

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA
FACULTAD DE AGRONOMÍA
MAESTRÍA INTERINSTITUCIONAL EN AGRICULTURA
PROTEGIDA



TESIS
INCIDENCIA Y SEVERIDAD DEL ToBRFV EN CULTIVARES
DE TOMATE EN CONDICIONES DE MALLA SOMBRA EN EL
VALLE DE CULIACÁN

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRA EN AGRICULTURA PROTEGIDA

PRESENTA:
RAQUEL LARIZA AVILÉS TAPIA

DIRECTOR: DR. CARLOS ALFONSO LÓPEZ ORONA
CODIRECTOR: DR. MARTÍN ABRAHAM TIRADO RAMÍREZ

CULIACÁN, SINALOA, NOVIEMBRE DE 2024



Dirección General de Bibliotecas
Ciudad Universitaria
Av. de las Américas y Blvd. Universitarios
C. P. 80010 Culiacán, Sinaloa, México.
Tel. (667) 713 78 32 y 712 50 57
dgbuas@uas.edu.mx

UAS-Dirección General de Bibliotecas

Repositorio Institucional Buelna

Restricciones de uso

Todo el material contenido en la presente tesis está protegido por la Ley Federal de Derechos de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

Queda prohibido la reproducción parcial o total de esta tesis. El uso de imágenes, tablas, gráficas, texto y demás material que sea objeto de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente correctamente mencionando al o los autores del presente estudio empírico. Cualquier uso distinto, como el lucro, reproducción, edición o modificación sin autorización expresa de quienes gozan de la propiedad intelectual, será perseguido y sancionado por el Instituto Nacional de Derechos de Autor.

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial
Compartir Igual, 4.0 Internacional



ÍNDICE

CONTENIDO	PÁGINA
DEDICATORIA.....	i
AGRADECIMIENTOS	ii
ÍNDICE DE FIGURAS	iv
RESUMEN.....	vi
ABSTRACT	vii
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. HIPÓTESIS.....	4
III. OBJETIVOS.....	4
3.1. Objetivo general	4
3.2. Objetivos específicos.....	4
IV. REVISIÓN DE LITERATURA	5
4.1. El tomate (<i>Solanum lycopersicum</i>)	5
4.2. Historia del tomate	5
4.3. Taxonomía del tomate	6
4.4. Descripción botánica del tomate	7
4.5. Fisiología del cultivo de tomate	9
4.6. Condiciones ambientales para su cultivo.....	10
4.7. Importancia	11
4.8. Enfermedades virales en el tomate.....	13
4.9. El Tomato brown rugose fruit virus (ToBRFV)	14

4.9.1. Origen y distribución	15
4.9.2. Taxonomía	16
4.9.3. Descripción	16
4.9.4. Transmisión.....	17
4.9.5. Síntomas del ataque de ToBRFV	18
4.9.6. Rango de hospedantes	19
4.9.7. Identificación y detección.....	19
4.9.8. Estrategias de manejo	20
4.9.9. Prevención de infecciones	21
4.9.10. Medidas fitosanitarias.....	21
4.9.11. Higiene y desinfección	22
4.9.12. Resistencia del huésped	22
4.9.13. Aplicaciones exógenas de biocontrol y ARN bicatenario	23
4.9.14. Edición genética	23
4.10. Estado del arte	24
V. MATERIALES Y MÉTODOS	26
5.1. Localización de la zona	26
5.3. Preparación e inoculación de las plantas	27
5.5. Establecimiento del experimento	29
5.6. Evaluación de la severidad del daño	30
5.7. Análisis estadístico	31
VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	33
6.1. Severidad del daño ToBRFV en los cultivares.....	33
6.2. Severidad de síntomas y su relación con la temperatura	39
VII. CONCLUSIONES	44

IX. LITERATURA CITADA.....	45
X.ANEXO.....	53

DEDICATORIA

A mis padres Raúl y Raquel

A mis amigas Brenda, María y Pamela

A Agrícola La Primavera

A mi compañera y gran ser humano Leonela

A los maestros de las diferentes universidades que contribuyeron a mi formación
y aprendizaje UAN, U de G, UCOL y UAS

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por darme la valentía y sabiduría que siempre necesito.

A mis padres por darme el regalo de la vida, por estar siempre para mí, por aconsejarme y escucharme en todo momento.

Al CONAHCYT por la manutención otorgada durante estos años, la cual fue de gran ayuda.

A la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Sinaloa por abrirme sus puertas.

Al director general de Agrícola La Primavera el Lic. Eduardo de la Vega Canelos por la licencia otorgada para que yo pudiera realizar mis estudios de maestría mientras laboraba en la empresa.

Agradezco enormemente al director de producción de Agrícola La Primavera el MC. José Luis Palafox Villa, por todo su apoyo, por dedicarle tiempo a mi formación como profesional y por resolver cada duda que tuve durante la realización de mi proyecto de tesis.

A mi director Dr. Carlos Alfonso López Urquidez, codirector Dr. Abraham Tirado y a mis asesores Dr. Tomás Vega y Dra. Lorena Molina por toda su dedicación y aportaciones a mi proyecto de tesis.

Al profesor Guadalupe Alfonso López Urquidez por su paciencia, su disposición, su apoyo y su tiempo dedicado para la corrección de la escritura de mi tesis.

A todos los maestros que aportaron su conocimiento y apoyaron con su experiencia a mi formación académica y profesional durante estos dos años.

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Taxonomía del tomate.....	6
Cuadro 2. Principales virus del tomate	14
Cuadro 3. Escalas de severidad en planta	30
Cuadro 4. Distribución de los materiales en los grupos conformados en el dendrograma de clasificación por el método de Ward a partir de la severidad del daño de ToBRFV en la hoja de tomate	34

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Morfología de la planta de tomate	7
Figura 2. Flor del tomate	8
Figura 3. Principales países exportadores en 2016.....	12
Figura 5. Localización del experimento entronque carretera Culiacán-Eldorado km 17.	26
Figura 6. Preparación del inóculo	27
Figura 7. Preparación e inoculación de plantas	28
Figura 8. Preparación del terreno.....	28
Figura 9. Escala de los síntomas de ToBRFV en planta.....	31
Figura 10. Análisis de Kruskal-Wallis de los promedios de sanidad de las hojas de los cultivares de tomate sometidos al ataque de virus \pm desviación estándar. Las letras iguales indican la igualdad del porcentaje.	33
Figura 11. Dendrograma de clasificación de los grupos conformados con los cultivares de tomate con base en el índice de sanidad en las hojas.....	34
Figura 12. Perfil de los grupos que integran el dendrograma de clasificación a lo largo de 16 semanas de acuerdo con la sanidad de las hojas de los cultivares evaluados.	35
Figura 13. Perfil de los materiales que integran el grupo 1 del dendrograma de clasificación a lo largo de 16 semanas de acuerdo con la sanidad de las hojas de los materiales evaluados ...	36
Figura 14. Perfil de los materiales que integran el grupo 2 del dendrograma de clasificación a lo largo de 16 semanas de acuerdo con la sanidad de las hojas de los materiales evaluados. ..	36
Figura 15. Perfil de los materiales que integran el grupo 3 del dendrograma de clasificación a lo largo de 16 semanas de acuerdo con la sanidad de las hojas de los materiales evaluados ...	37
Figura 16. Perfil de los materiales que integran el grupo 4 del dendrograma de clasificación a lo largo de 16 semanas de acuerdo con la sanidad de las hojas de los materiales evaluados. ..	38
Figura 17. Perfil de los materiales que integran el grupo 5 del dendrograma de clasificación a lo largo de 16 semanas de acuerdo con la sanidad de las hojas de los materiales evaluados. ..	38

Figura 18. Relación de la temperatura y el índice de sanidad durante las semanas evaluadas en el cultivar 1..... 40

Figura 19. Relación del déficit de presión de vapor y el índice de sanidad en el cultivar 1. 40

Figura 20. Análisis de regresión lineal de DPV máx por índice de severidad del cultivar 1.... 41

Figura 21. Análisis de regresión lineal de DPV mín por índice de severidad de cultivar 1..... 41

Figura 22. Análisis de regresión lineal de DPV promedio por índice de severidad de cultivar 1 42

RESUMEN

El cultivo del tomate (*Solanum lycopersicum* L.) es de gran importancia, a nivel mundial ocupa el segundo lugar en producción después de la papa. Así mismo, en México producen alrededor de 3 500 000 t, ocupando así el décimo lugar a nivel mundial. Sin embargo, las enfermedades causadas por virus siguen siendo una amenaza constante para la cantidad y calidad de la producción de esta hortaliza. El ToBRFV es un virus recientemente descrito en el año 2016 el cual se ha esparcido rápidamente por varios países del mundo entre ellos México. Con el presente estudio se buscó comprobar la tolerancia de diferentes cultivares al ToBRFV; que el nivel de incidencia está relacionado con las condiciones microclimáticas en que se desarrolla el cultivo y la etapa fenológica del cultivo. El estudio se realizó bajo condiciones de malla sombra, con un diseño experimental de bloques completos al azar y tres repeticiones. Para ello se inocularon 16 cultivares con el virus y posteriormente se trasplantaron en bolis de fibra de coco cubiertos por una malla sombra. Posteriormente se llevaron a cabo evaluaciones semanales durante cuatro meses por medio de una escala de índice de severidad. Los resultados muestran que todos los cultivares tuvieron algún nivel de daño, siendo el cultivar 14 el más sano y el cultivar 1 el que tuvo mayor daño. También se pudo observar que el déficit de presión de vapor influye en la atenuación de síntomas ya que cuando mayor es kPa menor será la sanidad y esto también dependerá de la etapa fenológica en la que se encuentra el cultivo.

ABSTRACT

The cultivation of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) is of great importance; worldwide it occupies second place in production after the potato. Likewise, in Mexico they produce around 3,500,000 tons, thus occupying tenth place worldwide. However, diseases caused by viruses remain a constant threat to the quantity and quality of this vegetable production. ToBRFV is a virus recently described in 2016 which has spread rapidly throughout several countries around the world, including Mexico. The present study sought to verify the tolerance of different cultivars to ToBRFV; that the level of incidence is related to the microclimatic conditions in which the crop is developed and the phenological stage of the crop. The study was carried out under shade mesh conditions, with a randomized complete block experimental design and three repetitions. To do this, 16 cultivars were inoculated with the virus and subsequently transplanted into coconut fiber pens covered by a shade mesh. Subsequently, weekly evaluations were carried out for four months using a severity index scale. The results show that all cultivars had some level of damage, with cultivar 14 being the healthiest and cultivar 1 having the most damage. It could also be observed that the vapor pressure deficit influences the attenuation of symptoms since the higher the kPa, the lower the health will be and this will also depend on the phenological stage in which the crop is located.

I. INTRODUCCIÓN

El tomate (*Solanum lycopersicum* L.) es una planta nativa de América tropical, perteneciente a la familia Solanáceas. A nivel mundial el tomate ocupa el segundo lugar como la hortaliza más cultivada después de la papa; además, es el vegetal más utilizado en la elaboración de gran variedad de productos procesados (Elamin y Ali *et al.*, 2012; FAO, 2023).

En el año 2021 se cosechó un área de 5167 388 ha con una producción de 189 133 955.04 t de tomate fresco en todo el mundo. El 42.99 % de la producción se concentró en cinco países: China (20.4 %), EUA (6.7 %), India (6.5 %), Turquía (5.4 %) y Egipto (3.8 %) (FAO, 2023). Por su parte, México ocupó la décima posición mundial con un 1.65 %, produciendo 3 461 766.43 t en el año 2022, donde la mayor producción se concentró en los estados de Sinaloa, San Luis Potosí, Michoacán, Jalisco, Baja California Sur, Morelos, Zacatecas, Puebla y Sonora (SIAP, 2023).

El rendimiento anual del cultivo del tomate ha aumentado a través de los años, pero las pérdidas en calidad y rendimiento siguen siendo de gran impacto debido al efecto de diversos factores, uno de ellos son los virus que causan enfermedades, las cuales son muy difíciles de controlar (Hanssen, 2010). Así mismo, los factores abióticos pueden debilitar o mejorar las respuestas de defensa de las plantas ante el ataque de diversos patógenos, y el resultado depende del momento, la naturaleza y la gravedad de cada estrés (Atkinson y Urwin, 2012).

El ToBRFV es una especie recientemente descrita del género de los tobamovirus, siendo una amenaza emergente, que ha afectado a cultivos de tomate en diversos países, tanto en invernadero como en campo abierto.

Además, es muy alarmante ya que ToBRFV puede infectar cultivares de tomate que portan Tm-1, Tm-2 o Tm-2² (Luria *et al.*, 2017; Oladokun *et al.*, 2019).

La infección y distribución del ToBRFV en invernaderos comerciales de tomate se reportó por primera vez en Jordania (Salem *et al.*, 2016). Posteriormente en Israel (Luria *et al.*, 2017). En el continente americano la enfermedad se observó por primera vez en México, en el estado de Michoacán (Cambron-Crisantos *et al.*, 2019) y luego en Baja California (Camacho-Beltrán *et al.*, 2019).

Como todos los tobamovirus el ToBRFV se caracteriza por ser una partícula en forma de varilla rígida, que posee un genoma de ARN monocatenario de sentido positivo con cuatro marcos de lectura abierto (ORFs por sus siglas en inglés de Open reading frames) (Dawson, 1992; van-Regenmortel *et al.*, 2000). Se transmite mecánicamente mediante herramientas de trabajo, personal de labores culturales, rafia, implementos de tractor, cajas de cosecha, carritos de cosecha, entre otros, así como por semillas contaminadas. Además, los abejorros también transmiten el virus de forma mecánica cuando visitan una planta enferma y luego plantas sanas durante la polinización (Levitzky *et al.*, 2019).

Los cultivares infectados por ToBRFV muestran síntomas característicos que consisten en alteraciones de forma y color de los folíolos (las hojas pueden presentar arrugamientos y ampollas).

Los síntomas son más notables en los frutos y se expresan como rugosidades y manchas amarillas o color marrón, hay reducción de tamaño y deformidades, en ocasiones maduración irregular y otras veces presentan alteraciones necróticas externas e internas (Salem *et al.*, 2015; Luria *et al.*, 2017; Cambron-Crisantos *et al.*, 2018; Departamento de Agricultura y Servicios al Consumidor de Florida (FDASC), 2019).

Los factores ambientales interfieren fuertemente en la interacción planta-patógeno, especialmente la temperatura. Las altas temperaturas están asociadas con una

baja concentración viral en las plantas infectadas y la consiguiente disminución de los síntomas (Johnson, 1922; Hull, 2002). La distribución de enfermedades virales y el desarrollo de síntomas severos están asociados con temperaturas frescas (Hine *et al.*, 1970; Gerick *et al.*, 1990).

