emergencia-floración) la acumulación de calor mantuvo una tendencia similar año con año, y la de madurez comercial (madurez-cosecha) se presenta con mayor variabilidad.

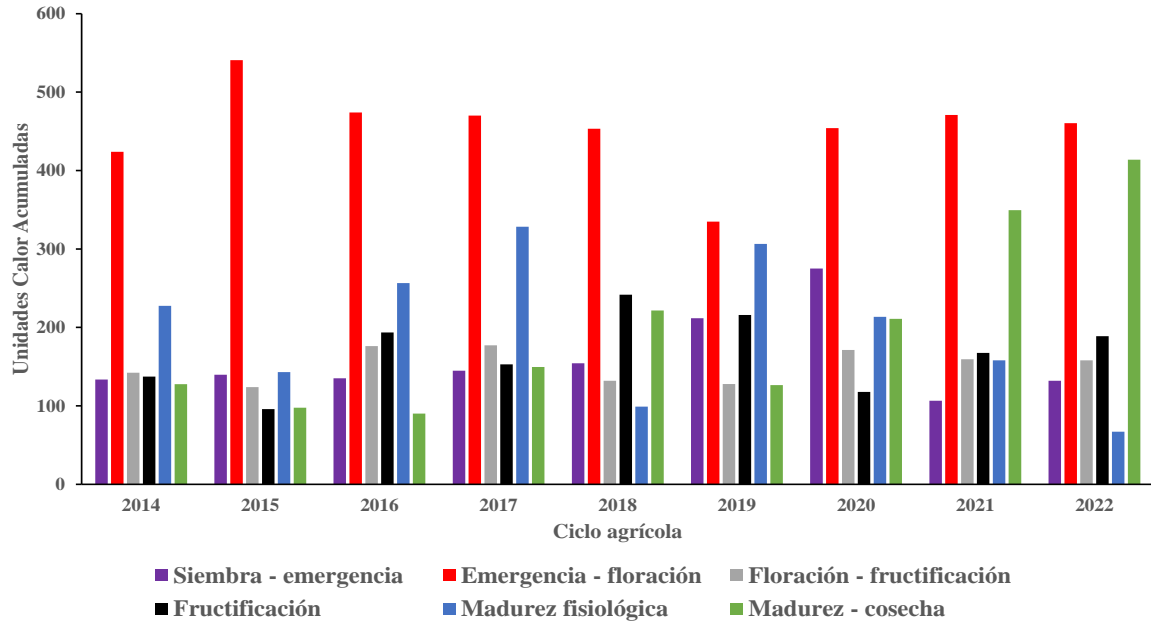


Figura 4. Unidades calor acumuladas del cultivo de frijol var. Vaquita negro, ciclo primavera-verano 2014-2022 y etapa fenológica. Cuautitlán Izcalli, Méx.

Estas variaciones en cada etapa y en cada ciclo estarían relacionadas con la tendencia de la temperatura (Figura 5), y con la disponibilidad de agua en el suelo, producto de las lluvias del temporal (Figura 6).

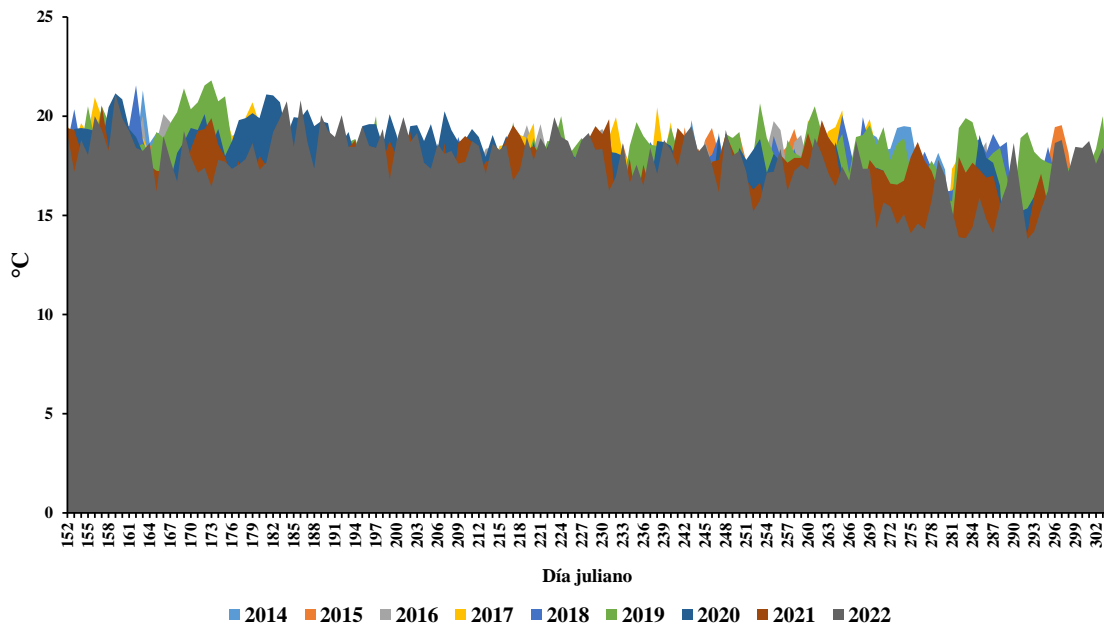


Figura 5. Tendencia de la temperatura media diaria durante el ciclo de cultivo de frijol var. Vaquita negro, del año 2014 al 2022. Cuautitlán Izcalli, Méx.

En los años de 2019 y 2020, las temperaturas medias fueron más altas durante los días que duró la etapa de germinación con respecto a los otros años de estudio, sin embargo, se asoció con menor presencia de precipitación, por lo cual la duración de esta etapa fenológica se alargó, como más adelante se comentará.

