

Huanglongbing (HLB): Retos y Soluciones en la Citricultura Moderna

Felipe Ascencio y Gracia Gómez-Anduro
Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C.
ascencio@cibnor.mx

Foto: Taryn Elliot

Tema

El HLB es una enfermedad de los cítricos con un siglo de antigüedad y distribución mundial que ha devastado la producción de cítricos en México, especialmente en regiones como Baja California Sur. Originaria de Asia, se transmite principalmente por psílidos y ha causado graves impactos económicos y sociales. A pesar de los importantes esfuerzos de investigación y manejo, el HLB sigue siendo una amenaza persistente, lo que subraya la necesidad de innovación continua para su detección, control y el mejoramiento genético de los cítricos que les confiera resistencia contra esta enfermedad. La investigación sobre HLB avanza rápidamente, pero se necesitan estudios interdisciplinarios, de campo y orientados al futuro para lograr un control sostenible y la resiliencia de la industria.

1.Introducción

El Huanglongbing (HLB), cuyo nombre significa "enfermedad del dragón amarillo" en chino, también conocido como enverdecimiento de los cítricos (Figura 1), es una devastadora enfermedad, producida por la bacteria Gram-negativa *Candidatus Liberibacter* (Figura 2), que se ha convertido en la mayor amenaza para la producción mundial de cítricos, incluida la de México. La enfermedad afecta diversas especies de cítricos, incluyendo limón, naranja, toronja, mandarina y limonaria, principalmente a los cítricos agrios con mayor severidad que en los dulces. El HLB es causado principalmente por la bacteria *Candidatus Liberibacter asiaticus* y se transmite por insectos vectores, principalmente el psílido asiático de los cítricos (*Diaphorina citri*) (Figura 3) y, en África, el psílido africano de los cítricos (*Trioza erythrae*) (Gottwald, 2010; Wang y Trivedi, 2013; Da Graça et al., 2016; Thakuria et al.,

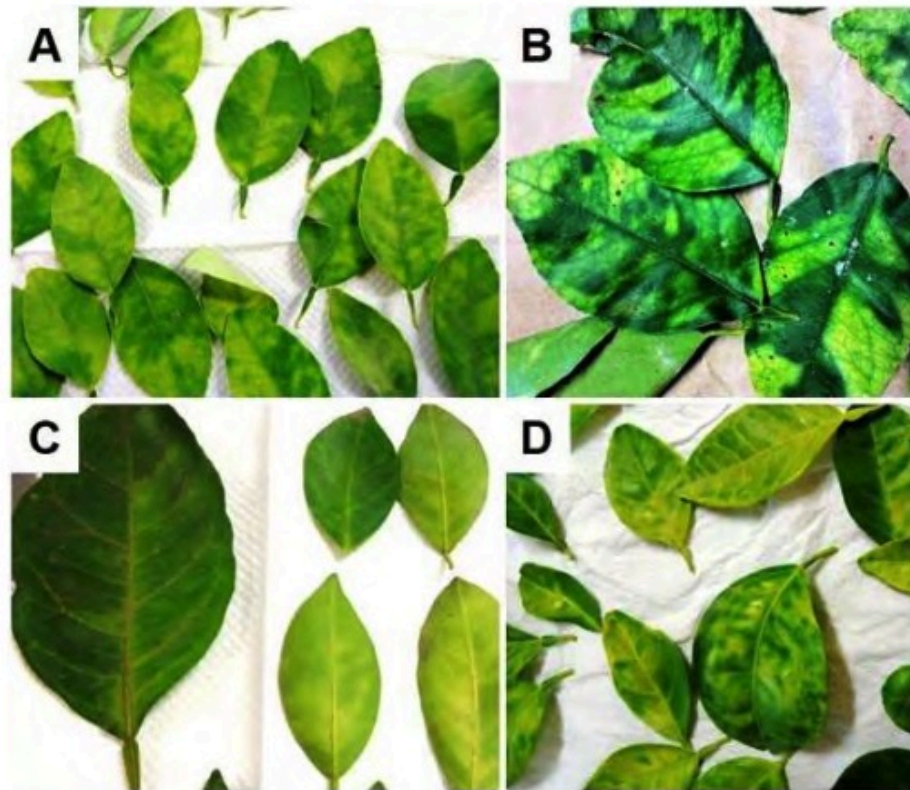


Figura 1. Síntomas de HLB en hojas de cítricos. A) Lima mexicana: amarillamiento seguido de manchado con manchas angulares asimétricas a ambos lados de la nervadura principal; B) Lima persa: engrosamiento de la nervadura central que causa un aspecto acorchado, presencia de islotes verdes y distorsión foliar; C) Mandarina: manchado difuso, aclaramiento y engrosamiento de las nervaduras; y D) Naranja dulce: acorchamiento y aclaramiento de las nervaduras, distorsión foliar y presencia de islotes verdes (Fuente: Soto-Plancarte et al., 2024).