Debido al efecto tan grande que causan las enfermedades virales, en especial las producidas por las especies del género Tobamovirus en los cultivos de tomate en México, es prioritario seleccionar los mejores cultivares de tomate tolerantes al ataque de este virus y el efecto de la temperatura en el comportamiento del ToBRFV para implementar métodos de control y reducir el daño de esta enfermedad. Así mismo, Las actuales especies de plantas cultivadas son el resultado de un proceso de selección realizada durante muchos años a partir de sus parientes silvestres. En este proceso estas últimas han adquirido tolerancia a los factores bióticos y abióticos, en cambio en las plantas cultivadas, el proceso ha sido al contrario debido a que la humanidad, en el proceso de selección, ha buscado mayor rendimiento y frutos más atractivos a la vista, lo cual trajo como consecuencia la pérdida de genes que proporcionan tolerancia a los factores adversos al desarrollo de las plantas (Gorovits *et al.*, 2022). Sobre esa premisa, se realiza la presente investigación.

II. HIPÓTESIS

El nivel de incidencia del ToBRFV variará entre los cultivares de tomate y la severidad estará en dependencia de la etapa fenológica del cultivo y de las condiciones microclimáticas.

III. OBJETIVOS

3.1. Objetivo general

Evaluar el nivel de incidencia y severidad de ToBRFV en diferentes cultivares de tomate.

3.2. Objetivos específicos

- a) Determinar el comportamiento de los genotipos de tomate ante el ataque de ToBRFV.
- b) Evaluar la relación de la temperatura en incidencia y severidad de ToBRFV en planta de tomate.
- c) Evaluar la relación de humedad relativa en incidencia y severidad de ToBRFV en la planta de tomate.
- d) Estimar el efecto del déficit de presión de vapor en la incidencia y severidad de ToBRFV en la planta de tomate.

IV. REVISIÓN DE LITERATURA

4.1. El tomate (*Solanum lycopersicum*)

El tomate es el fruto comestible de la planta *S. lycopersicum*, caracterizado por su piel roja, lisa y brillante, pulpa muy jugosa y semillas amarillas y planas (Barreto y González, 2021). Según Kumar *et al.* (2020) esta es una planta cultivada globalmente por sus frutos carnosos y nutritivos, siendo el segundo vegetal más cultivado en el mundo después de la papa y el líder en vegetales enlatados.

El fruto del tomate, por cada 100 g de peso fresco, tiene una composición química con 93 g de agua y proporciona 23 kilocalorías de energía. En términos de macronutrientes, el tomate verde maduro aporta 1.20 g de proteína, 0.20 g de grasa y 5.10 g de carbohidratos, de los cuales 1.1 g son fibra dietética total y 4 gramos son azúcares (Kumar *et al.*, 2020). Por lo que se ha vuelto un recurso indispensable en la alimentación.

4.2. Historia del tomate

Según Kumar *et al.* (2020) los aztecas de América Central cultivaban la planta de tomate, llamada xitomatl, alrededor del año 700 d.C., y los conquistadores españoles la nombraron tomate, transportando sus semillas desde los Andes a España y de allí a otros países europeos alrededor de 1520.

Además, Blanca y Cañizares (2022) señalan que originalmente los frutos de tomate eran muy pequeños en su estado silvestre, pero esta especie fue domesticada por los pueblos mesoamericanos hace aproximadamente 2600 años; estos autores indican que las evidencias sugieren que algunas plantas silvestres viajaron desde Mesoamérica a la zona andina, donde fueron domesticadas, generando una diversidad notable en la región, siendo que posteriormente, los tomates cultivados volvieron a Mesoamérica, probablemente tras haberse hibridado con variedades silvestres locales, adaptándose mejor a las condiciones ecuatoriales, en un proceso de domesticación y adaptación genética que ha

continuado a lo largo del tiempo. Al respecto, se conoce también que, a lo largo de la historia, la humanidad ha mejorado genéticamente al tomate para aumentar su rendimiento y calidad.

De hecho, Pereira *et al.* (2021) aseguran que estos procesos comenzaron en Europa en la segunda mitad del siglo XIX con los primeros esfuerzos de selección de variedades, seguido por la fundación de empresas de mejoramiento y producción de semillas en las primeras tres décadas del siglo XX, el desarrollo de variedades adaptadas a la cosecha mecánica en 1943 y su comercialización en la década de 1960, la introducción de cultivares híbridos en la década de 1940 que ofrecían uniformidad, resistencia y altos rendimientos, la recuperación de la riqueza alélica desde la década de 1960 mediante la introgresión de genes de resistencia a enfermedades e insectos de especies como *S. pennellii*, *S. peruvianum*, *S. chilense* y *S. habrochaites*, y la incorporación de genes que mejoraron el tamaño, color y sabor del fruto en la década de 1980.

4.3. Taxonomía del tomate

El tomate es un fruto originario de América central y sur, que pertenece a la familia *Solanaceae*, conocida también como la familia de las solanáceas o de las plantas de sombra nocturna (Kumar *et al.*, 2020). Su clasificación taxonómica se presenta en el **Cuadro 1**.

Cuadro 1. Taxonomía del tomate	
Categoría Taxonómica	Taxón
Reino	Plantae
División	Magnoliophyta
Clase	Magnoliopsida
Orden	Solanales
Familia	Solanaceae
Género	Solanum
Especie	Solanum lycopersicum
Nombre científico	Solanum lycopersicum
Nombre común	Tomate, Jitomate

Fuente: adaptado de Kumar *et al.* (2020)

Dentro del género *Solanum* se incluyen diversas especies cultivadas como *S. lycopersicum* Mill, así como especies silvestres como *S. peruvianum*, *S. pimpinellifolium*, *S. glandulosum*, *S. hirsutum* y *S. cheesemanii*. Además, el nombre actual que lleva el tomate ha sido cambiado recientemente por los taxonomistas quienes lo han transformado de *Lycopersicum esculentum* a *Solanum lycopersicum* (Kumar et al., 2020).

4.4. Descripción botánica del tomate

El tomate, según Escobar y Lee (2009), es una planta que ha sido cultivada y mejorada a lo largo de los siglos, resultando en una gran variedad de formas, colores y tamaños. Por lo tanto, a continuación, se detalla su descripción botánica de la planta de *tomate* (Figura 1).



Figura 1. Morfología de la planta de tomate

Fuente: Flaya (2019).

Tallo

El tallo, por lo general, mide entre 2 y 4 centímetros en la base de la planta y se vuelve más delgado en la parte superior, donde se desarrollan nuevas hojas y racimos de flores. Este se compone por epidermis, que incluye pelos glandulares, cilindro vascular, corteza y tejido medular.

Hoja

Las hojas del tomate son imparipinnadas y están formadas por folíolos alternos, rematando en un folíolo solitario en la punta. No obstante, la cantidad de hojas por tallo y la frecuencia con la que aparecen están principalmente influenciadas por el tipo de hábito de crecimiento de la planta y la temperatura. Así pues, en plantas con crecimiento determinado, a una temperatura de 23 °C en promedio, formándose 2 ½ hojas por semana.

Flores

La flor del tomate es hermafrodita con órganos funcionales de ambos sexos; la planta produce múltiples flores por inflorescencia y, en condiciones de invernadero, una planta de crecimiento indeterminado puede generar más de 20 inflorescencias sucesivas durante un ciclo de cultivo, con racimos florales formándose aproximadamente cada semana y media.



Figura 2. Flor del tomate
Fuente: Infoagro Systems S.L. (2016)

Frutos

El fruto del tomate, compuesto en un 94-95 % por agua, tiene el restante 5-6 % constituido por una mezcla compleja de componentes orgánicos que le otorgan su sabor y textura distintivos. Tarda entre 60 y 70 días desde la antesis hasta la cosecha. Además, las variedades cultivadas de tomate varían significativamente en forma, color y tamaño, incluyendo frutos rojos, naranjas, amarillos, marrones y verdes, con formas que van desde pequeños tomates cherry hasta grandes frutos irregulares tipo beef (Kumar *et al.*, 2020).

Semillas

Las semillas del tomate fisiológicamente maduro están rodeadas de una sustancia gelatinosa que llena las cavidades de la fruta, siendo numerosas, vellosas, de forma aplanada y ovalada, con colores que varían desde crema hasta marrón claro; miden entre 1/16 y 1/8 de pulgada de longitud, por lo tanto, una onza de semillas puede llegar a ser entre 7000 y 12 000 unidades (Fornaris, 2007).

4.5. Fisiología del cultivo de tomate

La fisiología del cultivo de tomate depende de cada etapa fenológica, estas son, de acuerdo con Escobar y Lee (2009):

- **Desarrollo vegetativo:** Esta etapa comienza con la germinación y la emergencia de la plántula y continúa hasta que aparece el primer racimo floral, el cual, generalmente, aparece después de que se formen de 5 a 10 hojas, lo que sucede una vez que la planta alcanza una altura de más de 40 cm.
- **Crecimiento vegetativo y reproductivo:** En esta fase, la planta experimenta un crecimiento simultáneo, tanto vegetativo como reproductivo, ya que aparecen nuevas hojas y racimos florales, desde los cuales se forman los frutos progresivamente.
- **Producción de frutos:** En esta etapa, los primeros frutos comienzan a madurar y están listos para la cosecha. No obstante, durante este tiempo

en que se cosechan los frutos, la planta sigue desarrollando nuevas hojas y racimos florales.

- **Maduración y fin del ciclo:** En esta etapa, debido a factores que se asocian a las prácticas de manejo o al tipo de hábito de crecimiento, el crecimiento se detiene de manera natural o inducida, y solo continúa el desarrollo de los frutos que ya se han formado.

4.6. Condiciones ambientales para su cultivo

El tomate se cultiva en regiones templadas y cálidas, siendo inapropiado para climas húmedos con temperaturas altas y una humedad relativa superior al 75 %, ya que la temperatura óptima para su crecimiento oscila entre 20 y 24 °C. Además, se desarrolla mejor en suelos profundos, sueltos, bien aireados y con una buena proporción de materia orgánica, con un pH ligeramente ácido (SAGARPA, 2017).

Por su parte, Ruíz (2017) aporta valores similares, consiguiendo que la temperatura óptima para su desarrollo es de 21 a 27 °C, con una mejor maduración del fruto entre 18 a 24 °C, ya que esta planta no tolera temperaturas bajas ni heladas, requiriendo más de 110 días con temperaturas favorables, y una humedad relativa óptima para su crecimiento de entre 60 y 80 %, ya que valores bajos afectan el metabolismo y la calidad de los frutos, mientras que niveles altos favorecen enfermedades fúngicas. Asimismo, asegura que la luminosidad influye en la floración y fecundación, por lo que es importante un manejo adecuado de la densidad de siembra.

La interacción de temperatura y humedad relativa, se refleja en el déficit de presión de vapor (DPV) definido como la diferencia entre como la diferencia entre la presión de vapor saturado y la presión de vapor real (Zhong, 2023). Su fluctuación influye en la presencia de enfermedades en plantas (O'Neill *et al.*, 1997; Sapak, 2023). Así como en el comportamiento general de las plantas.

En el caso del cultivo de tomate bajo control ambiental, se ha estimado que el déficit de presión de vapor (DPV) óptimo es de 0.85 kPa durante la fase vegetativa

y de 1.32 kPa durante la floración; pues valores superiores a 2 kPa indican un estrés significativo en las plantas de tomate, cuya primera respuesta al calor excesivo incluye una disminución en las etapas de crecimiento, desarrollo reducido de raíces, aumento de abortos florales, caída de frutos y menor productividad (Gutiérrez, 2019). Además, Gutiérrez (2020) observó que mantener una humedad relativa del 80 % tiene un impacto positivo y, que tanto el déficit de presión de vapor conductivo (DPVc), como la radiación solar influyen directamente en la conductancia estomática (g_s), siempre que el DPVc se mantenga dentro del rango óptimo de 0.7 a 1.3 kPa.

En cuanto a los requerimientos nutricionales del cultivo del tomate, Ruiz (2017) argumenta que el 92 % del peso seco del tomate está compuesto por carbono, hidrógeno y oxígeno, obtenidos de la atmósfera a través de la fotosíntesis, mientras que el 5-7 % restante incluye nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio y azufre. Esto significa que tiene altas demandas nutricionales, los cuales deben ser suministrados adecuada y oportunamente para maximizar su absorción y aprovechamiento. Pues, aunque algunos suelos pueden proporcionar todos los nutrientes necesarios, en su mayoría es esencial suplementar los elementos faltantes para evitar una disminución en los rendimientos

Durante las diferentes etapas del cultivo, las proporciones de macronutrientes deben ajustarse: una relación de 2-1-1 (N-P-K) al inicio, 1-2-1 durante la floración y 1-1-2 en la fructificación y cosecha (Ruiz, 2017). Afirmando que es así debido a que el fósforo es necesario para el enraizamiento y la floración.

4.7. Importancia

Durante décadas, los tomates se cultivaban únicamente durante la temporada favorable; sin embargo, recientemente se cultivan durante todo el año y en volúmenes más grandes cada año, debido a su importancia económica, convirtiéndose en una de las hortalizas más importantes y populares del mundo, ocupando el tercer lugar en la producción global por peso de todos los productos hortícolas, solo superado por las papas y las batatas (Kumar *et al.*, 2020).

Actualmente, se estima que el mercado del tomate alcanzará un valor de MM\$207.17 para finales del 2024 y se proyecta que crezca a una tasa compuesta anual del 4.76 %, llegando a MM\$261.41 en 2029 (Mordor Intelligence, 2024).

Además, las estadísticas indican que los principales países exportadores de tomates son México, los Países Bajos y España, seguidos por Marruecos y Canadá, mientras que Estados Unidos se destaca como el mayor importador de tomates provenientes de México (Mordor Intelligence, 2024).

El tomate es de gran importancia en México, representando el 3.46 % del PIB agrícola nacional y el 22.6 % de la producción de hortalizas, convirtiendo al país en el principal proveedor mundial de esta hortaliza con un 25.11 % del valor de las exportaciones globales (**Figura 3**). Siendo incluso, que, en 2016, el tomate mexicano cubrió el 90.67 % de las importaciones de Estados Unidos y el 65.31 % de las de Canadá (SAGARPA, 2017).

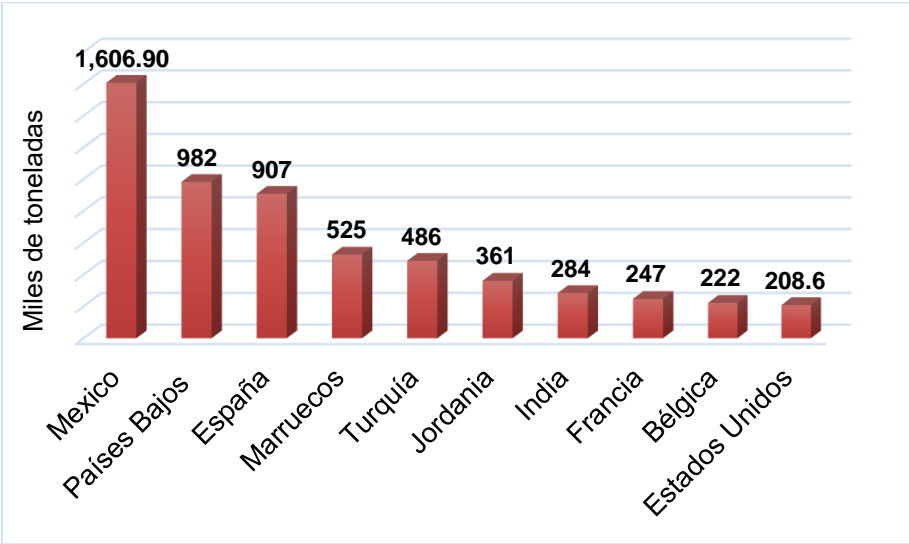


Figura 3. Principales países exportadores en 2016
Fuente: Elaboración propia con base de datos de SAGARPA (2017).