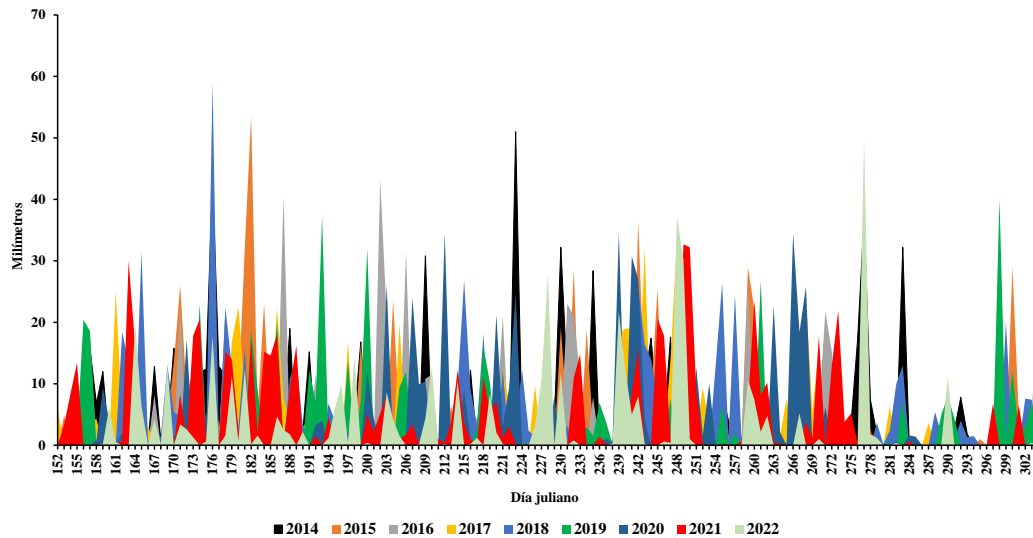


Figura 6. Ocurrencia de lluvia diaria durante el ciclo de cultivo de frijol var. Vaquita negro, del año 2014 al 2022. Cuautitlán Izcalli, Méx.

Con base a lo anterior, se observa la importancia que tienen la precipitación y la temperatura para el crecimiento y desarrollo del frijol, su distribución a lo largo del ciclo del cultivo va a jugar un papel importante en las etapas fenológicas, ya que de esto depende el tiempo entre una etapa y otra, que esta se acorte o se alargue, y que el calor acumulado sea mayor o menor. Estos elementos se mantienen variables año con año, pueden existir condiciones muy secas con temperaturas más altas, como lo fue en el año 2019, o condiciones más regulares como lo fue en el año 2021.

4.2. Fenología del frijol var. Vaquita negro con base a la acumulación de unidades calor

Con base a la duración de cada etapa fenológica y su acumulación de calor, se obtuvieron los siguientes datos (Tabla 3).

Tabla 3. Días acumulados por etapa fenológica del cultivo de frijol var. Vaquita negro, de los ciclos primavera-verano 2014 al 2022, Cuautitlán Izcalli, México.

Ciclo agrícola	Siembra	Etapas de germinación	Etapas vegetativa	Etapas reproductiva	Etapas de fructificación	Etapas de madurez	Total a Cosecha
2014	0	11	40	14	13	33	111
2015	0	12	50	11	9	25	107
2016	0	11	43	15	17	31	117
2017	0	12	42	15	12	47	128
2018	0	12	42	12	22	28	116
2019	0	25	31	10	18	37	121
2020	0	22	37	15	10	44	128
2021	0	9	43	13	15	48	128
2022	0	11	39	13	16	47	126
Promedio		14	41	13	15	38	120

Se observa que la etapa vegetativa con un promedio de 41 días es la que más duración presenta en este cultivo, seguida de la etapa de madurez con 38 días. El ciclo del frijol varió entre los 107 hasta los 128 días después de la siembra, lo cual como se ha comentado, esta influenciado por las condiciones de temperatura y precipitación presentes en cada año de estudio. En la Figura 7 se presentan estos datos de forma gráfica, para observar la duración de cada etapa en los años de estudio.

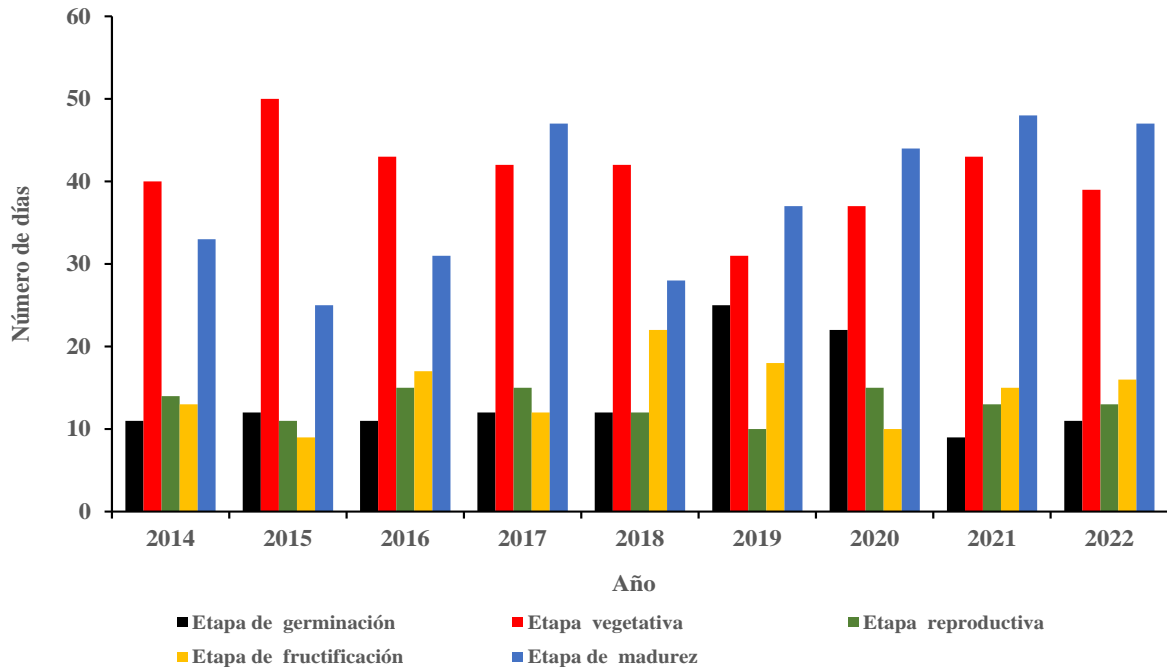


Figura 7. Días acumulados por etapa fenológica, del cultivo de frijol var. Vaquita negro, de los ciclos primavera-verano 2014 al 2022, Cuautitlán Izcalli, México.