2023; Reynaud et al., 2022). La enfermedad se originó en Asia, con los primeros informes en el sur de China e India a finales del siglo XIX y principios del XX, y desde entonces se ha extendido a África, América y otras regiones productoras de cítricos (Da Graça et al., 2016; Machado et al., 2025; Thakuria et al., 2023; Li et al., 2021). El HLB se detectó por primera vez en México en 2009, en la

península de Yucatán, y se propagó rápidamente a casi todos los estados productores de cítricos, incluyendo Baja California Sur (Villar-Luna et al., 2024; García-Ávila et al., 2021; Huang et al., 2022). La enfermedad se caracteriza por el amarilleamiento de las hojas, la deformación de los frutos, el debilitamiento del árbol y, finalmente, su muerte, lo que conlleva graves repercusiones económicas y sociales



para los productores de cítricos (Villar-Luna et al., 2024; Cervantes-Santos et al., 2025; García-Ávila et al., 2021; Salcedo et al., 2011). En México, el HLB ha provocado importantes reducciones en la producción, un aumento de los costos de producción y la pérdida de empleos, especialmente en las regiones que dependen en gran medida del cultivo de cítricos (Villar-Luna et al., 2024; Cervantes-Santos et al., 2025; García-Ávila et al., 2021; Salcedo et al., 2011).

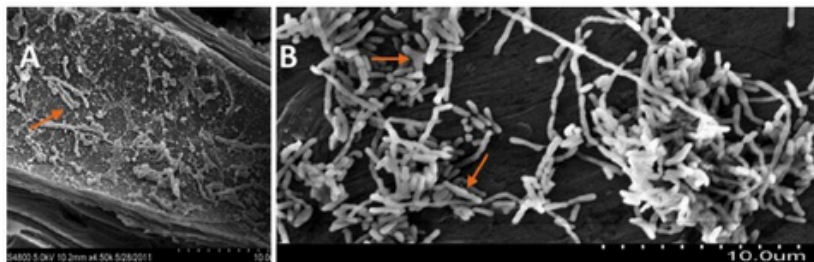


Figura 2. Micrografías de células de *Candidatus Liberibacter asiaticus*. A) Micrografía electrónica de barrido de una célula de floema de bigaro infectada con *Las*. B) Micrografía electrónica de barrido en gel de un co-cultivo de *C.L. asiaticus* (Fuente: Zheng et al., 2024).

2. Impacto en la Citricultura de México

El impacto del HLB en la citricultura mexicana ha sido devastador desde su introducción en 2009. Para 2010-2011, se estimaba que la presencia del HLB representaba una amenaza para las 549 mil hectáreas sembradas de cítricos (el 40% de la superficie nacional), correspondientes a 23 entidades federativas con 69 mil productores involucrados, generando un valor de producción superior a 8 mil millones de pesos y 154 mil empleos directos (Villar-Luna et al., 2024; Cervantes-Santos et al., 2025; García-Ávila et al., 2021; Salcedo et al., 2011). En regiones específicas como Tecomán y Armería, en Colima, entre 2010 y 2014, el HLB provocó la conversión de alrededor de 5,000 hectáreas de plantaciones de cítricos a otros cultivos, lo que resultó en una disminución de aproximadamente 84,721 toneladas de limón y una pérdida económica de MX\$302,636,729 (CESVO, 2015). Investigaciones en Colima demostraron que en árboles con HLB cubriendo toda la copa, el rendimiento se redujo en 45.8 % comparado con árboles sin síntomas, pasando de 60.3 frutos/m² a 27.6 frutos/m² (Robles-González et al., 2017). En 2013, la presencia del HLB se confirmó en 222 municipios de 13 estados mexicanos y actualmente se encuentra presente en todos los estados cítricos del país, siendo Colima el más afectado (CESVO, 2015).