En 2022, la producción de tomate en México estuvo altamente concentrada, con seis estados responsables del 53 % de la producción total, siendo Sinaloa el principal estado productor de tomate en el país (Mordor Intelligence, 2024), con 712 013.13 t hasta el año 2023, siguiéndole San Luis Potosí con 436 097 t,

Michoacán con 356 775.74 t, Jalisco con 211 715.90 t, Morelos con 201 721.36 y Baja California Sur con 171 838.23 t (SIAP, 2024).

4.8. Enfermedades virales en el tomate

Las epidemias de enfermedades en plantas, incluidas las causadas por virus, representan una amenaza significativa para la seguridad alimentaria local y global, agravando la malnutrición, con pérdidas estimadas en MM\$30 anuales, debido a virus de plantas, y aumentando a MM\$220 al incluir plagas y otros patógenos, lo que puede llegar a afectar potencialmente cualquier cultivo con resultados devastadores (Salem *et al.*, 2023).

Con respecto al tomate, su producción está constantemente amenazada por diversas enfermedades virales emergentes (**Cuadro 2**) (Navas-Castillo y Fiallo-Olivé, 2022). Estos autores señalan que, entre los virus más importantes que afectan al cultivo de tomate, se encuentran el virus del rizado amarillo del tomate, el virus del amarilleo del tomate, el virus del fruto rugoso marrón del tomate, el virus sureño del tomate y el virus del rizado del tomate de Nueva Delhi. Los cuales causan una variedad de síntomas que incluyen clorosis, acucharamiento de las hojas, reducción del área foliar, enanismo, manchas amarillas, deformaciones en los frutos y una reducción significativa en la calidad y cantidad de la cosecha.

Por ejemplo, el virus del rizado amarillo del tomate, causado por un complejo de begomovirus, y el virus del amarilleo del tomate, provocado por el crinivirus ToCV, son muy devastadores y están ampliamente distribuidos. Mientras que el virus sureño del tomate, aunque generalmente es asintomático, puede interactuar sinérgicamente con otros virus, aumentando la severidad de la infección. Asimismo, el virus del rizado del tomate de Nueva Delhi ha causado graves brotes en cucurbitáceas y representa una seria amenaza para los cultivos de tomate. Y, por su parte, el virus del fruto rugoso marrón del tomate, un tobamovirus altamente estable y transmisible, ha llevado a la implementación de medidas estrictas de control desde su detección (Navas-Castillo y Fiallo-Olivé, 2022).

Cuadro 2. Principales virus del tomate

AÑO	VIRUS (ACRÓNIMO)	GÉNERO (FAMILIA)	ENFERMEDAD	MODO DE TRANSMISIÓN
1977	Tomato mosaic virus (ToMV)	Tobamovirus (Virgaviridae)	Mosaico	Contacto y semilla
1985	Potato virus Y (PVY)	Potyvirus (Potyviridae)	Mosaico y deformación foliar	Pulgón
			Mosaico y filimorfismo	Pulgón
1986	Cucumber mosaic virus (CMV)	Cucumovirus (Bromoviridae)	Rizado amarillo	Mosca blanca
1992	Tomato yellow leaf curl virus (TYLCSV)	Begomovirus (Geminiviridae)	Rizado amarillo	Mosca blanca
1994	Tomato bushy stunt virus (TBSV)	Tombusvirus (Tombusviridae)	Enanismo ramificado	Semilla
1995	Tomato spotted wilt virus (TSWV)	Orthotospovirus (Tospoviridae)	Bronceado	Trips
1997	Tomato yellow leaf curl virus-Mild (TYLCV-Mld)	Begomovirus (Geminiviridae)	Rizado amarillo	Mosca blanca
1997	Tomato chlorosis virus (ToCV)	Crinivirus (Closteroviridae)	Amarilleo	Mosca blanca
1999	Tomato yellow leaf curl virus-Málaga (TYLCMaV)	Begomovirus (Geminiviridae)	Rizado amarillo	Mosca blanca
2000	Pepino mosaic virus (PepMV)	Potexvirus (Alphaflexiviridae)	Mosaico foliar y en fruto	Contacto y semilla
2000	Tomato yellow leaf curl virus-Axarquía (TYLCAxV)	Begomovirus (Geminiviridae)	Rizado amarillo	Mosca blanca
2001	Tomato infectious chlorosis virus (TICV)	Crinivirus (Closteroviridae)	Amarilleo	Mosca blanca
2001	Tomato torrado virus (ToTV)	Torradovirus (Secoviridae)	Torrado	Mosca blanca
2001	Parietaria mottle virus (PMoV)	Iiarvirus (Bromoviridae)	Mosaico necrótico	Polen y semilla
2002	Tomato yellow leaf curl virus-Israel (TYLCV-IL)	Begomovirus (Geminiviridae)	Rizado amarillo	Mosca blanca
2006	Southern tomato virus (STV)	Amalgavirus (Amalgaviridae)	?	Semilla
2013	Tomato leaf curl virus-New Delhi virus-Spain (ToLCNDV-ES)	Begomovirus (Geminiviridae)	Rizado	Mosca blanca
2017	Tomato yellow leaf curl virus-IS76 (TYLCV-IS76)	Begomovirus (Geminiviridae)	Rizado amarillo	Mosca blanca
2019	Tomato brown rugose fruit virus (ToBRFV)	Tobamovirus (Virgaviridae)	Fruto rugoso marrón	Contacto y semilla

Fuente: Navas-Castillo y Fiallo-Olivé (2022).

4.9. El Tomato brown rugose fruit virus (ToBRFV)

El ToBRFV es un virus de ARN emergente y de rápida propagación que afecta a plantas de tomate, causando grandes pérdidas de cultivos y amenazando la

producción mundial, habiéndose reportado en más de 35 países desde su descubrimiento en Jordania en 2015 y su primer brote en Israel en 2014 (Zhang, 2022). Por lo tanto, es de suma importancia, indagar en la información relevante sobre la teoría publicada sobre el mismo.

4.9.1. Origen y distribución

En 2015, se aisló por primera vez el ToBRFV en Jordania a partir de plantas de tomate cultivadas en invernaderos que mostraban síntomas leves en las hojas y graves en los frutos. La secuenciación del genoma completo reveló que se trataba de un nuevo tobamovirus. Sin embargo, un año antes, en 2014, se había observado un brote similar en el sur de Israel, donde los cultivares de tomate con el gen de resistencia Tm-22 presentaban mosaico en las hojas y manchas amarillas en los frutos, por lo que determinaron la relación entre los brotes debido a la alta identidad de secuencia entre los aislados israelí y jordano (Caruso *et al.*, 2022).

El ToBRFV se ha dispersado rápidamente a nivel global debido a su capacidad para evadir la detección por los genes antivirales del huésped, que proporcionan resistencia a otros tobamovirus en las plantas de tomate (Nash *et al.*, 2024). Pues, desde los descubrimientos iniciales, se han registrado casos de ToBRFV en varios países, incluyendo Palestina, México, y varios otros en Europa y Asia durante 2018 y 2019. En 2020 y 2021, la propagación del virus continuó hacia nuevos países como Francia, Polonia y Austria; atribuyéndose su rápida expansión entre países, debido al intenso movimiento de semillas infectadas. Además, se han detectado infecciones en plantas de pimiento en Jordania, Italia, Turquía, Siria y Líbano (Caruso *et al.*, 2022).

Como se puede apreciar en la **Figura 4**, para el 2023 el ToBRFV se había registrado en más de 37 países de cuatro continentes (Asia, Europa, América del Norte y África), lo que se debe en gran parte a su capacidad para ser transmitido a través de semillas y otros materiales de propagación (Salem *et al.*, 2023).

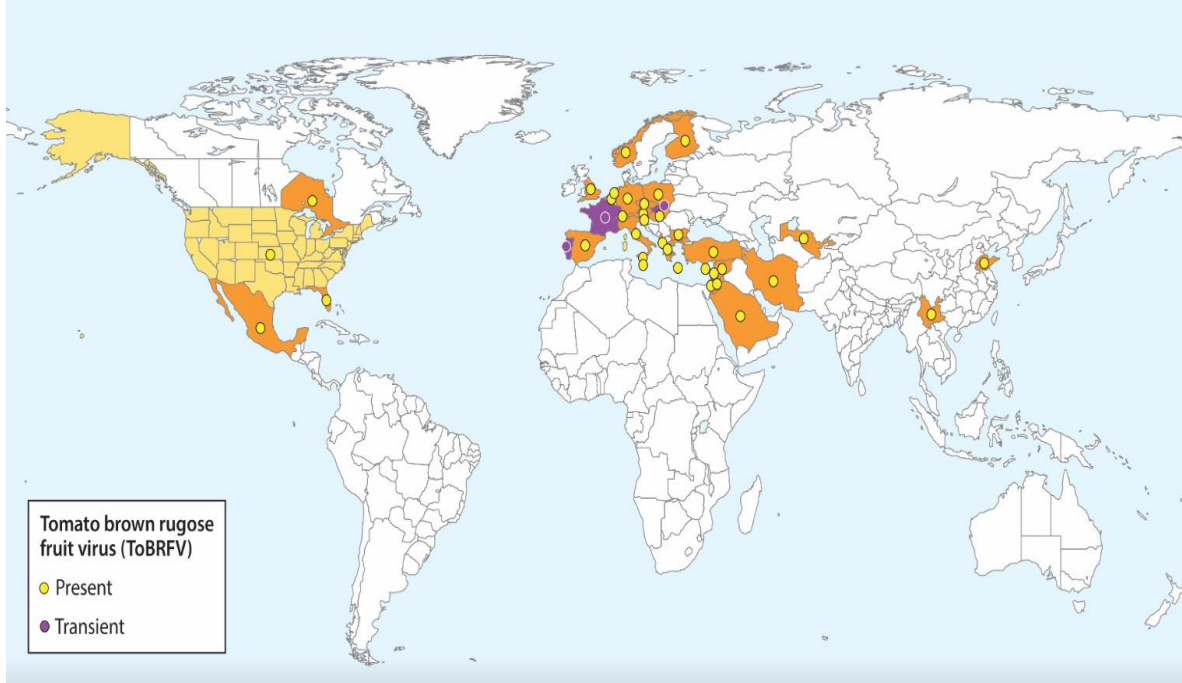


Figura 4. Distribución del ToBRFV en 2023
Fuente: Salem et al. (2023)

4.9.2. Taxonomía

ToBRFV pertenece al género *Tobamovirus* y a la familia *Virgaviridae*. Esta familia *Virgaviridae* incluye virus de plantas con genomas de ARN monocatenario y está compuesta por siete géneros: *Goravirus*, *Furovirus*, *Hordeivirus*, *Pecluvirus*, *Pomovirus*, *Tobamovirus* y *Tobravirus*. De estos géneros, el *Tobamovirus* es el que incluye más especies (Caruso et al., 2022).

4.9.3. Descripción

Se han definido claramente las características moleculares de ToBRFV (Salmen et al., 2016; Luria et al., 2017). El virus tiene partículas rígidas en forma de bastón de 300 nm de longitud y 17 nm de diámetro. El genoma es una sola molécula de ARN de cadena positiva. Encipta cuatro marcos de lectura abierto (ORF) distintos. Las dos primeras proteínas están relacionadas con la replicación; codifican una proteína de 126 kDA y otra de 183 kDA, la proteína del movimiento (MP) se expresa a partir de un ARN subgenómico específico y tiene la masa molecular

predicha de 30 kDA; la proteína de la cubierta (CP) es la única proteína de estructura codificada por el genoma y se expresa mediante un segundo ARN subgenómico específico y tiene una masa molecular prevista de 17.5 kDA. Actualmente hay diez secuencias de longitud completas en GenBank, dos de Jordania, una de Israel, dos de Palestina, dos de Alemania, una de Italia, una de Reino Unido y una de México. Todas comparten poco más del 99.5 % de identidad a nivel nucleótidos, lo que sugiere sólidamente la distribución del mismo aislado en el mundo.

4.9.4. Transmisión

La dispersión y propagación del ToBRFV ocurre principalmente de manera mecánica, pero también puede transportarse a largas distancias a través de semillas y bayas contaminadas (Panno et al., 2020). En primer lugar, se tiene que en la revisión realizada por Caruso et al. (2022) se encontró que, durante el cultivo, la transmisión a corta distancia se produce mediante material de propagación infectado, contacto directo de planta a planta y prácticas de cultivo que causan heridas en las hojas o raíces; además, la savia infectada puede transferirse a través de superficies como ropa, herramientas, guantes, zapatos y sistemas de riego o drenaje, y que después de la cosecha, el virus puede permanecer infeccioso en diversas superficies y materiales de invernadero.

Los organismos vivos también pueden ser agentes de transferencia, por ejemplo, en un estudio realizado por Levitzky et al. (2019), los abejorros también pueden propagar el virus durante la polinización de manera mecánica.

El ToBRFV es un virus principalmente transmitido por medio de semillas, localizándose principalmente en los tegumentos externos de la semilla (Davino et al., 2020). Y es que, según estos mismos autores, aunque la tasa de transmisión de semilla a plántula es baja, el virus puede propagarse rápidamente una vez que las plántulas infectadas son trasplantadas, alcanzando tasas de infección del 100 % en invernaderos.

Por lo tanto, autores como Caruso *et al.* (2022), consideran que la alta persistencia del virus en agua y suelo, junto con la transmisión mecánica, contribuye a su rápida y extensa propagación, afectando cultivos de tomate y pimiento en invernaderos y campos abiertos.

4.9.5. Síntomas del ataque de ToBRFV

El ToBRFV causa una variedad de síntomas en las plantas de tomate, que varían según el cultivar, la edad de la planta en el momento de la infección y las condiciones ambientales como la temperatura y el tipo de cultivo. Sin embargo, los síntomas más comunes en las hojas incluyen mosaico con ampollas y estrechamiento de color verde oscuro en las hojas más viejas, algunos autores han reportado necrosis localizada en el tallo (Panno *et al.*, 2020), mientras que en los frutos pueden aparecer manchas rugosas color marrón, habiéndose reportado también la necrosis en pedúnculos, cálices y pecíolos, y una maduración desigual de los frutos en algunos cultivares. (Luria *et al.*, 2017).

Las flores también pueden ser afectadas por marchitamiento. El síntoma más común de los frutos es la decoloración (amarilla o verde) en áreas específicas que se extienden internamente. La severidad de los síntomas rugosos marrones con decoloración y deformación depende del cultivar específico, el momento de la infección y probablemente las condiciones ambientales.

De igual manera, el virus puede afectar el potencial de rendimiento entre el 15 y 55 %, y se ha observado una disminución del 25 al 40 % en el peso promedio de la fruta en el cultivar TOP-2299 en México; además, infecciones mixtas con otros virus como el PepMV y el TSWV pueden manifestarse con síntomas diferentes a los conocidos para este virus, dificultando la identificación precisa del ToBRFV y sugiriendo una posible interacción entre los virus coinfectantes que genera sinergia entre ellos aumentando la severidad de los mismos (Salem *et al.*, 2023).