En el año de 2019 se presentaron las condiciones de menor precipitación al inicio del cultivo, por lo cual se alargó la etapa de germinación, sin embargo, ese déficit de humedad aceleró a la planta a llegar a la floración, como un estímulo natural ante el estrés hídrico y la supervivencia de la planta, como lo señaló Rosales *et al.* (2021).

La etapa vegetativa del cultivo de frijol registró un mayor número de días en comparación con las otras etapas, como se muestra en la Tabla 4, por ende, acumuló una mayor cantidad de calor. Esto es de esperarse debido a que en esta etapa se van a formar las principales estructuras de la planta, entre ellas, la aparición de las hojas primarias, la primera y subsecuentes hojas trifoliadas, alargamiento de tallos, y con ello, la producción fotosintética de sustancias de reserva que promoverán la floración y reproducción del cultivo.

Asimismo, se obtuvo un valor promedio de 1,342.2 UC para que el cultivo de frijol llegue a la cosecha.

Tabla 4. Promedio de días y unidades calor acumulados por etapa fenológica, del cultivo de frijol var. Vaquita negro, de los ciclos primavera-verano 2014 al 2022, Cuautitlán Izcalli, México.

Etapa	Días acumulados	UC acumuladas
Siembra - emergencia	14.1	170.2
Emergencia - floración	40.8	623.8
Floración - fructificación	13.2	775.8
Fructificación	14.7	943.7
Madurez fisiológica	39.3	1143.6
Cosecha	122.1	1342.2

A continuación, se describirán las diversas etapas fenológicas de este cultivo.

a) Etapa de germinación (Siembra – emergencia)

En la Figura 8 se muestran las imágenes representativas de la siembra y la emergencia de los cotiledones, asimismo, el primer par de hojas verdaderas.



Figura 8. Siembra y fase de emergencia del cultivo de frijol var. Vaquita negro (Elaboración personal).

Esta etapa de germinación es el inicio del ciclo biológico del cultivo, y como se señaló anteriormente, las condiciones ambientales presentes en cada año de estudio reflejaron diferencias

entre ellos. Los años 2019 y 2020 son los que presentaron menor precipitación y mayor duración de esta etapa; en la Figura 9 se presentan estos datos.

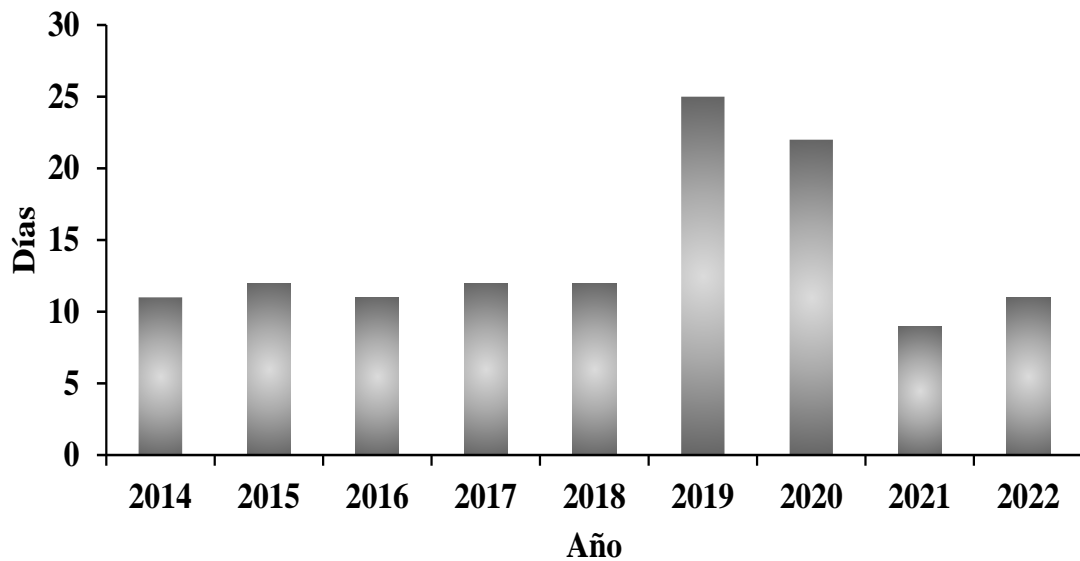


Figura 9. Días a emergencia del cultivo de frijol var. Vaquita negro por año de estudio, Cuautitlán Izcalli, Méx.

b) Etapa vegetativa (Emergencia – floración)

En la Figura 10 se observan diversos momentos de esta etapa fenológica.



Figura 10. Etapa vegetativa del frijol var. Vaquita negro (Elaboración personal).

Los datos registrados mostraron similitud, como se observa en la Figura 11, sin embargo, para el año 2015 y 2019 se observa una diferencia mayor. El año 2015 presentaron precipitaciones más abundantes después de la emergencia de la planta lo que promovió que esta etapa se alargara, y con datos registrados en la bitácora de la estación meteorológica, las plantas tuvieron un mayor crecimiento y duración esta etapa fenológica. Para el año 2019 también hubo menor presencia de precipitaciones y se registraron temperaturas mas altas, como se mencionó anteriormente, la emergencia se retrasó y como consecuencia la planta aceleró sus procesos metabólicos para poder llegar a la floración, momento que representa la perpetuación de la especie, obteniéndose plantas de menor tamaño.