Una vez que un árbol se infecta con HLB, desarrolla síntomas progresivos que incluyen moteado en las hojas, con zonas amarillas rodeadas de verde normal, engrosamiento de las nervaduras, acorchamiento, maduración irregular de los frutos, deformación y coloraciones variadas. Los árboles afectados pierden productividad de manera considerable y pueden morir en un período de 1 a 2 años cuando la enfermedad está establecida, aunque algunos pueden sobrevivir más tiempo en condiciones de manejo intensivo (CESAVE, 2017).

El HLB tiene su origen en China, donde fue descrito por primera vez entre 1870 y 1943. La enfermedad se originó probablemente en el sureste asiático, donde inicialmente afectó plantas nativas de la familia Rutaceae. Aunque existen reportes

de síntomas similares en India desde el siglo XVIII, el HLB, como enfermedad documentada científicamente, comenzó a reconocerse en China a finales del siglo XIX (López-San Juan et al., 2021).

Las bacterias se diseminan al alimentarse del floema de los cítricos, y la dispersión, tanto local como a larga distancia, se ve facilitada por el viento, el movimiento de material vegetal infectado y la migración del vector (Villar-Luna et al., 2024; Cervantes-Santos et al., 2025; Flores-Sánchez et al., 2017; López-Buenfil et al., 2017; Lee et al., 2015; Reynaud et al., 2022). La propagación asintomática y los prolongados periodos de incubación dificultan la detección y el control (Gottwald, 2010; Lee et al., 2015).



Figura 3. El psílido asiático de los cítricos (*Diaphorina citri*) adulto y sus larvas invaden esta sección de la planta. Este insecto es portador de la bacteria que causa el enverdecimiento de los cítricos (Crédito de la imagen: Michael Rogers, <https://epi.ufl.edu/2025/11/10/citrus-greening-disease-in-florida-what-to-know/>)

La enfermedad ha generado restricciones en la movilización y comercialización de plantas y frutas cítricas, impactando no solo la producción primaria, sino también toda la cadena productiva, incluyendo emparadoras, procesadoras y exportaciones (CESVO, 2015).

2.1. Impacto Específico del HLB en Baja California Sur

Baja California Sur es una de las regiones citrícolas más importantes de México. El estado cuenta con 3,900 hectáreas destinadas al cultivo de naranjas y la generación de un volumen de producción de 40,000 toneladas, representando un valor muy alto que impacta significativamente las economías agrícolas locales. La enfermedad ha afectado particularmente a regiones con alta densidad de producción comercial de cítricos, como la región del Pacífico y Baja California Sur (Villar-Luna et al., 2024; Cervantes-Santos et al., 2025; García-Ávila et al., 2021; López-Buenfil et al., 2017; Salcedo et al., 2011; Huang et al., 2022).

<https://doi.org/10.5281/zenodo.19075152>

El HLB fue detectado por vez primera en Baja California Sur en agosto de 2011, por lo que desde entonces, por lo que las autoridades sanitarias declararon al estado como zona bajo control fitosanitario. Las estrategias de manejo han incluido el control del vector, la eliminación de árboles infectados y la vigilancia regional, pero la enfermedad permanece, en gran medida, sin control (Villar-Luna et al., 2024; García-Ávila et al., 2021; López-Buenfil et al., 2017; Li et al., 2019; Hu et al., 2018). A partir de 2024, el estado ha intensificado las medidas preventivas y de control. Se reporta que la región del Pacífico en México, que incluye a Baja California Sur, se considera de alto riesgo epidémico e impacto comercial por el HLB debido a la ocurrencia e intensidad de la enfermedad (López-San Juan et al., 2021). Las autoridades estatales, a través de la Secretaría de Pesca, Acuicultura y Desarrollo Agropecuario (SEPADA), han reconocido que la producción de 40,000 toneladas de cítricos en la entidad está bajo amenaza significativa por la presencia del HLB, sin cura disponible, pero controlable mediante manejo

agronómico integral y el monitoreo del vector. Se han establecido campañas de prevención con el Comité Estatal de Sanidad Vegetal (CESV), instalación de trampas para monitoreo del vector *Diaphorina citri*, inspecciones de huertos y promoción de prácticas agronómicas que incluyen nutrición balanceada para mantener vigor de los árboles.