4.9.6. Rango de hospedantes

Hasta la fecha, el tomate y el pimiento son las principales especies cultivadas que actúan como huéspedes naturales del ToBRFV (Caruso *et al.*, 2022; Alkowni *et al.*, 2019). Investigadores han encontrado que este virus puede infectar variedades de tomate que contienen genes de resistencia al tobamovirus y variedades de pimiento que portan alelos de resistencia específicos; al tiempo que los pimientos, aunque sean más resistentes, pueden ser infectados si se plantan en suelos contaminados a temperaturas superiores a 30 °C (Salem *et al.*, 2023). No obstante, según Zhang *et al.* (2022), en condiciones de laboratorio este virus es capaz de infectar a diversas especies pertenecientes a cuatro familias botánicas: *Amaranthaceae*, *Apocynaceae*, *Asteraceae* y *Solanaceae*.

Un estudio en China en el que el aislado ToBRFV de la provincia de Shandong (ToBRFV-SD) causó la infección latente, tanto de la berenjena como de la papa después de la inoculación mecánica (Yan Z *et al.*, 2021). Además, en Sinaloa, México se detectó una muestra de berenjena positiva a ToBRFV en diciembre de 2018 (EPPO, 2019).

4.9.7. Identificación y detección

Se han desarrollado numerosas herramientas y métodos para la detección de ToBRFV desde su aparición, incluyendo técnicas basadas en ARN, serología, microscopía electrónica, HTS y bioensayos. Según Caruso *et al.* (2022), la detección basada en ARN específico, particularmente mediante RT-qPCR, es la más popular, con numerosos pares de cebadores, sondas y protocolos publicados, aun así, esta requiere un diseño cuidadoso de los cebadores para equilibrar la especificidad diagnóstica y la exclusividad. El mismo autor señala que también se han utilizado métodos avanzados como la ddPCR, que ofrece una cuantificación directa y una mayor sensibilidad, y la RT-LAMP acoplada a CRISPR-Cas12a, que mejora la portabilidad y especificidad del método para uso en campo; así como los ensayos ELISA, que pueden presentar reactividad cruzada con otros tobamovirus, y los métodos no rutinarios como HTS y microscopía electrónica se han utilizado

para las primeras descripciones del virus y la identificación en nuevas áreas geográficas.

Además, Tiberini *et al.* (2022) también han encontrado que los bioensayos se utilizan para la detección de ToBRFV, aunque para su uso se requiere más infraestructura y tiempo que otros métodos, además, su sensibilidad suele ser menor. Sin embargo, pueden ser necesarios para verificar la supervivencia del virus después de tratamientos de desinfección. Por su parte, la Federación Internacional de Semillas y la Fiscalía Europea han desarrollado protocolos detallados para la detección de ToBRFV en semillas, incluyendo muestreo, extracción de ARN y detección mediante RT-qPCR.

Nash *et al.* (2024), desarrollaron un método de secuenciación de amplicones en mosaico para rastrear la evolución del genoma del ToBRFV en sistemas de tratamiento de aguas residuales municipales, empleando un esquema de cebadores de amplicones en mosaico, utilizando recursos de la Red ARTIC, como el diseño de cebadores, la preparación de bibliotecas de secuenciación y el análisis de lecturas, para secuenciar y monitorear la evolución de los genomas.

Además, estos autores adaptaron la herramienta Alcov para estimar la abundancia relativa de clados de ToBRFV en las muestras.

4.9.8. Estrategias de manejo

Para manejar el virus, Caruso *et al.* (2022) recomiendan que, ante la sospecha de infección, se debe contactar con un laboratorio especializado para realizar pruebas serológicas o moleculares rápidas. Además, indican que es fundamental mantener estrictas medidas de higiene en campo abierto e invernaderos, incluyendo el uso de ropa limpia o desechable, lavado de manos, y desinfección de herramientas y superficies. Asimismo, una medida efectiva, puede ser solo permitir el acceso al campo y los invernaderos al personal esencial, restringiendo las visitas y evitando la transferencia de tomates o pimientos entre diferentes lugares; además, la implementación de la rotación de cultivos, la eliminación de residuos postcosecha

y el uso de material de propagación certificado se han señalado como métodos para prevenir infecciones tempranas.

Por su parte, Salem *et al.* (2023) señala que, la forma más efectiva de controlar el ToBRFV, es utilizando un enfoque de manejo integrado de enfermedades (MIE), que abarca medidas fitosanitarias, prácticas de higiene y desinfección, técnicas culturales, resistencia de las plantas huésped, control biológico y técnicas de ingeniería genética.

4.9.9. Prevención de infecciones

Fidan *et al.* (2024) destacan la importancia de prevenir infecciones desde la etapa de semilla, pues ellos comprobaron cómo las semillas infectadas que fueron sometidas a desinfección térmica gradual (elevando la temperatura de 20 °C a 72 °C durante 3 días) se logró reducir su tasa de contaminación al 0.3 %, haciendo al virus no infeccioso. Además, estos autores argumentan que el tratamiento con luz ultravioleta a 254 nm durante 30 minutos, redujo las tasas de contaminación en un 50 %.

Mientras tanto, Dombrovsky y Smith (2017) señalan que, aunque actualmente el manejo de este virus se basa principalmente en medidas fitosanitarias, se han hecho avances significativos en la resistencia del huésped, la ingeniería genética y el control biológico, esperando que las estrategias combinadas sean aplicables próximamente en campos.

4.9.10. Medidas fitosanitarias

Para cultivar tomates libres del ToBRFV y evitar su propagación en sistemas de agricultura protegida, es esencial identificar y aplicar una combinación de prácticas fitosanitarias durante el proceso de producción de tomate (Panno *et al.*, 2020). En este sentido, técnicas como la selección de híbridos de tomate F1 tolerantes a los tobamovirus, el uso de semillas libres de ToBRFV y la promoción de plantas que produzcan altos niveles de proteínas solubles totales, compuestos fenólicos y una significativa actividad enzimática de catalasas y peróxido dismutasa son

estrategias innovadoras para prevenir la propagación del virus y asegurar cultivos saludables (Vásquez-Gutiérrez, 2024).

4.9.11. Higiene y desinfección

La bioseguridad de los cultivos comienza con mantener una alta higiene de las semillas que se comercializan. Por ello, múltiples investigadores han estudiado esta área, encontrando que diversos desinfectantes han sido eficaces contra el ToBRFV en diferentes dosis y aplicaciones, como el suelo, soluciones de savia, tratamientos de semillas y superficies de invernadero (Ling *et al.*, 2022). En este sentido, Hiddink *et al.* (2023) afirman que un enfoque sistémico, que incluye pruebas diagnósticas y buenas prácticas de higiene, puede minimizar los riesgos asociados con patógenos transmitidos por semillas.

Asimismo, con los tratamientos térmicos y químicos se ha demostrado que son efectivos para desinfectar de semillas (Davino *et al.*, 2020; Fidan *et al.*, 2024; Vargas-Mejía *et al.*, 2024). Al respecto, el estudio realizado por Fidan *et al.* (2024), comprobó que los desinfectantes como Tsunami 100 al 1 % (contiene ácido acético, ácido peroxiacético y peróxido de hidrógeno) y Biocon A al 1 % (peroximonosulfato de potasio con tampón y ácido orgánico) se tiene un éxito notable en la reducción de la contaminación viral. Davino *et al.* (2020) reportaron que, mediante inmersión en una solución de hipoclorito de sodio al 2.5 % durante 15 minutos, aseguran, tanto una germinación completa, como la desinfección efectiva de las semillas. Por su parte, Vargas-Mejía *et al.* (2023) encontraron que el tratamiento térmico es eficaz cuando se lleva a 92 °C durante 30 minutos, pues logra inactivar el virus.

4.9.12. Resistencia del huésped

En cuanto a los estudios en el cultivo, se ha investigado que el manejo de la resistencia genética es un enfoque ecológico y sostenible para controlar enfermedades virales, encontrando que genes como Tm-1, Tm-2 y TM-22, derivados de diferentes especies de *Solanum*, han mostrado eficacia contra tobamovirus (De Ronde *et al.*, 2014). Sin embargo, el ToBRFV ha mostrado ser

insensible a estas fuentes de resistencia en el tomate y puede superar la resistencia en pimientos a altas temperaturas (Fidan *et al.*, 2021). Además, diversos estudios han identificado germoplasma natural resistente y tolerante al ToBRFV en líneas de tomate y genotipos de tomate silvestre (Jeweihan *et al.*, 2022).

4.9.13. Aplicaciones exógenas de biocontrol y ARN bicatenario

Se ha demostrado que la protección cruzada, que consiste en infectar deliberadamente las plantas con una cepa leve del virus para adquirir resistencia, es un método efectivo de biocontrol, que extractos de plantas como *Mirabilis jalapa* y *Pseuderanthemum bicolor* también tienen actividad antiviral, así como las aplicaciones exógenas de ARN bicatenario son potencialmente efectivas (Folimonova *et al.*, 2020). Y Iobbi *et al.* (2022), han mostrado que el ácido 4-hidroxibenzoico y el ácido catequínico pueden desactivar la infectividad del ToBRFV.

4.9.14. Edición genética

Las técnicas de edición genética, como CRISPR-Cas9, son una nueva herramienta eficaz para lograr resistencia a virus en plantas (Gaafar y Ziebell 2020). Esto es debido a que con esta técnica se pueden eliminar los genes del huésped que tienen una función proviral para los virus de ADN o ARN en las mismas (Kalinina *et al.*, 2020). Además, con esta tecnología se puede modificar genes del huésped esenciales para la replicación viral, proporcionando una resistencia duradera y completa contra el ToBRFV y otros tobamovirus, a través de la eliminación de cuatro homólogos de TOM1, SITOM1a, b, c y d, que son necesarios para la transmisión del virus (Ishikawa *et al.*, 2022). No obstante, ante el uso de esta alternativa, hay que recordar que las plantas modificadas genéticamente encuentran poca aceptación social y deben superar estrictas regulaciones para ser aprobadas en la mayoría de los países (Salem *et al.*, 2023). Por lo tanto, es un desafío la idea de abordar al ToBRFV desde este enfoque.

4.10. Estado del arte

Mehle (2023), reportó que el virus ToBRFV tuvo mayor supervivencia al ser almacenado en una muestra de agua de drenaje a 4 °C durante 14 días, mientras que cuando se almacenó a temperatura ambiente 25°C, sobrevivió menos de dos semanas. Por lo que se concluye que el virus encuentra sus condiciones óptimas a temperaturas bajas 4 °C ± 2°C, mientras que las temperaturas altas disminuyen su tasa de supervivencia y de diseminación.

Vázquez U. *et al.* (2024), realizaron varios experimentos en invernadero utilizando plantas de tomate y tabaco. Las plantas de tomate fueron inoculadas con el virus para evaluar la aparición de inclusiones virales, el punto de dilución final, el período de incubación y el período de latencia. Las plantas de tabaco fueron inoculadas para determinar la longevidad *in vitro* y la inactivación térmica del virus en la savia.

La inactivación térmica del ToBRFV se evaluó en plantas de tabaco (*Nicotiana longiflora*). La savia infectada con el virus se expuso a diferentes temperaturas para determinar el punto de inactivación térmica. Los resultados obtenidos indican que la inhibición de ToBRFV se produjo tanto a temperaturas bajas (-15 °C) como altas (85 °C a 99.5 °C).

Luria *et al.* (2017) evaluaron el daño en plantas de pimiento cultivadas en suelo contaminado con ToBRFV a partir de plantas de tomate infectadas previamente cultivadas, a temperaturas superiores a 30 °C, la respuesta de hipersensibilidad aumento, provocando lesiones necróticas en raíces y tallos que dieron como resultado una inhibición del crecimiento de la planta que en ocasiones condujo a la muerte de la planta. Las plantas de pimiento corren un riesgo cuando se plantan en suelo contaminado por un ciclo de crecimiento anterior de plantas de tomate infectadas, especialmente en temperaturas altas por encima de 30 °C, ya que la respuesta HR en la raíz-tallo a menudo conduce al colapso de la planta.

Skelton *et al.* (2023) probaron diferentes temperaturas para determinar la temperatura a la que se logra la inactividad del virus ToBRFV, donde se observó

que cada aumento de temperatura redujo el número de lesiones observadas en cada planta de prueba, las plantas sin lesiones solo se observaron con remojo a 90 °C y 95 °C durante 5 min. Además, 85 °C funcionó parcialmente ya que el número de lesiones se redujo después del tratamiento, pero no se logró una reducción del 100 %. Esto sugiere que 90 °C es la temperatura necesaria para desactivar ToBRFV.

Caruso *et al.* (2022) definieron Los efectos directos sobre los patógenos vegetales y el efecto sobre la incidencia, gravedad, distribución temporal y espacial de las enfermedades están considerablemente relacionados con los cambios climáticos, como el aumento de concentración de CO₂ y temperaturas diarias y anuales. ToBRFV induce diferentes síntomas en las plantas de tomate, que difieren con relación al cultivar, la estación de crecimiento, el fotoperiodo, la temperatura y la edad de la planta en el momento de la infección.

Fidan (2021) reportó que ToBRFV puede infectar sistémicamente cultivares de pimiento que portan genes de resistencia L 1 o L 2, mientras que las plantas de pimiento que albergan los genes L 3 o L 4 son resistentes ya que la infección con ToBRFV desencadena HR (Hipersensibilidad). A temperaturas más altas, la infección por el ToBRFV aislado de Turquía se vuelve sistémica en las plantas de pimiento L 3,4. Por lo tanto, los genes de resistencia L 3 y L 4 pueden actuar condicionalmente contra los tobamovirus. El gen inoculado con ToBRFV no mostró síntomas cuando las temperaturas subieron a 35-40 °C durante 10 días; sin embargo, alterando las temperaturas provocaron síntomas severos en la fruta, estrechamiento de hojas y síntomas rugosos en las hojas. Por lo tanto, la reacción de las plantas de tomate al ToBRFV no se pudo evaluar de forma fiable hasta los 90 días de las plántulas.

V. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1. Localización de la zona

El estudio se realizó en casa sombra en la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Sinaloa, ubicada a $24^{\circ} 37'24''$ LN y $107^{\circ} 26'36''$ LO, con altitud de 38.54 m en Sinaloa, México.



**Figura 5. Localización del experimento.
Carretera Culiacán-Eldorado km 17.
Fuente: Google Maps, 2024.**

5.2. Obtención del inóculo

Como se muestra en la **Figura 6**, la preparación del inóculo de virus fue mediante la trituración de hojas de plantas de tomate infectadas (previamente detectadas e identificadas por RT-PCR), mezcladas con buffer de fosfato 0.01M con pH 7.4 siguiendo la metodología de Hull, R., 2009. En un mortero se colocó la muestra infectada y se le adicionó el buffer a la par del equivalente en peso de la muestra. El abrasivo con el que se realizó el daño foliar fue un vidrio molido finamente, obtenido a partir de triturar pipetas Pasteur en un mortero y almacenada en una estufa a 75 °C para evitar humedad y contaminación por virus.