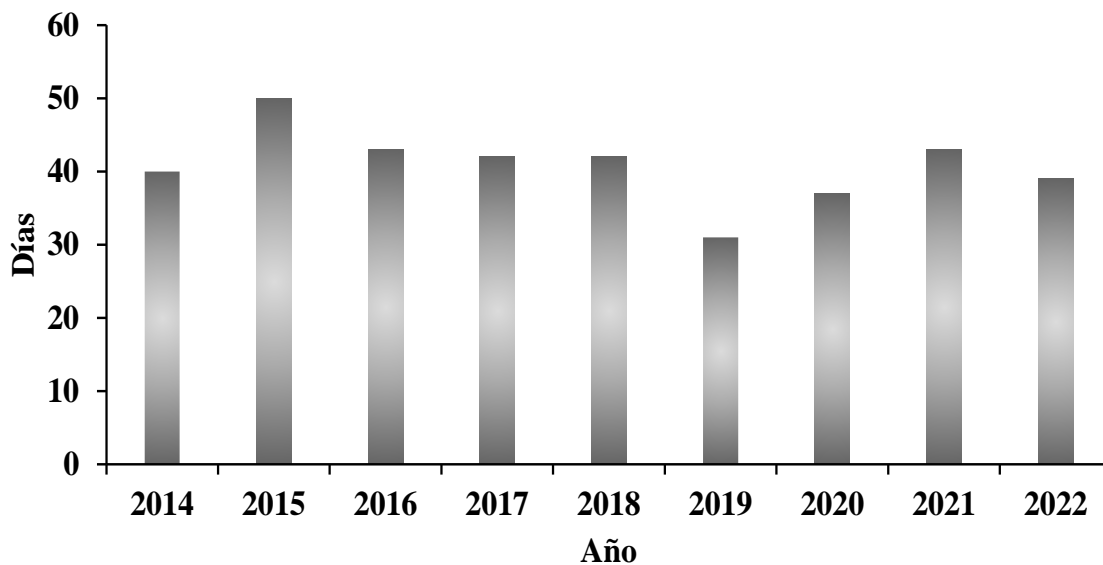


Figura 11. Duración de la etapa vegetativa del cultivo de frijol var. Vaquita negro por año de estudio, Cuautitlán Izcalli, Méx.

c) Etapa reproductiva (Floración)

Esta etapa tiene gran significancia para la especie porque con ella busca generar frutos que aseguren la producción de semilla, la cual es el objetivo de los productores, por lo que representa económicamente para ellos. En la Figura 12 se presentan imágenes de esta etapa fenológica.



Figura 12. Etapa reproductiva de frijol var. Vaquita negro (Elaboración personal).

En el año del 2019 el déficit de agua registrado en las etapas anteriores impactó la floración; la baja precipitación combinada con mayor temperatura ambiental, ocasionó una floración prematura, que afectó el número de flores en la planta, lo cual se refleja directamente en el rendimiento del cultivo, tema que se abordará más adelante. La duración de esta etapa fue menor en el 2019 y guardo similitud en los demás años, sobresaliendo en su duración durante los años 2016, 2017 y 2020 (Figura 13).

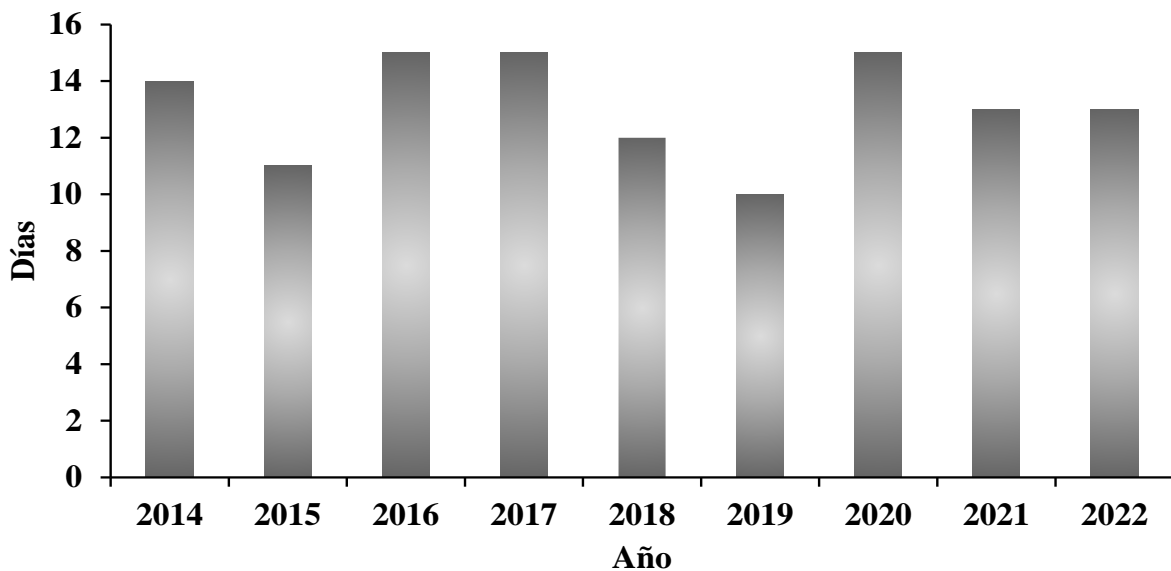


Figura 13. Duración de la etapa reproductiva del cultivo de frijol var. Vaquita negro por año de estudio, Cuautitlán Izcalli, Méx.

d) Etapa de fructificación (Fructificación)

En la Figura 14 se presentan aspectos del estado de crecimiento de las vainas de este cultivo.



Figura 14. Etapa de fructificación del frijol var. Vaquita negro (Elaboración personal).

En cuanto a la etapa de fructificación (Figura 15) se observa que hubo mas variación con los datos para cada año. Los años 2018 y 2019 registraron un mayor número de días para culminar con la fructificación. Fue en el año 2020 cuando se acortó esta etapa, debido a una disminución de la precipitación durante ese verano, lo que afectó el crecimiento y desarrollo de los frutos, que impactó el rendimiento final de grano.