3. Temas de actualidad en investigación y el desarrollo tecnológico del HLB

El Huanglongbing (HLB), o enfermedad del enverdecimiento de los cítricos, es la enfermedad más destructiva que afecta a los cítricos en todo el mundo, causando graves pérdidas económicas y amenazando la sostenibilidad de la industria citrícola (Huang et al., 2021; Limayem et al., 2024; Zhou, 2020; Ghosh et al., 2022). La investigación sobre HLB se ha expandido rápidamente (Tabla 1), abarcando la biología del patógeno, las tecnologías de detección temprana, la resistencia de las plantas, la terapia de fagos, el manejo integrado, los impactos socioeconómicos, los marcos regulatorios y la influencia del cambio climático (Huang et al., 2021; Alquézar et al., 2021; Limayem et al., 2024; Kennedy et al., 2023; Mubeen et al., 2024; Machado et al., 2025; Yin et al., 2025; Hu et al., 2021; Zhou, 2020; Lee et al., 2015; Li et al., 2021; Munir et al., 2018; Yang et al., 2024; Ghosh et al., 2022). Los avances tecnológicos incluyen diagnóstico molecular, teledetección, inteligencia artificial e innovaciones biotecnológicas para la resistencia a enfermedades y el control de vectores (Ye et al., 2025; Ghosh et al., 2018; Machado et al., 2025; Zhou et al., 2025; Qiu et al., 2022; Morán et al., 2023; Zhang et al., 2024; Dong et al., 2025; Li et al., 2021; Zou et al., 2021). La investigación socioeconómica y regulatoria destaca la necesidad de políticas coordinadas, de adaptación económica y de estrategias de gestión sostenible (Zhou, 2020; Li et al., 2021; Munir et al., 2018). El

cambio climático se reconoce cada vez más como un factor que influye en la epidemiología del HLB, la dinámica de sus vectores y el riesgo futuro, lo que exige una gestión adaptativa y la investigación en este campo (Morán et al., 2023; Li et al., 2021; Yang et al., 2024) (Tabla 2).

3.1. Avances tecnológicos en la detección y el diagnóstico de HLB

En los últimos años se ha observado un progreso significativo en la detección de HLB, incluyendo diagnósticos moleculares (qPCR, amplificación isotérmica), biosensores y ensayos desplegables en campo (Ye et al., 2025; Ghosh et al., 2018; Qiu et al., 2022; Morán et al., 2023; Zhang et al., 2024; Xu et al., 2023; Dong et al., 2025; Thakuria et al., 2023; Huang et al., 2023; Martinelli et al., 2012; Valdés et al., 2016; Orjuela et al., 2020; Paudyal, 2016). La teledetección, la imagen hiperespectral y la inteligencia artificial (IA) han permitido la detección temprana, no destructiva y de alto rendimiento de la enfermedad de la mancha foliar herbívora (HLB) en huertos (Ye et al., 2025; Qiu et al., 2022; Dong et al., 2025; He et al., 2022; Yang et al., 2021). Se están desarrollando aplicaciones móviles y dispositivos portátiles para un diagnóstico de campo rápido y sencillo (Qiu et al., 2022; He et al., 2022). Los avances en la fusión de características multimodales y el aprendizaje automático han mejorado la precisión y la fiabilidad (Ye et al., 2025; Dong et al., 2025; Yang et al., 2021).

3.2. Innovaciones en el manejo de HLB y la resistencia de las plantas

Las estrategias de manejo integrado se centran en el patógeno, el hospedero y el vector, e incluyen péptidos antimicrobianos, nanotecnología, sistemas de inyección al tronco y enfoques biotecnológicos como la edición genética, la resistencia transgénica y fagoterapia (Huang et al., 2021; Alquézar et al., 2021; Limayem et al., 2024; Kennedy et al., 2023; Mubeen et