Figura 6. Preparación del inóculo

5.3. Preparación e inoculación de las plantas

Se sembraron semillas de tomate de 16 cultivares, en charolas de 60 cavidades. Una vez emergidas y mostrando las primeras dos o tres hojas verdaderas, se infectaron por inoculación mecánica como se muestra en la **Figura 7**, siguiendo el protocolo de Hull (2009) modificado de la siguiente forma:

- a) Aplicar el abrasivo (vidrio molido) en la o las hojas de la planta hospedante
- b) Sumergir hisopo en la muestra infectada y tallar suavemente la hoja
- c) Retirar exceso de abrasivo con agua destilada.



Figura 7. Preparación e inoculación de plantas

5.4. Preparación del terreno

Se formaron y emplasticaron 6 camas de 31 m de largo por .8 m de ancho, habiendo una distancia de 1.6 m de centro a centro de las camas, como se muestra en la **Figura 8**. Las plantas testigo se establecieron en 2 camas de medidas iguales, separadas por 10 m de los tratamientos. El sistema de riego lo compone una pileta y tubines con piquetas con los que se aplicaron los riegos por pulsos.

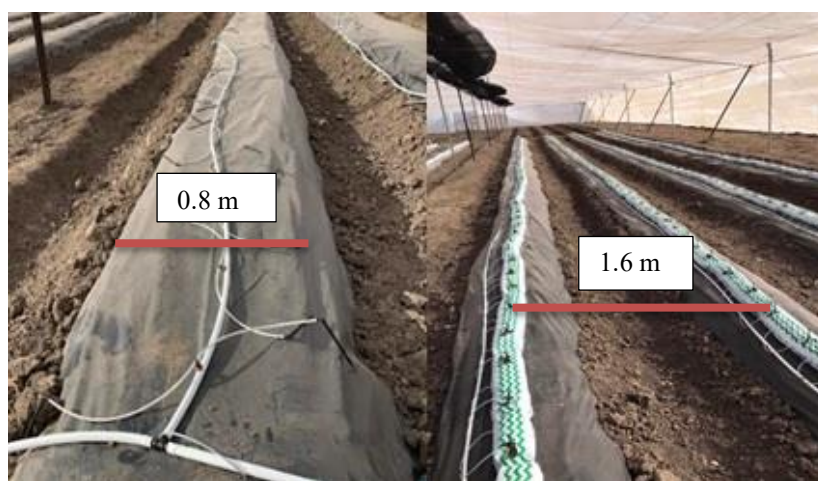


Figura 8. Preparación del terreno

5.5. Establecimiento del experimento

Una vez inoculadas las plantas se sembraron en la malla sombra en bolis de plástico con sustrato de fibra de coco (80 % fibra gruesa y 20 % fibra fina). Se plantaron los 16 cultivares identificados del uno al 16 con cuatro repeticiones de cuatro plantas cada una, con separación de 40 cm entre plantas, donde seis camas fueron de tratamientos y dos camas de testigo con un diseño de bloques completos al azar.

Se midió la temperatura y humedad relativa cada hora durante las semanas de evaluación. Diariamente se fertilizaron a través del riego por goteo, desde el trasplante al primer racimo con la solución nutritiva compuesta por 125 g/L de ácido nítrico (HNO_3), 410 mL/L de nitrato de calcio $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, 300 g/L de nitrato potásico (KNO_3), 037 g/L de nitrato amónico (NH_4NO_3), 204 g/L de fosfato monopotásico (KH_2PO_4), 108 g/L de sulfato potásico (KSO_4) y 265 g/L de sulfato de magnesio (MgSO_4), diluidos en 1000 litros de agua (Muñoz-Ramos, 2003). El tiempo de riego lo determinó el uso de una bandeja de drenaje manejada manualmente.

Con los datos de temperatura y humedad relativa se calculó el déficit de presión de vapor mediante la siguiente fórmula (Allen *et al.*, 2006; Noh y Lee, 2022).

$$DPV = PMVS - PVR$$

Dónde:

DPV = Déficit de presión de vapor

PMVS = Presión media de vapor de saturación

$$PMVS = 0.6108 * \log_e^{\frac{17.27 * T}{T + 237.3}}$$

T = temperatura máxima en °C cuando se obtiene el PMVS máximo y T = temperatura mínima cuando se obtiene el PMVS mínimo.

PVR = Presión de vapor real

$$PRV_{m\acute{a}x} = \frac{HR_{m\acute{a}x}}{100} * PMVS$$

$$PRV_{m\grave{i}n} = \frac{HR_{m\grave{i}n}}{100} * PMVS$$

Dónde:

PRV_{máx} = Presión real de vapor máxima

PRV_{mín} = Presión real de vapor mínima

HR_{máx} = Humedad relativa máxima

HR_{mín} = Humedad relativa mínima

5.6. Evaluación de la severidad del daño

La evaluación y descripción de síntomas en planta se llevó a cabo cada siete días de manera visual planta por planta, la primera evaluación fue 17 días después del planteo, iniciando el 29 de diciembre de 2022 y concluyendo el 14 de abril de 2023, con base en los conceptos que se muestran en los **Cuadro 3** y **Figura 9**.

Cuadro 3. Escalas de severidad en planta

Escala	Síntomas en las hojas
9	Sin síntomas y sin virus
7	Sin síntomas, pero con presencia de virus
5	Síntomas leves (mosaico y deformación en algunas hojas)
3	Síntomas leves (mosaico y deformación en todas las hojas)
1	Síntomas fuertes en todas las hojas

Fuente: Hernández-Verdugo *et al.*, 2001 (modificada)

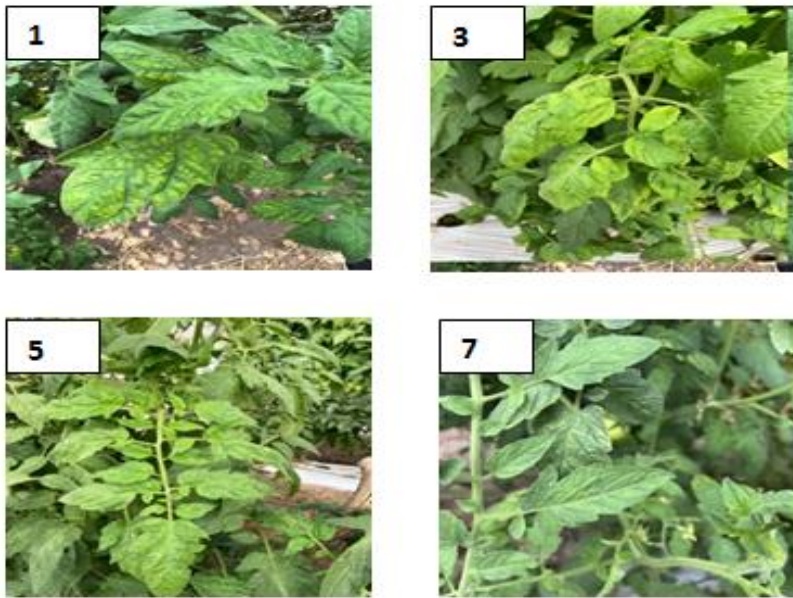


Figura 9. Escala de los síntomas de ToBRFV en planta

Una vez obtenidos los resultados de las evaluaciones, se procedió a calcular el índice de severidad en porcentaje mediante la fórmula propuesta por Galanihe *et al.* (2004).

$$\text{Índice de severidad} = \sum [P \times Q / M \times N] \times 100$$

Donde:

P= puntuación de gravedad

Q= número de plantas infectadas con la misma puntuación

M= total de plantas observadas

N= número de escala de calificación máxima.

5.7. Análisis estadístico

A partir de los datos del índice de severidad de cada cultivar, se realizó un análisis multivariado, mediante la construcción de un dendrograma de clasificación

aglomerativa jerárquica, mediante el método de Ward, teniendo como medida de disimilitud la distancia euclidiana.

Los valores obtenidos del índice de severidad, no cumplieron los supuestos de normalidad, por lo que se procedió al análisis con estadística no paramétrica, llevando a cabo la comparación de rangos para muestras independientes la prueba Kruskal-Wallis con un nivel de confianza de 95. Al tener valores de $p < 0.05$ se realizaron comparaciones múltiples mediante la prueba de Dunn, la cual se basa en la comparación de medias de los rangos de cada tratamiento. Lo anterior se reforzó con el análisis de regresión lineal simple realizado con los valores de índice de severidad y el DPV máximo y el DPV mínimo. Para dicho análisis se aplicaron las siguientes fórmulas.

$$b = \frac{(\Sigma XY) - \frac{(\Sigma X)(\Sigma Y)}{n}}{(\Sigma X^2) - \frac{(\Sigma X)^2}{n}}$$

$$Y = a + bX$$

$$a = \bar{Y} - b\bar{X}$$

$$R = \frac{(\Sigma XY) - \frac{(\Sigma X)(\Sigma Y)}{n}}{\sqrt{\left[(\Sigma X^2) - \frac{(\Sigma X)^2}{n} \right] * \left[(\Sigma Y^2) - \frac{(\Sigma Y)^2}{n} \right]}}$$

Donde:

Y: valor de la variable dependiente

a: intercepción de la línea de regresión con el eje Y.

b: inclinación en la línea de regresión o pendiente de la recta.

X: valor de la variable independiente.

R: Coeficiente de correlación

R²: Coeficiente de determinación

Los análisis estadísticos se realizaron con el paquete estadístico XLSTAT (Addinsoft, 2023).

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se presentan los resultados obtenidos sobre el comportamiento de 16 cultivares de tomate evaluados con respecto al daño causado por ToBRFV. Con respecto a la incidencia de la enfermedad, esta se manifestó en todas los cultivares. Donde sí ocurrió diferencia entre cultivares fue en la severidad con que se manifestó este virus.

6.1. Severidad del daño ToBRFV en los cultivares

Dado que la escala de medición utilizada en esta evaluación, indica que, a valores altos, se tiene menos daño, se optó por presentar los resultados de severidad, como nivel de sanidad. En la **Figura 10**, se muestra que el cultivar 1, fue el que presentó mayores daños, mientras que el cultivar 14 fue donde se tuvieron las plantas más sanas.

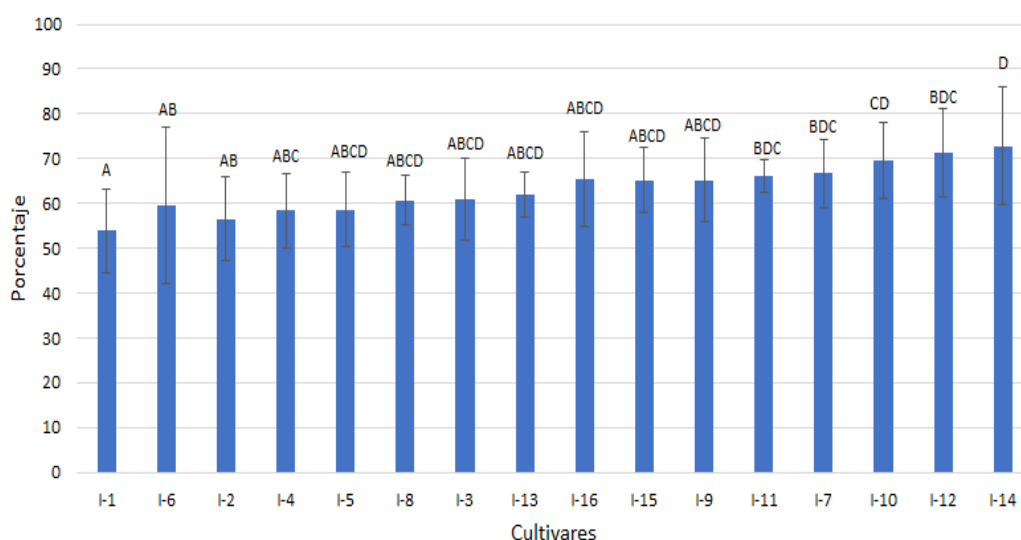


Figura 10. Análisis de Kruskal-Wallis de los promedios de sanidad de las hojas de los cultivares de tomate sometidos al ataque de virus \pm desviación estándar. Las letras iguales indican la igualdad del porcentaje.

En complemento con el análisis no paramétrico, se obtuvo el dendrograma que se muestra en la **Figura 11**, en el cual se conformaron 5 grupos.

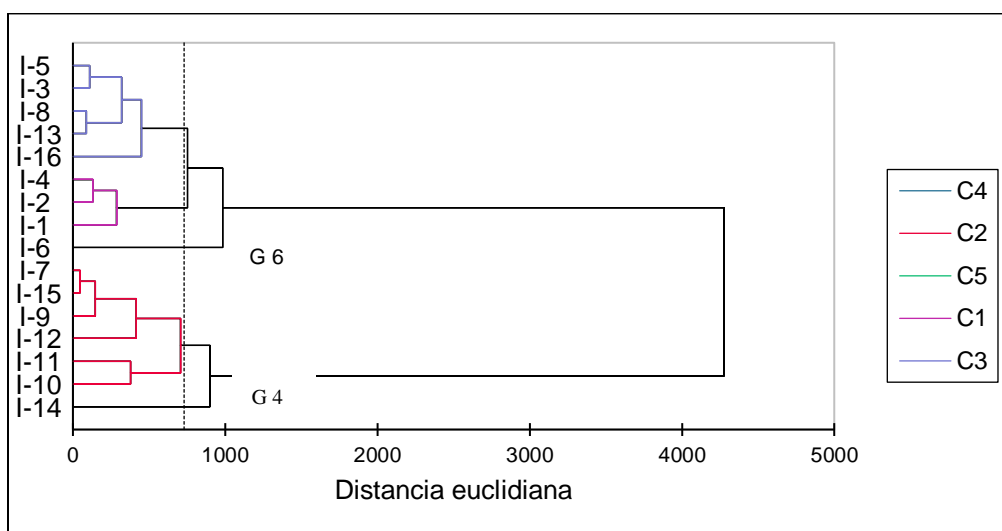


Figura 11. Dendrograma de clasificación de los grupos conformados con los cultivares de tomate con base en el índice de sanidad en las hojas.
Fuente: elaboración propia

A partir del índice de severidad causado por ToBRFV en las hojas, se conformaron 5 grupos en el dendrograma de clasificación, como se muestra en el **Cuadro 4**.

Cuadro 4. Distribución de los materiales en los grupos conformados en el dendrograma de clasificación por el método de Ward a partir de la severidad del daño de ToBRFV en la hoja de tomate

Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo 5
I-1	I-10	I-13	I-14	I-6
I-2	I-11	I-16		
I-4	I-12	I-3		
	I-15	I-5		
	I-7	I-8		
	I-9			

Fue
nte:
ela
bor
aci
ón
pro
pia

En la **Figura 12** se muestran los grupos conformados y su comportamiento a través del desarrollo del cultivo de tomate. Destacando que en la fecha 26 de enero, la sanidad bajó drásticamente en todos los grupos conformados. Dicha fecha coincide con el estadio fenológico de floración, que es uno de los más importantes y sensibles del cultivo del tomate. La floración marca el lapso de vida de la planta y su reproducción del cual precisan en gran medida la calidad del fruto y la producción final (Navarro, F. 2015).