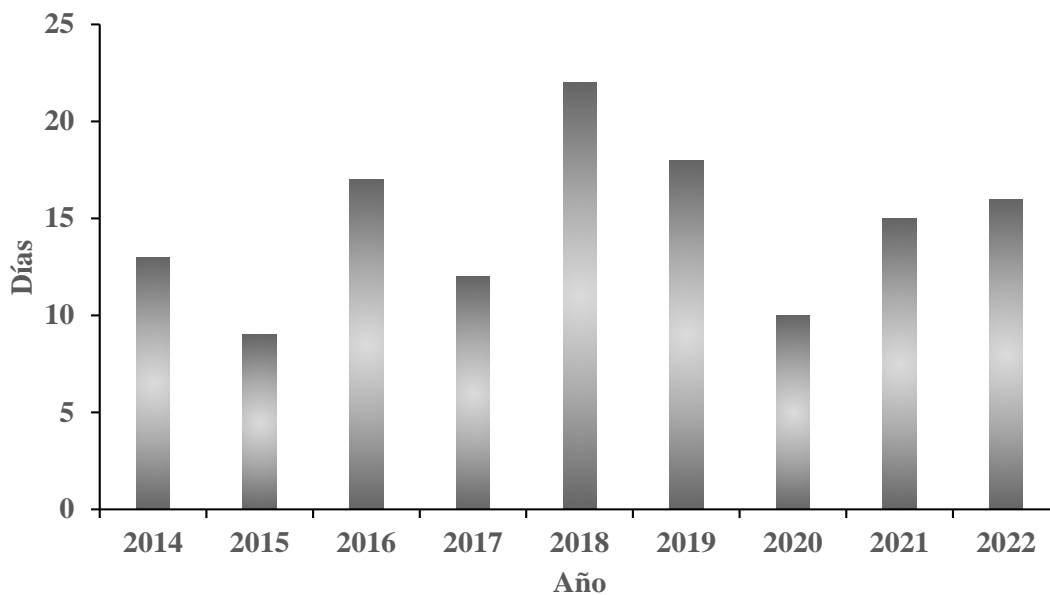


Figura 15. Duración de la etapa de fructificación del cultivo de frijol var. Vaquita negro por año de estudio, Cuautitlán Izcalli, Méx.

e) Cosecha (Madurez fisiológica – cosecha)

La etapa de cosecha representa la culminación del ciclo biológico de los cultivos, para el caso de los de ciclo anual. En la Figura 16 se presentan imágenes del cultivo de frijol, momento en que la vaina alcanza su madurez y se seca, alcanzando hasta un 12% de humedad para ser cosechada.



Figura 16. Etapa de madurez y cosecha de frijol var. Vaquita negro (Elaboración personal).

Para llegar de forma óptima a esta etapa, el cultivo se ve influenciado por las condiciones ambientales y durante el periodo analizado, éstas fueron muy variables (Figura 17), en gran medida la temperatura y la precipitación juegan un papel importante para que las vainas llenen satisfactoriamente. Su duración osciló entre los 30 y 48 días.

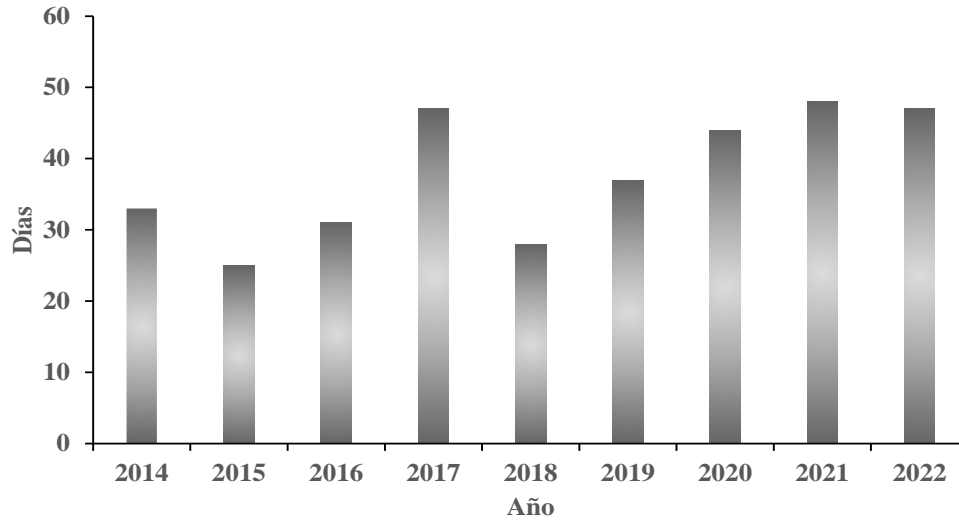


Figura 17. Duración de la etapa de madurez del cultivo de frijol var. Vaquita negro por año de estudio, Cuautitlán Izcalli, Méx.

Por lo tanto, las condiciones ambientales fueron determinantes para que el cultivo tuviera diferente tiempo de su ciclo biológico en este periodo de estudio (Figura 18). En el 2015, la precipitación fue mas abundante y el tiempo del ciclo fue de 112 días después de la siembra, mientras que en el 2021 las condiciones de temperatura y humedad generaron que el ciclo del fijol se alargará hasta los 130 días.