Tabla 1. Línea de Tiempo de Principales Hallazgos en la Investigación del HLB

Año	Descubrimiento
1919	Primera descripción en China (entonces denominada "huanglongbing", o "dragón amarillo") (Lin, 1956).
1920 a 1960	La enfermedad se reconoce en África y Asia; el agente causal se identifica como una bacteria limitada al floema (Da Graça <i>et al.</i> , 2016; Machado <i>et al.</i> , 2025; Thakuria <i>et al.</i> , 2023).
1970	Identificación del patógeno mediante microscopía electrónica; se confirma su naturaleza bacteriana no cultivable (Garnier <i>et al.</i> , 1984).
1990s	Uso de PCR para detectar <i>Ca. Liberibacter</i> , revolucionando el diagnóstico (Gottwald <i>et al.</i> , 2007).
2005	Detección en Florida (EE.UU.), desencadenando una crisis en la industria citrícola estadounidense (USDA-APHIS, 2005).
2009	Confirmación en México (Yucatán), extendiéndose rápidamente a 28 estados (SENASICA, 2010).
2015 Década de los 2020s	Primer caso reportado en Baja California Sur (SADER-BCS, 2021). La investigación se centra en la biología de la transmisión, el control de vectores, las interacciones moleculares y las estrategias de manejo (Villar-Luna <i>et al.</i> , 2024; Cervantes-Santos <i>et al.</i> , 2025; Younas <i>et al.</i> , 2025; Ghosh <i>et al.</i> , 2022; Hu <i>et al.</i> , 2021; Hu <i>et al.</i> , 2025; Li <i>et al.</i> , 2019; Hu <i>et al.</i> , 2018; Huang <i>et al.</i> , 2021).
2025	Se propone la terapia de fagos para contrarrestar enfermedades bacterianas en plantas (Grace <i>et al.</i> , 2021), y se analizaron 191 secuencias de pro fagos en 48 genomas de <i>Liberibacter</i> , uno de los cuales mostró potencial para ser usado en terapia de fagos y eliminar la bacteria <i>Candidatus Liberibacter asiaticus</i> , causante de HLB (Zheng <i>et al.</i> , 2023; Yin <i>et al.</i> , 2025).

al., 2024; Machado et al., 2025; Zhou et al., 2025; Ojo et al., 2024; Cheng et al., 2023; Wenxiu et al., 2022; Li et al., 2021; Tiwari et al., 2024; Zhao et al., 2025; Aksenov et al., 2024; Zou et al., 2021; Ghosh et al., 2022; Yin et al., 2025; Zou et al., 2017). Los nuevos compuestos (por ejemplo, péptidos antimicrobianos estables, aceites esenciales y bioflavonoides) y los métodos de administración (por ejemplo, inyección al tronco, pulverizaciones foliares con potenciadores de la permeación) son prometedores tanto para el tratamiento como para la prevención (Huang et al., 2021; Zhou et al., 2025; Ojo et al., 2024; Wenxiu et al., 2022; Aksenov et al., 2024; Chen et al., 2024; Zou et al., 2017). Los estudios genéticos y transcriptómicos han identificado genes clave de resistencia y redes reguladoras, lo que respalda el mejoramiento y la ingeniería de cultivares tolerantes a HLB (Alquézar et al., 2021; Machado et al., 2025; Hu et al., 2021; Cheng et al., 2023; Tiwari et al., 2024; Zhao et al., 2025; Zou et al., 2021; Zou et al., 2017).

3.3. Investigación socioeconómica y regulatoria

HLB ha causado pérdidas económicas multimillonarias, lo que ha impulsado la investigación sobre los impactos socioeconómicos, las respuestas regulatorias y la adaptación de la industria (Limayem et al., 2024; Zhou, 2020; Li et al., 2021; Munir et al., 2018). Las políticas regulatorias se centran en la cuarentena, el control de vectores, la eliminación de árboles infectados y la certificación de material de plantación libre de enfermedades (Zhou, 2020; Li et al., 2021; Munir et al., 2018). Los análisis económicos resaltan la necesidad de una gestión rentable y sostenible, así como la importancia de la intervención gubernamental y de la colaboración del sector productivo (Limayem et al., 2024; Zhou, 2020; Li et al., 2021; Munir et al., 2018).

3.4. Perspectivas del cambio climático y riesgos futuros

Se prevé que el cambio climático altere la epidemiología del HLB, la distribución de vectores y el riesgo de la enfermedad, lo que exige estrategias de gestión adaptativa (Morán et al., 2023; Li et al., 2021; Yang et al., 2024). La investigación se centra cada vez más en modelar el riesgo futuro, comprender el impacto de la temperatura y de los patrones climáticos en la propagación de enfermedades y desarrollar enfoques de gestión resilientes al clima (Morán et al., 2023; Li et al., 2021; Yang et al., 2024).