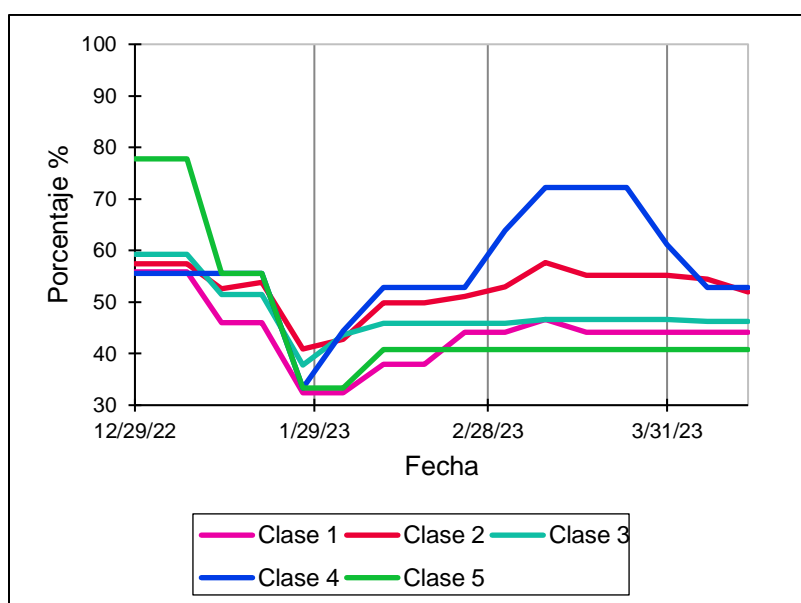


Figura 12. Perfil de los grupos que integran el dendrograma de clasificación a lo largo de 16 semanas de acuerdo con la sanidad de las hojas de los cultivares evaluados.

Fuente: Elaboración propia.

El primer grupo se compone de los materiales I-1, I-2 y I-4, se caracteriza por iniciar con una sanidad de 71.4 %, la cual disminuyó en las siguientes semanas, teniendo una sanidad promedio de 56.25 %, con valores ligeramente inferiores al final del ciclo con respecto al inicio (**Figura 13**).

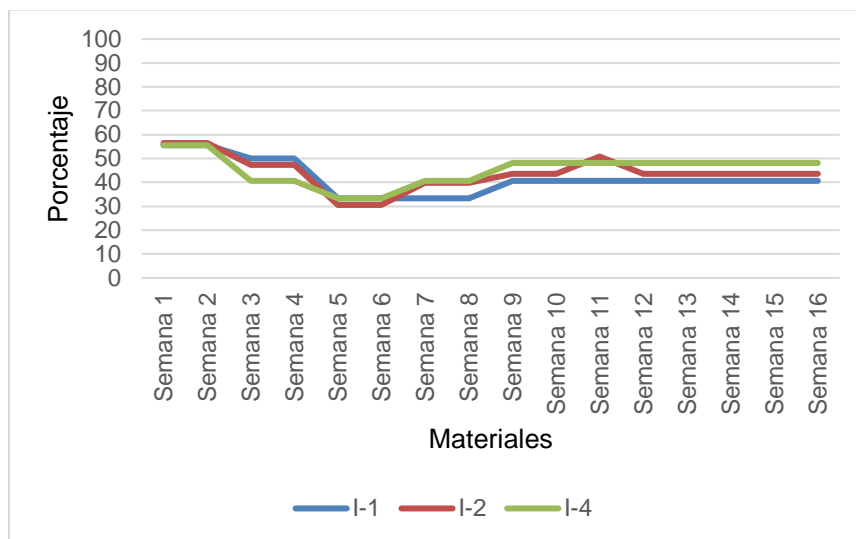


Figura 13. Perfil de los materiales que integran el grupo 1 del dendrograma de clasificación a lo largo de 16 semanas de acuerdo con la sanidad de las hojas de los materiales evaluados. Fuente: Elaboración propia.

En la **Figura 14** se muestra el grupo 2 integrado por los materiales 10, 11, 12, 15, 7 y 9. Este grupo se caracteriza por tener un promedio de sanidad de 67.36 %, con valores prácticamente constantes a lo largo del ciclo del cultivo.

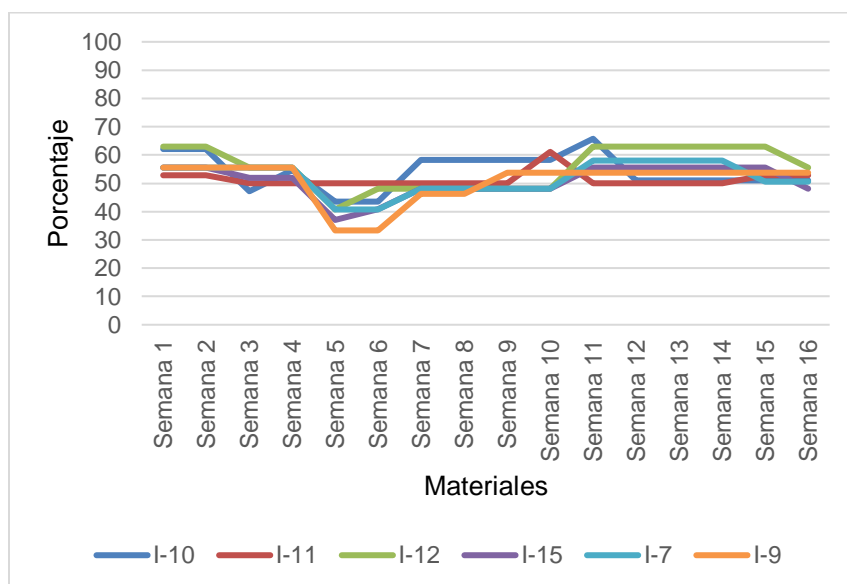


Figura 14. Perfil de los materiales que integran el grupo 2 del dendrograma de clasificación a lo largo de 16 semanas de acuerdo con la sanidad de las hojas de los materiales evaluados. Fuente: Elaboración propia.

El grupo 3 se conformó por los materiales 13, 16, 3, 5 y 8, se caracterizó por tener un nivel de sanidad alto, sin embargo, tuvo un descenso rápido durante la segunda semana para mantenerse así a lo largo del ciclo. El promedio de sanidad de este grupo es de 61.55 %, (**Figura 15**).

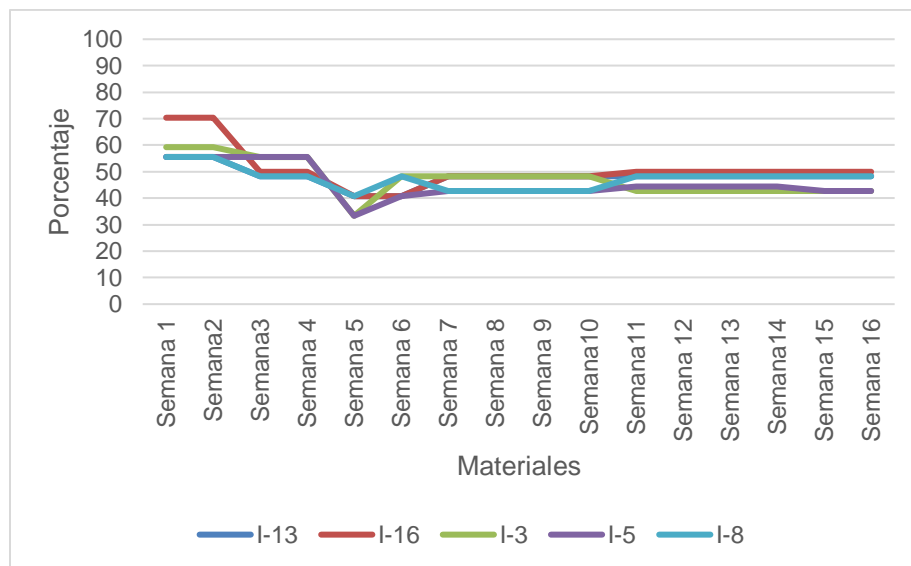


Figura 15. Perfil de los materiales que integran el grupo 3 del dendrograma de clasificación a lo largo de 16 semanas de acuerdo con la sanidad de las hojas de los materiales evaluados. Fuente: Elaboración propia.

El grupo 4 se integra solo por el material 14, fue el que tuvo el mejor comportamiento a lo largo del ciclo, con un promedio de sanidad de 72.77 %, (**Figura 16**).

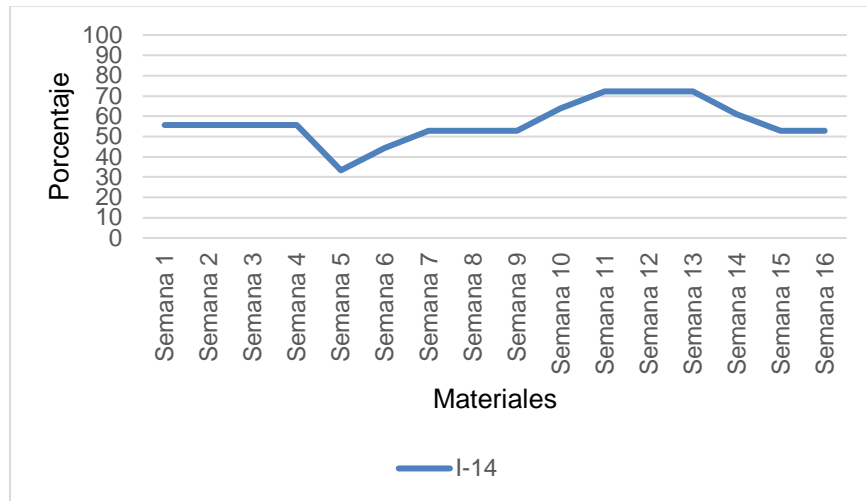


Figura 16. Perfil de los materiales que integran el grupo 4 del dendrograma de clasificación a lo largo de 16 semanas de acuerdo con la sanidad de las hojas de los materiales evaluados. Fuente: Elaboración propia.

El grupo cinco está compuesto por un solo material, el cual se caracteriza por tener un descenso brusco en la sanidad para después mantenerse constante con 59.5 % de sanidad, (Figura 17).

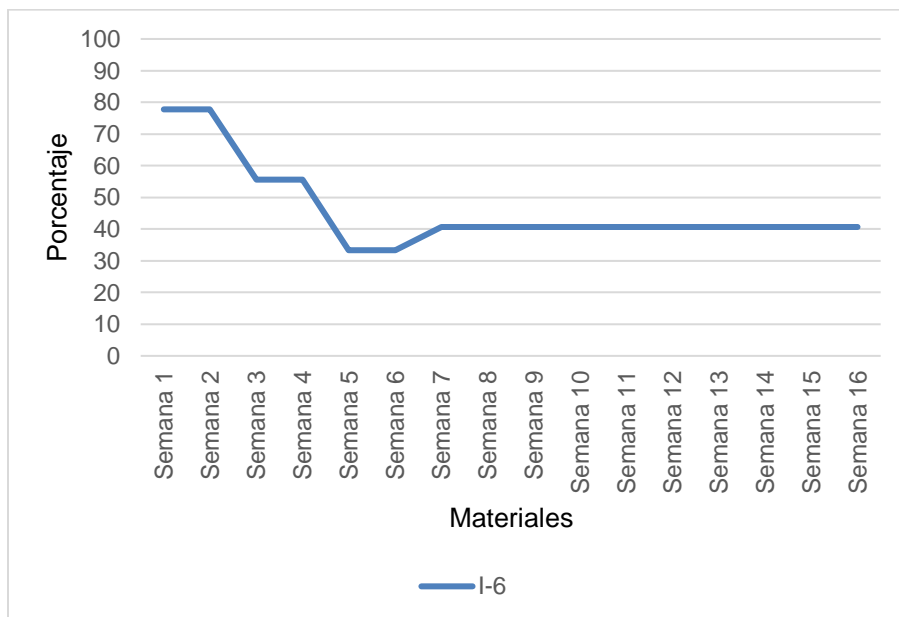


Figura 17. Perfil de los materiales que integran el grupo 5 del dendrograma de clasificación a lo largo de 16 semanas de acuerdo con la sanidad de las hojas de los materiales evaluados. Fuente: Elaboración propia.

6.2. Severidad de síntomas y su relación con la temperatura

Para analizar el efecto de la temperatura y del DPV en el comportamiento del nivel de severidad del daño causado por ToBRFV, se tomó como base el cultivar más susceptible, en este caso el cultivar 1.

Se asume que la temperatura tiene gran relación con la aparición de síntomas y atenuación de los mismos **Figura 18**. Esto coincide con la información que se ha dado para el virus del enrollamiento de papa a temperaturas elevadas y se asocia que la replicación viral pudo haberse visto afectada negativamente por una baja acumulación de proteína de la cápside (Tamada y Harrison, 1981).

También los resultados son similares a los obtenidos por otros autores que reportan que las bajas temperaturas perjudican el silenciamiento génico, el cual es una potente defensa de las plantas contra los patógenos virales (Szittyta *et al.*, 2003).

Mehle *et al.* (2023) también mostraron que el ToBRFV se encuentra en condiciones óptimas a temperaturas bajas, mientras que las temperaturas altas disminuyen su tasa de supervivencia y de diseminación.

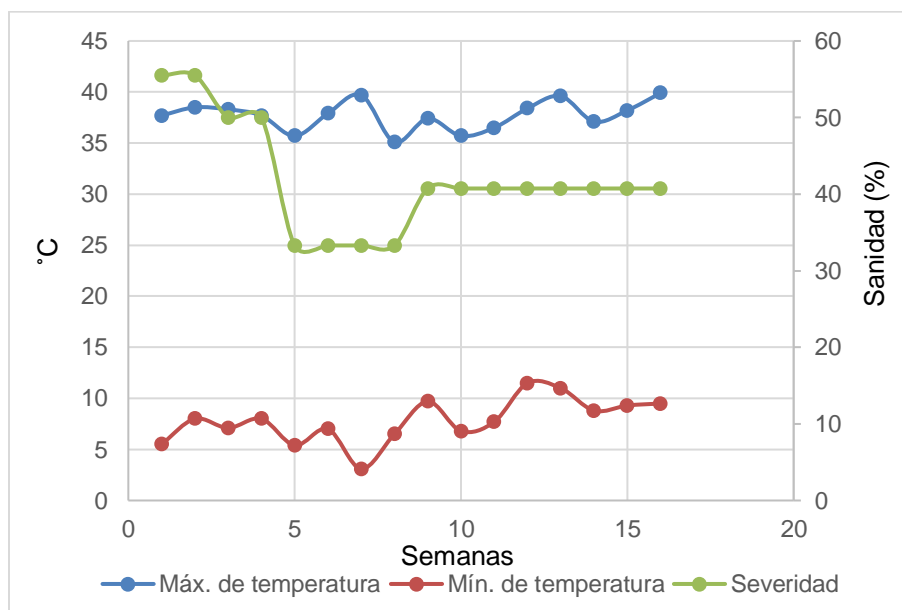


Figura 18. Relación de la temperatura y el índice de sanidad durante las semanas evaluadas en el cultivar 1.