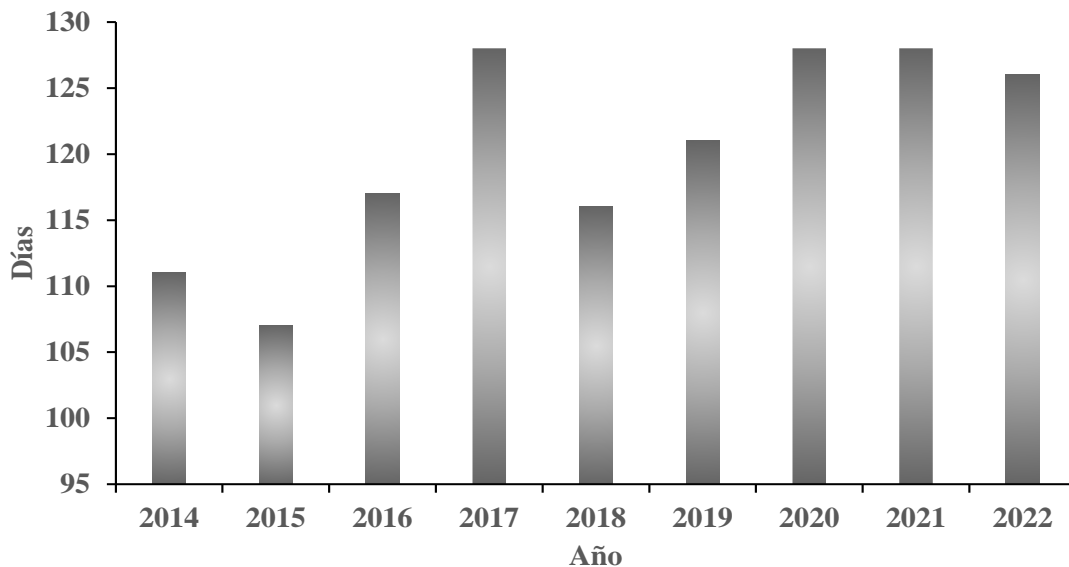


Figura 18. Duración del ciclo biológico del cultivo de frijol var. Vaquita negro por año de estudio, Cuautitlán Izcalli, Méx.

f) Rendimiento por ciclo agrícola

El rendimiento representa el objetivo de la producción de cultivos, y el lograr rendimientos óptimos es muy importante. Durante el periodo de estudio (Figura 19), este varió desde 0.90 hasta 2.02 t ha⁻¹, en los años 2020 y 2014, respectivamente, y fue muy notoria la disminución del rendimiento en el 2019 y 2020, cuando se presentaron los valores de precipitación más bajos de este análisis. El rendimiento promedio del frijol en el área de estudio fue de 1.59 t ha⁻¹, y a pesar de las condiciones ambientales, en todos los años ha sido superior a la media nacional, que para el ciclo P-V 2022 fue de 0.61 t ha⁻¹, en condiciones de temporal (SIAP, 2023).

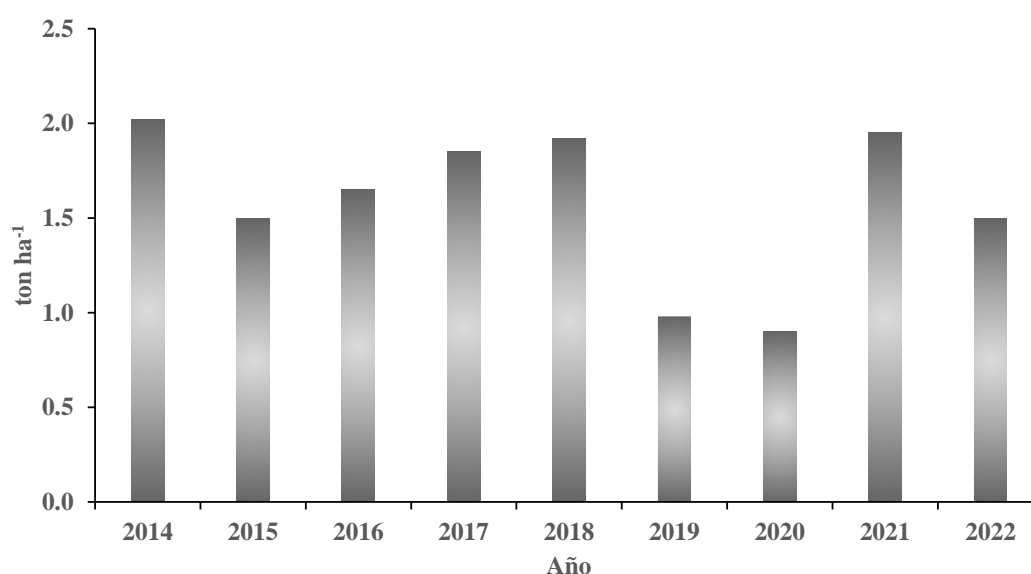


Figura 19. Rendimiento del cultivo de frijol var. Vaquita negro (t ha⁻¹) por año de estudio, Cuautitlán Izcalli, Méx.

4.3. Importancia en las actividades agrícolas

Las unidades calor tienen un amplio uso e importancia dentro de las actividades agrícolas. Como mencionaron Bracho *et al.* (2010) y Mercado Mancera (comunicación personal, 2023), las unidades calor se deben considerar para la zonificación de cultivos, esto va a permitir determinar qué tan viable es establecer un cultivo en una cierta región para lograr un óptimo desarrollo, con base en la acumulación potencial determinada. Asimismo, la madurez fisiológica y cosecha de los cultivos.

Es de gran importancia conocer la fenología de una planta para su desarrollo productivo y con ayuda de las UC se pueden predecir la aparición de una fase fenológica en particular o bien, la duración de las etapas correspondientes, y que puedan completarse de forma satisfactoria. A mayor acumulación de calor, la planta presentará un mayor crecimiento, ya que la temperatura estimula el desarrollo de las plantas, como lo mencionó De la Rosa (2013). Al conocer las distintas etapas fenológicas de un cultivo y la cantidad de calor que se acumula en cada una de ellas, será posible establecer las mejores fechas de siembra que permitan planificar los cultivos y obtener un crecimiento y desarrollo óptimo.

El manejo integrado de plagas incluye el conocimiento integral, tanto de los cultivos como de los insectos plaga, quienes constituyen un potencial daño económico ya que su ciclo de vida está en función de la temperatura, con lo cual también a través del cálculo de las UC se puede estimar los días en los que pueden perjudicar, y con ello, mantenerlas debajo de su umbral económico y reducir los gastos de operación para el productor, como lo señaló también Ruisánchez (2020).