4. Futuras líneas de investigación, incluidas las perspectivas del cambio climático, en la lucha global contra el HLB

El panorama de la investigación sobre HLB se caracteriza por una rápida innovación tecnológica, enfoques interdisciplinarios y una creciente integración de perspectivas socioeconómicas y regulatorias (Huang et al., 2021; Alquézar et al., 2021; Limayem et al., 2024; Kennedy et al., 2023; Mubeen et al., 2024; Machado et al., 2025; Hu et al., 2021; Zhou, 2020; Lee et al., 2015; Li et al., 2021; Munir et al., 2018; Yang et al., 2024; Ghosh et al., 2022). Los avances en el diagnóstico molecular, la teledetección y la inteligencia artificial han revolucionado la detección temprana, mientras que las innovaciones biotecnológicas y químicas ofrecen nuevas esperanzas para el manejo de enfermedades y la generación de resistencia (Huang et al., 2021; Ye et al., 2025; Alquézar et al., 2021; Machado et al., 2025; Zhou et al., 2025; Qiu et al., 2022; Morán et al., 2023; Ojo et al., 2024; Cheng et al., 2023; Wenxiu et al., 2022; Li et al., 2021; Tiwari et al., 2024; Zhao et al., 2025; Aksenov et al., 2024; Chen et al., 2024; Zou et al., 2021; He et al., 2022; Zou et al., 2017, 2021).

Tabla 2. Temas de actualidad en investigación y el desarrollo tecnológico del HLB (Fuente: referencias citadas en el Punto No. 3)