Fuente: Elaboración propia.

Sin embargo, esto no sucede igual para todos los virus, por ejemplo, Moury *et al.* (1998) señalan que a altas temperaturas el *virus de la marchitez manchada del tomate* (TSWV) suprime la resistencia en plantas de pimiento.

6.3. Severidad de síntomas y su relación con el déficit de presión de vapor (DPV)

En la **Figura 19** se puede observar que, durante las semanas 5, 6 y 7, el valor del déficit de presión de vapor (kPa) fue aumentando, coincidiendo con el valor más bajo del índice de sanidad en el cultivar 1.

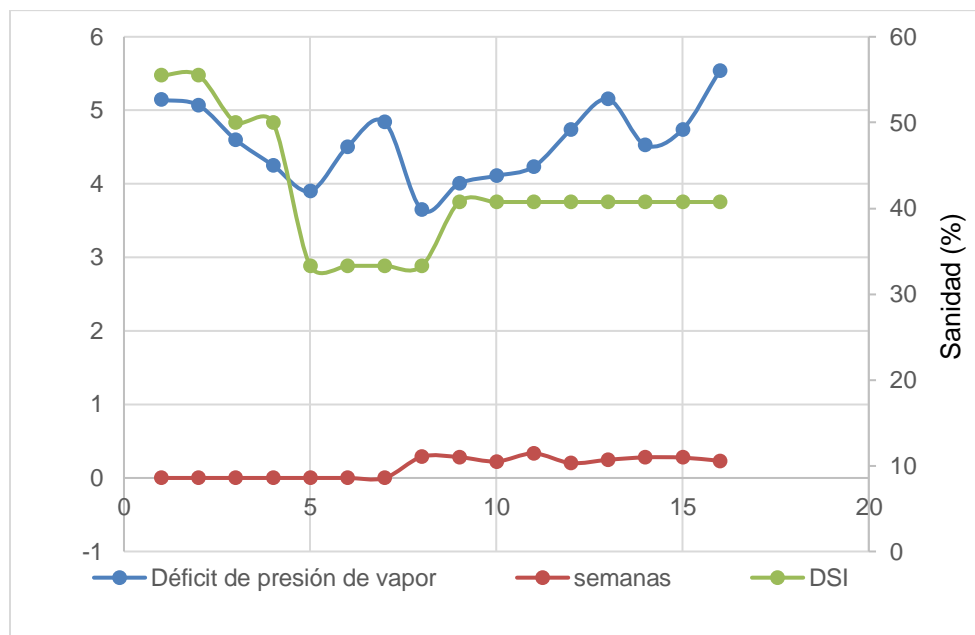


Figura 19. Relación del déficit de presión de vapor y el índice de sanidad en el cultivar 1.
Fuente: Elaboración propia.

Lo anterior se refuerza con el análisis de regresión realizado con los valores de índice de severidad y el DPV máximo y el DPV mínimo. En la **Figura 20** se manifiesta que el DPV máximo es importante en el comportamiento de la severidad en el cultivar 1, pues por cada kPa que incrementa, el déficit de presión de vapor máximo, aumenta el daño en 6.97 %.

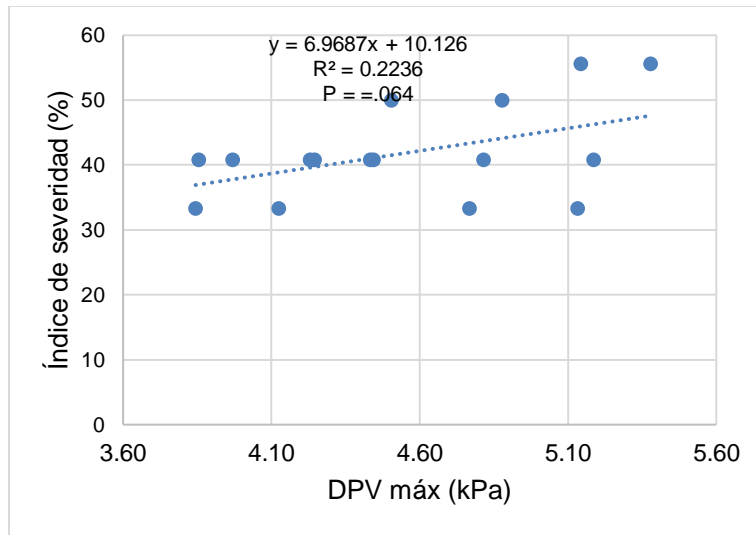


Figura 20. Análisis de regresión lineal de DPV máx por índice de severidad del cultivar 1.
Fuente: Elaboración propia.

En cambio, en la **Figura 21**, se refleja que los cambios en el DPV mínimo no incidieron significativamente en el comportamiento de la severidad, lo que sugiere que en el cultivar 1, para que se manifieste la enfermedad, no se requiere que se llegue al punto de rocío o DPV = 0.

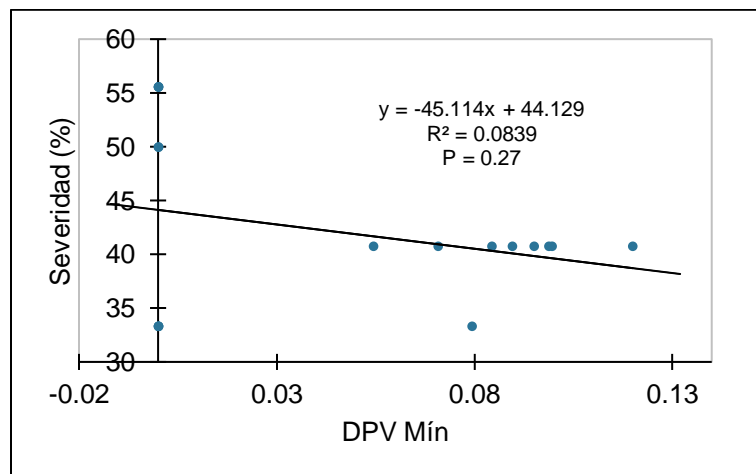


Figura 21. Análisis de regresión lineal de DPV mín por índice de severidad de cultivar 1.
Fuente: Elaboración propia.

Cuando se analizó el DPV promedio sobre el índice de severidad, se observa que por cada kPa promedio, que incrementa, se mejora la sanidad en 13.95 %, (Figura 22). Esto sugiere que, bajo agricultura protegida, se deben tener valores de DPV encima del mínimo (0 kPa).

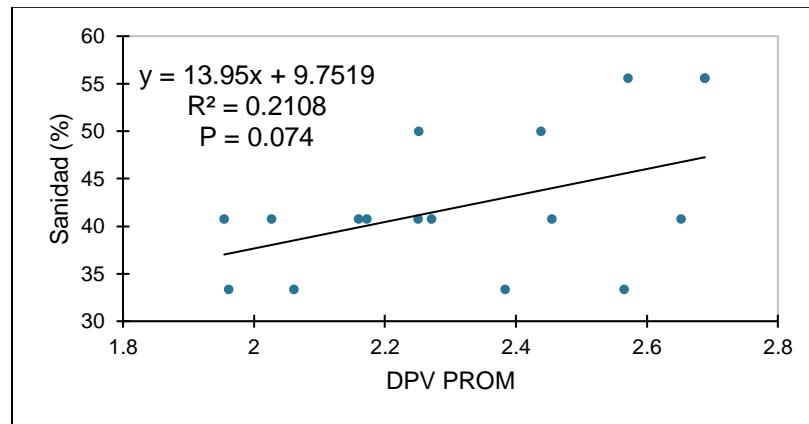


Figura 22. Análisis de regresión lineal de DPV promedio por índice de sanidad de cultivar 1.
Fuente: Elaboración propia.

La respuesta que pueden tener los organismos patógenos a las condiciones ambientales es muy importante. La compañía Argus (2009), ha fomentado el manejo del DPV para controlar enfermedades, indicando rangos donde ocurre diferencialmente la actividad patogénica en relación al DPV. Por su parte, Gutiérrez (2019), señala que el DPV óptimo para el cultivo de tomate es de 0.85 kPa en la fase vegetativa y 1.32 kPa en floración. En la variación del DPV están involucrados varios elementos ambientales, tales como la temperatura, la humedad relativa y la intensidad de la luz.

Esto dificulta saber cuál es el agente causal del comportamiento de las plantas. Sin embargo, se puede afirmar que al tener un DPV bajo, disminuye la transpiración, el crecimiento y la fotosíntesis (Noh y Lee, 2022). Esta situación favorece el desarrollo de enfermedades, incluido el ataque de virus.

Al regular el DPV, disminuye la tasa de pérdida de agua moderando el estrés hídrico (Zhang *et al.*, 2017). Esto puede favorecer para que la severidad del ataque de virus disminuya. De esto se desprende que, en las horas de mayor intensidad de luz, se deben tomar medidas para disminuir la temperatura y aumentar la humedad relativa y con ello disminuir el déficit de presión de vapor. Por ejemplo, el uso de micro nebulizadores disminuye el DPV (Zhang *et al.*, 2015) Por el contrario, cuando el DPV es bajo hay que aplicar medidas para disminuir la humedad relativa y aumentar la temperatura

VII. CONCLUSIONES

- a) Todos los cultivares evaluados tuvieron una incidencia de poco más del 40 % en adelante, siendo el cultivar 1 el que tuvo el mayor daño causado por ToBRFV; mientras que el menos susceptible fue el cultivar 14.
- b) Las bajas temperaturas y la alta humedad relativa favorecen la severidad de ToBRFV.
- c) Los valores altos de déficit de presión de vapor están positivamente relacionados con la disminución de la severidad causada por ToBRFV en determinada etapa del cultivo.

IX. LITERATURA CITADA

- Allen, R. G., Pereira, L.S., Raes, D., y Smith, M. (2006) Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. FAO. Roma. 322 pp.
- Barreto, C., y González, C. (2021). *Evaluación de la reducción de pérdidas de tomate (Solanum lycopersicum) a partir de la adaptación de un sistema de envase en el proceso logístico de transporte* [Tesis de licenciatura, Universidad de La Salle]. Repositorio Institucional. https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_alimentos/729.
- Barreto, C., y González, C. (2021). *Evaluación de la reducción de pérdidas de tomate (Solanum lycopersicum) a partir de la adaptación de un sistema de envase en el proceso logístico de transporte* [Tesis de licenciatura, Universidad de La Salle]. Repositorio Institucional. https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_alimentos/729.
- Cañizares, J., y Blanca, J. (2022). La domesticación del tomate en América: un viaje de ida y vuelta. *The Conversation*. <https://theconversation.com/la-domesticacion-del-tomate-en-america-un-viaje-de-ida-y-vuelta-174844>.
- Cañizares, J., y Blanca, J. (2022). La domesticación del tomate en América: un viaje de ida y vuelta. *The Conversation*. <https://theconversation.com/la-domesticacion-del-tomate-en-america-un-viaje-de-ida-y-vuelta-174844>.
- Caruso, A, Bertacca, S., Parrella, G., Rizzo, R., Davino, S., y Panno, S. (2022). Tomato brown rugose fruit virus: A pathogen that is changing the tomato production worldwide. *Annals of Applied Biology/Annals of Applied Biology*, 181(3), 258–274. <https://doi.org/10.1111/aab.12788>.
- Davino, S., Caruso, A., Bertacca, S., Barone, S., y Panno, S. (2020). Tomato brown rugose fruit virus: Seed transmission rate and efficacy of different seed disinfection treatments. *Plants (Basel, Switzerland)*, 9(11), 1615. <https://doi.org/10.3390/plants9111615>.

- De Ronde, D., Butterbach, P., y Kormelink, R. (2014). Dominant resistance against plant viruses. *Frontiers in plant science*, 5, 307. <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00307>
- Dombrovsky, A., y Smith, E. (2017). Seed transmission of tobamoviruses: Aspects of global disease distribution. In InTech eBooks. <https://doi.org/10.5772/intechopen.70244>.
- Dominska, M., y Dykxhoorn, D. M. (2010). Breaking down the barriers: siRNA delivery and endosome escape. *Journal of Cell Science*, 123(8), 1183-1189.
- EPPO Global Database. (2019). Actualización de la situación del virus rugoso marrón del tomate en México EPPO Rep. Serv. 2019/192 Eur. Mediterr. Plant Prot. Organ. París: <https://gd.eppo.int/reporting/article-6622>.
- Escobar, H., y Lee, R. (2009). *Manual de producción de tomate bajo invernadero* (2nd ed.). Fundación Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. <http://hdl.handle.net/20.500.12010/1892>.
- Food and Agriculture Organization (FAO). 2023. Value of agricultural production. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QV>
- Fidan, H., Sarikaya, P., Yildiz, K., Topkaya, B., Erkis, G., y Calis, O. (2021). Robust molecular detection of the new Tomato brown rugose fruit virus in infected tomato and pepper plants from Turkey. *Journal of Integrative Agriculture/Journal of Integrative Agriculture*, 20(8), 2170–2179. [https://doi.org/10.1016/s2095-3119\(20\)63335-4](https://doi.org/10.1016/s2095-3119(20)63335-4).
- Fidan, H., Ulusoy, D., y Albezirgan, H. (2024). Exploring Effective Strategies for ToBRFV Management in Tomato Production: Insights into Seed Transmission Dynamics and Innovative Control Approaches. *Agriculture*, 14(1), 108. <https://doi.org/10.3390/agriculture14010108>.
- Flaya, M. (2019). *Life cycle Tomato plant stages growth seed sprout adult plant* [Figura]. Depositphotos. <https://depositphotos.com/vector/life-cycle-tomato-plant-stages-growth-seed-sprout-adult-plant-254118970.html>.

- Folimonova, SY, Achor, D., y Bar-Joseph, M. (2020). Caminando juntos: protección cruzada, conservación del genoma y la maquinaria de replicación del virus de la tristeza de los cítricos. *Viruses*, 12(12), 1353.
- Fornaris, G. (2007). *Conjunto Tecnológico para la Producción de Tomate: Características de la planta*. Estación Experimental Agrícola, Universidad de Puerto Rico. <https://www.upr.edu/eea/wp-content/uploads/sites/17/2016/03/TOMATE-Character%C3%ADsticas-de-la-Planta-v2007.pdf>.
- Gorovits, R., Shteinberg, M., Anfoka, G. and Czosnek, H. (2022). Exploiting Virus Infection to Protect Plants from Abiotic Stresses: Tomato Protection by a Begomovirus. *Plants*, 11, 2944. <https://doi.org/10.3390/plants11212944>.
- Gutiérrez, J. (2019). *Evaluación de variables productivas de injertos de tomate tipo Grape (Solanum lycopersicum) bajo invernadero, en Buenos Aires, Puntarenas* [Trabajo de graduación, Universidad Nacional de Costa Rica]. Repositorio UNA. <http://hdl.handle.net/11056/18161>.
- Gutiérrez, J. (2020). *Control del déficit de presión de vapor (DPVc) en cultivos de invernadero con sistemas de nebulización* [Tesis doctoral, Universidad Autónoma Chapingo]. Repositorio Institucional. <https://hdl.handle.net/20.500.12098/974>.
- Hiddink, G., Willmann, R., Woudenberg, J., y Souza-Richards, R. (2023). Seed health testing: Doing things right. *PhytoFrontiers*, 3(1), 71–74. <https://doi.org/10.1094/phytofr-03-22-0029-fi>
- Ibbi, V., Lanteri, A., Minuto, A., Santoro, V., Ferrea, G., Fossa, P., y Bisio, A. (2022). Autoxidation Products of the Methanolic Extract of the Leaves of *Combretum micranthum* Exert Antiviral Activity against Tomato Brown Rugose Fruit Virus (ToBRFV). *Molecules*, 27(3), 760. <https://doi.org/10.3390/molecules27030760>.
- Ishikawa, M., Yoshida, T., Matsuyama, M., Kouzai, Y., Kano, A., y Ishibashi, K. (2022). Tomato brown rugose fruit virus resistance generated by quadruple knockout of homologs of TOBAMOVIRUS MULTIPLICATION1 in tomato. *Plant Physiology*, 189(2), 679-686. <https://doi.org/10.1093/plphys/kiac103>.