El PRONAP (2015) señaló que la evaluación del desarrollo de los cultivos debiera seguirse de manera cuantitativa, a través de medir el crecimiento en términos de la acumulación de la materia o peso seco de los órganos de la planta, conjugando la evaluación en función de los eventos fenológicos del cultivo tradicionales, como son las distintas fases y etapas fenológicas de los cultivos. Asimismo, considera evaluar el tiempo a un concepto de tiempo fisiológico, expresado en unidades calor o grados día, que es determinado por la temperatura, la cual controla velocidad de las reacciones bioquímicas de las plantas.

Todos estos usos de unidades calor en conjunto llevan a una planificación de programas de asistencia técnica; se pueden realizar cronogramas de actividades que brinden las posibles fechas de siembra de un cultivo determinado, la estimación de ocurrencia de inicio y término de cada fase fenológica y así, determinar el mejor momento para realizar las labores agrícolas y estimar fechas de cosecha. Esta asistencia técnica se puede llevar a pequeños productores que busquen mejorar las condiciones en las que establecen sus cultivos y tener una ventaja ante las condiciones climáticas variables.

V. CONCLUSIONES

Al finalizar el presente trabajo, se obtuvieron las siguientes conclusiones.

1. Se cumplieron los objetivos planteados realizando el análisis de la acumulación de calor en el área de estudio y se describió la fenología con base a las unidades calor acumuladas durante el periodo de estudio.
2. Las variaciones en la temperatura y precipitación durante los años estudiados, demuestran que la planta de frijol var. Vaquita negro, va a buscar cumplir con su ciclo biológico, ya sea en menor o mayor tiempo, y esto se verá reflejado directamente en el rendimiento.
3. La duración promedio del ciclo biológico del frijol en el área de estudio es de 120 días, con una acumulación total promedio de 1,342.2 unidades calor.
4. La etapa vegetativa es la que tiene mayor duración dentro del ciclo biológico del frijol con una duración promedio de 41 días y 623.8 unidades calor acumuladas.
5. A pesar de las condiciones ambientales imperantes durante el periodo de análisis, el rendimiento de frijol se mantuvo superior a la media nacional, sobresaliendo el año 2014 con 2.02 t ha^{-1} , debido a la mayor precipitación durante el ciclo biológico del frijol.
6. Con el análisis obtenido se puede realizar una proyección en campo para estimar la fecha de siembra y posteriormente la aparición y duración de las fases y etapas fenológicas del cultivo de frijol, respectivamente, con base a la necesidad de calor de cada una de ellas.
7. Una limitante para el uso de esta metodología es la falta de información y observaciones de campo sobre la fenología de los cultivos y la acumulación de calor durante el ciclo del cultivo, por lo cual, es necesario continuar investigando y generar información para el apoyo a los productores y con ello, puedan lograrse mejores rendimientos.

VI. LITERATURA CITADA

1. Ángeles, F.S.B. 2022. Determinación de la normal climática de 1987 a 2022 de la Estación Meteorológica Almaraz. Tesis de Licenciatura de Ingeniería Agrícola. FES Cuautitlán, UNAM. México. 117 pp.
2. Barrera, J., Suárez, D., Melgarejo, L.M. 2010. Análisis de crecimiento en plantas. Capítulo 2: 25-38. En: Experiments in plant Physiology. Edition: First. Publisher: Universidad Nacional de Colombia. Editors: Luz Marina Melgarejo.
3. Bracho, B., Arnaude, O., Lozada, B. 2010. Fenología de cultivares locales de frijol y arveja del municipio Rafael Urdaneta, estado Táchira, Venezuela, basado en grados día. *Agronomía Tropical*, 60(2): 1-6.
4. Courtis, A. 2014. Guía de estudio: Crecimiento y desarrollo. En: <https://exa.unne.edu.ar/biologia/fisiologia.vegetal/Gu%C3%ADa%20de%20Estudio-Crecimientoydesarrollo.pdf>. Fecha de consulta el 29 de abril de 2023.
5. De la Rosa, T.M.I. 2013. Identificación de estados fenológicos y determinación de unidades calor en el cultivo de rosa (*Rosa x hibrida*) en la región florícola del Estado de México. Licenciada en Ingeniero Agrónomo en Floricultura. Universidad Autónoma del Estado de México. Tenancingo, Méx. 97 pp.
6. Escalante, E.J.A., Escalante, E.L.E, Rodríguez, G.M.T. 2001. Producción de frijol, en dos épocas de siembra: su relación con la evapotranspiración, unidades calor y radiación solar en clima cálido. *Terra latinoamericana*, 19(4): 309-315.
7. Fernández, F., Gepts, P., López, M. 1985. Frijol: investigación y producción. Capítulo 1, Etapas de desarrollo en la planta de frijol. En: http://ciat-library.ciat.cgiar.org/Articulos_ciat/2015/26201.pdf#page=68. Fecha de consulta 14 de agosto de 2023.
8. Gastón, Q.E., Borsani, O., Gutierrez, L., Melchiorre, M., Monza, J., Lascano, R. 2013. Sistemas de fenotipado para la evaluación de las respuestas al estrés salino en Lotus. *Agrociencia Uruguay* 17(1): 11-21.
9. Gómez, B., Javier, E., Castañeda, L., Kohashi, S., Josue. 2011. Relaciones hídricas y temperaturas altas en frijol del tipo flor de mayo. *Agronomía Costarricense*, 35(1): 131-145.
10. Infoabe. 2022. Cuál es el origen de Cuautitlán Izcalli. En: <https://www.infobae.com/america/mexico/2022/01/27/cual-es-el-origen-de-cuautitlan-izcalli/>. Fecha de consulta el 25 de junio de 2023.