Estrategias	Investigación Científica y Desarrollos Tecnológicos
<p>Control y manejo de vectores (Combate al psílido asiático de los cítricos)</p> <p>Desarrollo de bactericidas y terapias (Eliminación de la bacteria dentro del árbol)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Nuevos insecticidas y rotación: Desarrollo de nuevas clases de productos químicos y optimización de los programas de aplicación para combatir la resistencia del psílido. • Control biológico: Cría masiva y liberación de depredadores naturales del PAC, como la avispa parasitoide <i>Tamarixia radiata</i>. Este es un pilar fundamental de los Programas de Manejo Regional. • Repelentes y barreras contra el psílido: Aplicación de películas de caolín o de partículas para recubrir los árboles, haciéndolos menos reconocibles o atractivos para que los psíidos se posen y se alimenten. • Interferencia de ARN (ARNi): Un tema de gran actualidad. Desarrollo de aerosoles o plantas genéticamente modificadas que producen ARN de doble cadena (ARNdc) para silenciar genes críticos en el psílido, eliminándolo o impidiendo que transmita la bacteria. • Péptidos antimicrobianos (AMP): Modificar genéticamente los árboles para que produzcan sus propios compuestos antibacterianos o aplicarlos mediante inyección al tronco. Esta es un área importante de la investigación biotecnológica. • Terapéutica con moléculas pequeñas: Analizar extensas bibliotecas de compuestos químicos para encontrar aquellos que puedan eliminar la bacteria o inhibir su crecimiento. Compuestos como la benzobromarona han mostrado resultados prometedores en investigación. • Termoterapia: Utilizar calor (por ejemplo, vapor, agua caliente o energía solar) para debilitar la bacteria sin dañar el árbol. Se está optimizando para su uso comercial. • Nanoemulsiones y sistemas de administración: Desarrollo de métodos innovadores para administrar terapias de forma eficaz al sistema vascular del árbol, a menudo utilizando nanotecnología para proteger el ingrediente activo y mejorar su movilidad. • Fagoterapia: Utiliza fagos, los cuales son virus que matan bacterias, para atacar de forma específica a la bacteria causante de HLB. A la fecha se han analizado 191 secuencias de pro fagos en 48 genomas de <i>Liberibacter</i>, de los cuales 19 son fagos activos y uno mostró potencial para ser utilizado en terapia de fagos.
<p>Resistencia y tolerancia de la planta huésped (Desarrollo de árboles más resistentes)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Edición genética (CRISPR-Cas9): Un tema de gran actualidad. Los investigadores utilizan CRISPR para editar los genes de variedades comerciales de cítricos y hacerlas resistentes. Los objetivos incluyen genes que predisponen a la planta a la enfermedad o genes de especies relacionadas que confieren resistencia. • Enfoques transgénicos: Inserción de genes de otros organismos (como el gen defensivo de la espinaca o el gen NPR1 de la planta <i>Acacia thaliana</i>) en los cítricos para proporcionar resistencia. Si bien han demostrado ser eficaces en ensayos clínicos, aún existen obstáculos regulatorios y de aceptación pública. • Mejoramiento convencional y desarrollo de portainjertos: Selección de extensas colecciones de
<p>Resistencia y tolerancia de la planta huésped (Desarrollo de árboles más resistentes)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Edición genética (CRISPR-Cas9): Un tema de gran actualidad. Los investigadores utilizan CRISPR para editar los genes de variedades comerciales de cítricos y hacerlas resistentes. Los objetivos incluyen genes que predisponen a la planta a la enfermedad o genes de especies relacionadas que confieren resistencia. • Enfoques transgénicos: Inserción de genes de otros organismos (como el gen defensivo de la espinaca o el gen NPR1 de la planta <i>Acacia thaliana</i>) en los cítricos para proporcionar resistencia. Si bien han demostrado ser eficaces en ensayos clínicos, aún existen obstáculos regulatorios y de aceptación pública. • Mejoramiento convencional y desarrollo de portainjertos: Selección de extensas colecciones de germoplasma (como <i>Poncirus trifoliata</i> y especies relacionadas) para identificar tolerancia o resistencia natural y su posterior mejoramiento para obtener injertos y portainjertos comercialmente viables. El portainjerto USDA US-942 es un ejemplo exitoso de este método, ya que ofrece una mayor tolerancia. • Comprensión de la interacción planta-microbio: Investigación fundamental sobre cómo las bacterias causan enfermedades, qué genes y rutas metabólicas de la planta están involucrados e identificación de mecanismos de tolerancia natural en ciertas variedades de cítricos o especies relacionadas.
<p>Agricultura de precisión y detección temprana</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Imágenes espectrales y teledetección: Uso de drones, aviones y satélites con sensores hiperspectrales y multispectrales para detectar cambios sutiles en la salud de la copa de los árboles antes de que los síntomas sean visibles a simple vista. • Detección olfativa canina: Entrenamiento de perros para identificar árboles infectados con HLB mediante el olfato con una precisión y velocidad notables, a menudo mucho antes que otros métodos de detección. • Biosensores y pruebas rápidas de campo: Desarrollo de dispositivos portátiles o tiras reactivas químicas que detectan rápidamente la presencia de ADN bacteriano o una firma metabólica de la enfermedad en el campo, eliminando la necesidad de pruebas PCR de laboratorio. • IA y aprendizaje automático: Uso de inteligencia artificial para analizar grandes volúmenes de datos provenientes de imágenes espectrales y redes de sensores, con el fin de mapear y predecir con precisión brotes de enfermedades.
<p>Enfoques holísticos y basados en el microbioma</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Ingeniería del microbioma del floema: Estudio de la comunidad de otros microbios que habitan en el floema de la planta. El objetivo es introducir bacterias beneficiosas que puedan competir con la bacteria HLB o inhibirla. • Endófitos y microbios beneficiosos: Aplicación de hongos y bacterias beneficiosos a las raíces u hojas para estimular el sistema inmunitario de la planta (resistencia sistémica inducida) o antagonizar directamente al patógeno. • Terapias nutricionales y bioestimulantes: Si bien no constituyen una cura, optimizar los programas de nutrición mejorada con micronutrientes específicos, promotores del crecimiento vegetal y enmiendas del
<p>Investigación Socioeconómico y Regulatoria</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Análisis de Costo-Beneficio: Evaluar la viabilidad económica de las nuevas tecnologías para los productores. • Vías Regulatorias: Colaborar con agencias (como la EPA y el USDA) para establecer vías claras de aprobación de nuevas herramientas, especialmente plaguicidas basados en ARN de interferencia (ARNi) y árboles editados genéticamente. • Aceptación por Productores y Consumidores: Comprender y abordar las barreras para la adopción de nuevas tecnologías, particularmente la ingeniería genética.