- Jewehan, A., Salem, N., Tóth, Z. et al. (2022). Evaluación de las respuestas al virus rugoso marrón del tomate (ToBRFV) y selección de líneas resistentes en germoplasma de *Solanum habrochaites* y *Solanum peruvianum*. *J Gen Plant Pathol*, 88, 187–196.
- Jewehan, A., Salem, N., Tóth, Z. Salamon, P. y Szabó, Z. et al (2022). Evaluación de las respuestas al virus rugoso marrón del tomate (ToBRFV) y selección de líneas resistentes en germoplasma de *Solanum habrochaites* y *Solanum peruvianum*. *J Gen Plant Pathol* 88, 187–196 (2022). <https://doi.org/10.1007/s10327-022-01055-8>.
- Jin, Y., Zhao, J. H., y Guo, H. S. (2021). Recent advances in understanding plant antiviral RNAi and viral suppressors of RNAi. *Current Opinion in Virology*, 46, 65-72.
- Kalinina, N., Khromov, A., Love, A., y Taliansky, M. (2020). CRISPR applications in plant virology: Virus resistance and beyond. *Phytopathology*, 110(1), 118-128. <https://doi.org/10.1094/phyto-07-19-0267-ia>.
- Koch, A., y Kogel, K.H. (2014). New wind in the sails: improving the agronomic value of crop plants through RNAi-mediated gene silencing. *Plant Biotechnol J.*, 12(7), 821-31.
- Kumar, A., Kumar, V., Gull, A., y Nayik, G. A. (2020). Tomate (*Solanum lycopersicon*). En G. A. Nayik y A. Gull (Eds.), *Antioxidantes en verduras y frutos secos: propiedades y beneficios para la salud* (pp. 191-207). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-7470-2_10.
- Levitzky, N., Smith, E., Lachman, O., Luria, N., Mizrahi, Y., Bakelman, H., Sela, N., Laskar, O., Milrot, E., y Dombrovsky, A. (2019). The bumblebee *Bombus terrestris* carries a primary inoculum of Tomato brown rugose fruit virus contributing to disease spread in tomatoes. *PLoS One*, 14(1), e0210871. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0210871>.
- Li, F., y Wang, A. (2019). RNA-Targeted Antiviral Immunity: More Than Just RNA Silencing. *Trends in Microbiology*, 27(9), 792-805. <https://doi.org/10.1016/j.tim.2019.05.007>.

- Ling K-S, Gilliard AC, Zia B. (2022). Desinfectantes útiles para controlar el virus rugoso marrón del tomate emergente en la producción de tomates de invernadero. *Horticulturae* 8: 121-193.
- Mehle N. (2023). Tomato brown rugose fruit virus in aqueous environments survival and significance of water-mediated transmission. frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2023.1187920/full
- Monardes, H. (2009). Manual de cultivo de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill): Características botánicas. Origen (en línea). Chile. Universidad de Chile 13 p. Consultado 8 oct. 2016. Disponible en http://www.cepoc.uchile.cl/pdf/Manua_Cultivo_tomate.pdf.
- Mordor Intelligence. (2024). *Mercado del tomate Insights*. <https://www.mordorintelligence.com/es/industry-reports/tomato-market>.
- Nash, D., Ellmen, I., Knapp, J., Menon, R., Overton, A., Cheng, J., Lynch, M., Nissimov, J. I., y Charles, T. (2024). A novel tiled amplicon sequencing assay targeting the tomato brown rugose fruit virus (TOBRFV) genome reveals widespread distribution in municipal wastewater treatment systems in the province of Ontario, Canada. *Viruses*, 16(3), 460. <https://doi.org/10.3390/v16030460>
- Navarro, F. 6 feb. (2015). Manejo cultivo de tomate (correspondencia personal). Cartago, Costa Rica, UPANACIONAL.
- Navas-Castillo, J., y Fiallo-Olivé, E. (2022). Enfermedades virales emergentes en tomate. *Revista Agricultura*. www.revistaagricultura.com. <https://www.revistaagricultura.com/Noticias/Noticia/6317/Enfermedades-virales-emergentes-en-tomate>
- Noh, Hyemin, y Jihyun L. (2022). "The Effect of Vapor Pressure Deficit Regulation on the Growth of Tomato Plants Grown in Different Planting Environments" *Applied Sciences* 12(, no. 7): 3667. <https://doi.org/10.3390/app12073667>
- O'Neill, T. M., Shtienberg, D., and Elad, Y. (1997). Effect of some host and microclimate factors on infection of tomato stems by *Botrytis cinerea*. *Plant Dis.* 81:36-40.

- Panno, S., Caruso, A., Barone, S., Lo Bosco, G., Rangel, E., y Davino, S. (2020). Spread of tomato brown rugose fruit virus in Sicily and evaluation of the spatiotemporal dispersion in experimental conditions. *Agronomy*, 10(6), 834. <https://doi.org/10.3390/agronomy10060834>
- Pereira, J., Cambiaso, V., Picardi, L., Pratta, G., y Rodríguez, R. (2021). Mejoramiento de la calidad del fruto por la incorporación de genes de especies silvestres en el tomate (*Solanum lycopersicum* L.). *BAG. Journal of Basic and Applied Genetics*, 32(2), 41-50. <https://dx.doi.org/10.35407/bag.2021.32.02.05>
- Ruíz, J. (2017). *Evaluación del efecto de tres productos comerciales que contienen auxinas, giberelinas, citoquininas y nutrientes en la producción y calidad del fruto en el cultivo de tomate (Solanum lycopersicum), diagnóstico y servicios, El Amatillo, Agua Blanca, Jutiapa, Guatemala, C.A.* [Tesis de licenciatura, Universidad de San Carlos de Guatemala]. Repositorio de la USAC. <http://www.repositorio.usac.edu.gt/id/eprint/7862>
- SAGARPA. (2017). *Planeación Agrícola Nacional 2017-2030. Jitomate mexicano.* Gobierno de México. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/257077/Potencial-Jitomate.pdf>
- Salem, N., Jewehan, A., Aranda, M., y Fox, A. (2023). Tomato brown rugose fruit Virus pandemic. *Annual Review of Phytopathology*, 61(1), 137–164. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-021622-120703>
- Sapak, Z., Melloy, P., Minchinton, E.J., Salam, M.U., y Galea, V.J. (2023). The influence of temperature and vapour pressure deficit on conidia germination and germ tube production in an Australian *Podosphaera xanthii* isolate. *Eur J Plant Pathol.* 166, 315–328. <https://doi.org/10.1007/s10658-023-02664-5>
- Singh, D., Chaudhary, S., Kumar, R., Sirohi, P., Mehla, K., Sirohi, A., Kumar, S., Chand, P., y Singh, P. K. (2016). RNA Interference Technology - Applications and Limitations. En I. Abdurakhmonov. (Ed.), *RNA Interference* (pp.21-36). Intech Open. <https://doi.org/10.5772/61760>

- Skelton A, Frew L, Ward R, Hodgson R, Forde E, McDonough S, Webster G, Chisnall K, Mynett M, Buxton-Kirk A, R. Fowkes A, Weekes R, Fox A. (2023). Tomato Brown Rugose Fruit Virus: Survival and Disinfection Efficacy on Common Glasshouse Surfaces. <https://www.mdpi.com/1999-4915/15/10/2076>
- Tiberini, A., Manglli, A., Taglienti, A., Vučurović, A., Brodarič, J., Ferretti, L., Luigi, M., Gentili, A., y Mehle, N. (2022). Development and Validation of a One-Step Reverse Transcription Real-Time PCR Assay for Simultaneous Detection and Identification of Tomato Mottle Mosaic Virus and Tomato Brown Rugose Fruit Virus. *Plants (Basel, Switzerland)*, *11(4)*, 489. <https://doi.org/10.3390/plants11040489>
- Vargas-Mejía, P., Rodríguez-Gómez, G., Salas-Aranda, D. A., García-López, I. J., Pérez-Alfaro, R. S., Ávila de Dios, E., Santoyo-Villa, J. N., Alcalá Briseño, R. I., y Silva-Rosales, L. (2023). Identificación y manejo del virus de la rugosa marrón del tomate en invernaderos en México. *Archives of Virology*, *168(1)*, 135. <https://doi.org/10.1007/s00705-023-05757-y>
- Vásquez-Gutiérrez, U., Frías-Treviño, G., López-López, H., Delgado-Ortiz, J., Aguirre-Urbe, L., y Flores-Olivas, A. (2024). Evaluación de la patogenicidad de tres aislados del virus de la fruta rugosa marrón del tomate en plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) de Coahuila, México. *Revista Bio Ciencias*, *11*, e1576. <https://doi.org/10.15741/revbio.11.e1576>
- Yan, Z.-Y., Zhao, M.-S., Ma, H.-Y., Liu, L.-Z., Yang, G.-L., Geng, C. et al. 2021. Biological and molecular characterization of Tomatobrown rugose fruit virus and development of quadruplex RT-PCR detection. *J. Integr. Agric.* *20*: 1871-1879 [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(20\)63275-0](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(20)63275-0)
- Zhang, D., Zhang, Z., Li, J., Chang, Y., Du, Q., & Pan, T. (2015). Regulation of Vapor Pressure Deficit by Greenhouse Micro-Fog Systems Improved Growth and Productivity of Tomato via Enhancing Photosynthesis during Summer Season. *PloS one*, *10(7)*, e0133919. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0133919> Zhang, D., Du, Q., Zhang,

- Z. Jiao, X., Song X., Li, J. (2017). Vapour pressure deficit control in relation to water transport and water productivity in greenhouse tomato production during summer. *Sci Rep* **7**, 43461. <https://doi.org/10.1038/srep43461>
- Zhang, S., Griffiths, J., Marchand, G., Bernards, M., y Wang, A. (2022). Tomato brown rugose fruit virus: An emerging and rapidly spreading plant RNA virus that threatens tomato production worldwide. *Molecular Plant Pathology*, **23**(9), 1262–1277. <https://doi.org/10.1111/mpp.13229>

X. ANEXO



Informe del Detector de Plagio Viper

TESIS CONCLUIDA MIAP.pdf escaneado Oct 31, 20

Porcentaje Total

13%

3.1%

Tobamoviruses: old and new threats to tomat...

<https://link.springer.com/article/10.1007/s10327-023>

1.4%

Evaluación de la patogenicidad de tres aislad...

<https://revistabiociencias.uan.edu.mx/index.php/BIO>

1.1%

RNA interference (RNAi): an effective tool in a...

https://www.academia.edu/96065260/RNA_interfere

1.0%

A Novel Tiled Amplicon Sequencing Assay Ta...

<https://www.mdpi.com/1999-4915/16/3/460>

0.6%

The Effect of Vapor Pressure Deficit Regulatio...

<https://www.mdpi.com/2076-3417/12/7/3667>

- 0.5% Tomato Brown Rugose Fruit Virus: Survival a...
<https://www.mdpi.com/1999-4915/15/10/2076>
- 0.5% Autoxidation Products of the Methanolic Extra...
<https://www.mdpi.com/1420-3049/27/3/760>
- 0.4% Virus rugoso del Tomate y del Pimiento (Tom...
https://herbariofitopatologia.agro.uba.ar/?page_id=2
- 0.4% Exploring Effective Strategies for ToBRFV Ma...
<https://www.mdpi.com/2077-0472/14/1/108>
- 0.3% UNIVERSIDAD NACIONAL
<https://repositorio.una.ac.cr/bitstreams/4df61f23-438>
- 0.3% Robust molecular detection of the new Tomat...
<https://www.mendeley.com/catalogue/64865ba1-5a>
- 0.3% Virus Rugoso del Tomate (ToBRFV): un pató...
<https://www.agrisolver.com/blog/virus-rugoso-del-tor>
- 0.2% BAG. Journal of basic and applied genetics
https://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_artte

0.2%	Efecto de la temperatura en la virulencia del v... http://www.scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttex
0.2%	Exploiting Virus Infection to Protect Plants fro... https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36365396/
0.2%	Control del déficit de presión de vapor (dpvc) ... https://repositorio.chapingo.edu.mx/items/42aceff2-9
0.2%	Tomato brown rugose fruit virus in aqueous e... https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37332729/
0.2%	Métodos de identificación del virus de la fruta ... https://www.redalyc.org/journal/437/43764233030/4
0.1%	UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUAT... https://core.ac.uk/download/pdf/84773692.pdf
0.1%	Tomate, Solanum lycopersicum, característic... https://naturaleza.animalesbiologia.com/plantas/ver
0.1%	Informe, producción y tamaño de la industria -... https://www.mordorintelligence.com/es/industry-rep

0.1% Effect of Some Host and Microclimate Factors...
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30870943/>

0.1% NT-19-018 Cenicilla en tomate - Fertilab
<https://www.fertilab.com.mx/Sitio/notas/NTF-19-018>

0.1% Enfermedades virales emergentes en tomate ...
<https://archivo.revistaagricultura.com/tomate/hortico>

0.1% DIRECCIÓN GENERAL DE SANIDAD VEGE...
<https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/79>

0.1% Evaluation of responses to tomato brown rugo...
<https://link.springer.com/article/10.1007/s10327-022>

0.1% Enfermedades del Tomate - Ministerio de Agri...
<https://www.mapa.gob.es/es/agricultura/temas/sanic>

0.1% Tomate Rojo 2016 - gob.mx
<https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/20>

0.1% TOMATE-Varietades y su Selección - uprm.edu
<https://www.uprm.edu/eea/wp-content/uploads/sites>

0.1% Dominant resistance against plant viruses — ...
<https://research.wur.nl/en/publications/dominant-res>

0.1% Técnicas de análisis de crecimiento de planta...
https://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_artte

0.0% Solanaceae - Ecured
<https://www.ecured.cu/Solanaceae>

0.0% Vapour pressure deficit control in relation to w...
<https://www.nature.com/articles/srep43461>

0.0% OCCURRENCE OF TOBRFV IN TOMATO (S...
<https://www.revista.ccba.uady.mx/ojs/index.php/TSA>

0.0% Frontiers | Tomato brown rugose fruit virus in ...
<https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/art>

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA FACULTAD DE
 AGRONOMÍA
 MAESTRÍA INTERINSTITUCIONAL EN AGRICULTURA
 PROTEGIDA
 TESIS