11. INIFAP. 2021. El cultivo del frijol presente y futuro para México. En: https://vun.inifap.gob.mx/VUN_MEDIA/BibliotecaWeb/_media/_librotecnico/12319_5085_El_cultivo_del_frijol_presente_y_futuro_para_M%C3%A9xico.pdf. Fecha de consulta el 24 de noviembre de 2023.
12. Maldonado, C., Pujado, E., Squeo, F. 2002. El efecto de la disponibilidad de agua durante el crecimiento de *Lycopersicon chilense* sobre la capacidad de sus semillas para germinar a distintas temperaturas y concentraciones de manitol y NaCl. *Revista Chilena de Historia Natural*, 75: 651-660.
13. Medina, G., Mena, C. 2007. Reporte agrometeorológico. Inifap, campo experimental Zacatecas. Folleto informativo no. 35. En: <http://zacatecas.inifap.gob.mx/folleto/Folleto-2007-04.pdf>. Fecha de consulta 14 de agosto de 2023.
14. Montero, T.J. 2022. Relación de la radiación solar con la producción de plantas: agroproduktivas. *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales*, 9(1): 52-66.
15. Morales, D., Rodríguez, P., Dell'Amico, J., Torrecillas, A., Sánchez, M. 2006. Efecto de altas temperaturas en algunas variables del crecimiento y el intercambio gaseoso en plantas de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill. CV. Amalia). *Cultivos Tropicales*, 27(1): 45-48.
16. Nájera, G.A. 2016. Caracterización del ciclo biológico de *Cydia pomonella* (L.) mediante unidades calor en Chihuahua: Región manzanera 2013-2014. En: http://erecursos.uacj.mx/bitstream/handle/20.500.11961/1738/PT_NAJERA_124659_19-06-2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Fecha de consulta el 24 de noviembre de 2023.
17. Poblete, A.G., Vera, M.J. 2019. Aplicación de la distribución de los valores extremos a eventos geográficos poco frecuentes. Análisis del caso de ocurrencia de heladas tempranas y tardías en el valle de Tulum, San Juan. *Revista Universitaria de Geografía*. Universidad de San Juan. Argentina. 113-133.
18. ProNAP (Programa Nacional Sectorial de Producción Agrícola bajo Ambientes Protegidos). 2015. Edad fisiológica de los cultivos: el uso de grados día. En: <https://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/av-1816.pdf>. Fecha de consulta el 24 de noviembre de 2023.
19. Ramírez, C.N., Cid, R.A., Reveles, H.M. 2019. Maduración de genotipos de frijol común medida en unidades calor en dos sistemas de siembra. IV Congreso Internacional y XV Congreso Nacional sobre Recursos Bióticos de Zonas Áridas. Universidad Autónoma Chapingo. Bermejillo, Durango, México. 165-168 pp.

20. Rosales, S.R., Flores, G.H., López, G.J., Rubiños, P.J., Ortíz, S.I., Flores, M.H., Santana, E.S., Domínguez, M. P. 2021. Fenología y productividad del agua en variedades mejoradas de frijol pinto cultivadas en Durango, México. *Revista Fitotecnia Mexicana*. Vol. 44 (4): 511-519.
21. Ruisánchez, O.Y. 2020. Las unidades calor, herramienta de monitoreo en la palomilla dorso de diamante. *Agro excelencia, la revista del profesional del campo*, 33: 7-9.
22. Ruiz, M.A. 2018. Las Unidades Calor. En: [https://semillastodoterreno.com/2018/11/las-unidades-calor#:~:text=La%20Unidades%20Calor%20\(UC\)%20son,temperaturas%20adecuadas%20para%20su%20desarrollo](https://semillastodoterreno.com/2018/11/las-unidades-calor#:~:text=La%20Unidades%20Calor%20(UC)%20son,temperaturas%20adecuadas%20para%20su%20desarrollo). Fecha de consulta 29 de abril de 2023.
23. SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación). 2017. Planeación agrícola nacional 2017-2030. Frijol. En: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/255625/Planeaci_n_Agr cola_Nacional_2017-2030-_parte_dos.pdf. Fecha de consulta 29 de septiembre de 2023.
24. Salinas, R. N., Escalante, E. A., Rodríguez, G. T., Sosa, M. E. 2012. Rendimiento y calidad nutrimental del frijol ejotero en dos ambientes. *Revista Fitotecnia Mexicana*. Vol. 35(4): 317-323.
25. SIAP (Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera). 2019. Aptitud agroclimática del frijol en México, ciclo agrícola primavera verano. En: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/448930/Reporte_de_Aptitud_agroclim_tica_de_M_xico_del_frijol_PV_2019.pdf. Fecha de consulta el 29 de abril de 2023.
26. SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). 2023. Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. En: <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>. Fecha de consulta el 22 de noviembre de 2023.
27. Segura, J. 2013. Introducción al desarrollo. Concepto de hormona vegetal. Capítulo 3, Fundamentos de la fisiología vegetal. En: <https://exa.unne.edu.ar/biologia/fisiologia.vegetal/FundamentosdeFisiologiaVegetal2008Azcon.pdf>. Fecha de consulta 25 de agosto de 2023.
28. Straschvov, J.V., Di Bella, C.M., Jaimes, F.R., Oricchio, P.A., Rebella, C.M. 2006. Caracterización espacial del estrés hídrico y de las heladas en la región pampeana a partir de información satelital y complementaria. *RIA* 35(2): 117-141.
29. Torres, J.G. 2022. El frijol. En: <https://sader.gob.mx/elfrijol/fenologia.html>. Fecha de consulta el 15 de febrero de 2023.
30. Vázquez, G., Román, E., Ariza, R. 2008. Fenología y unidades calor de genotipos de papayo en el sur de Tamaulipas, México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 31(3): 45-48.

31. Ventura, E.R. 1991. Fenología y fonometría de una variedad y una línea de frijol (*Phaseolus vulgaris*) en la zona occidental de El Salvador. *Agronomía Mesoamericana* 2: 56-60.
32. Zita, F.A. s/f. Genotipo y fenotipo. En: <https://www.diferenciador.com/genotipo-y-fenotipo/>. Fecha de consulta el 29 de abril de 2023.