Sin embargo, persisten desafíos, como la falta de una cura, la complejidad del sistema patógeno-huésped-vector y la necesidad de soluciones sostenibles y respetuosas con el medio ambiente (Huang et al., 2021; Alquézar et al., 2021; Limayem et al., 2024; Kennedy et al., 2023; Mubeen et al., 2024; Machado et al., 2025; Hu et al., 2021; Zhou, 2020; Lee et al., 2015; Li et al., 2021; Munir et al., 2018; Yang et al., 2024; Ghosh et al., 2022; Zou et al., 2017). La investigación socioeconómica subraya la importancia de la acción regulatoria coordinada, la adaptación del sector y el apoyo económico a los productores (Limayem et al., 2024; Zhou, 2020; Li et al., 2021; Munir et al., 2018). El cambio climático añade mayor complejidad, lo que exige una gestión adaptativa e investigación orientada al futuro (Morán et al., 2023; Li et al., 2021; Yang et al., 2024).

4.1. Brechas en la investigación

Si bien se conoce mucho sobre la biología, la transmisión y el impacto de la HLB, aún existen lagunas en la comprensión de la epidemiología regional, el manejo eficaz a largo plazo y el desarrollo de cultivares resistentes, especialmente en el contexto de la citricultura mexicana (Tabla 2). A pesar de los avances, persisten brechas en la validación de campo de las nuevas tecnologías, en la eficacia a largo plazo de las estrategias de resistencia, en la adaptación socioeconómica y en el manejo resiliente al clima. Asimismo, se requiere un mayor número de estudios interdisciplinarios y específicos para cada región.

Tabla 3. Principales preguntas de investigación abiertas para futuros estudios sobre el HLB.

Pregunta	¿Por qué?
¿Cómo se pueden optimizar las estrategias de manejo específicas para cada región para el control del HLB en México?	Las diferencias regionales en clima, poblaciones de vectores y variedades de cítricos requieren enfoques adaptados a cada caso.
¿Qué soluciones genéticas o biotecnológicas pueden proporcionar resistencia duradera al HLB en los cítricos?	No existen cultivares resistentes; los avances podrían transformar el manejo de la enfermedad y la supervivencia de la industria.
¿Cómo influye el microbioma de los cítricos en la progresión del HLB y el potencial de biocontrol?	Comprender las interacciones planta-microbio puede revelar nuevas estrategias sostenibles de mitigación de la enfermedad.
¿Qué tan efectivos son los nuevos métodos de detección biotecnológicos y basados en IA en huertos de cítricos a gran escala y en condiciones reales?	La validación de campo es esencial para garantizar que los avances de laboratorio se traduzcan en soluciones prácticas y escalables para los productores.
¿Cuáles son los impactos socioeconómicos a largo plazo del HLB y las intervenciones regulatorias en las industrias de cítricos en diferentes regiones?	Comprender la adaptación económica y la efectividad de las políticas permitirá una gestión sostenible y el apoyo a las comunidades afectadas.
¿Cómo alterará el cambio climático la epidemiología del HLB y qué estrategias de gestión adaptativa son las más efectivas?	Anticipar los riesgos futuros y desarrollar enfoques resilientes al clima es fundamental para el control de la enfermedad a largo plazo.

4.2. Preguntas de investigación abiertas

Las investigaciones futuras deberían centrarse en la validación de campo de las nuevas tecnologías, el monitoreo a largo plazo de las estrategias de resistencia, la adaptación socioeconómica y la gestión resiliente al clima (Tabla 3).

5. Conclusión

La investigación sobre la enfermedad Huanglongbing o HLB (HLB, por sus siglas en inglés, o enverdecimiento de los cítricos) se encuentra a la vanguardia de la fitopatología, integrando tecnología de punta, análisis socioeconómico y adaptación climática. Si bien se han logrado avances significativos en la detección, el manejo y la

comprensión de la enfermedad, aún persisten importantes desafíos, particularmente en el desarrollo de resistencia duradera, manejo sostenible y marcos regulatorios eficaces.

6. Literatura citada

Aksenov, A., Blacutt, A., Ginnan, N., et al. (2024). Spatial chemistry of citrus reveals molecules bactericidal to *Candidatus Liberibacter asiaticus*. *Scientific Reports*, 14. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-70499-z>

Alquézar, B., Carmona, L., Bennici, S., Peña, L. (2021). Engineering of citrus to obtain huanglongbing resistance. *Current Opinion in Biotechnology*, 70, 196-203. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2021.06.003>

Cervantes-Santos, J., Villar-Luna, H., Bojórquez-Orozco, et al. (2025). Huanglongbing as a Persistent Threat to Citriculture in Latin America. *Biology*, 14. <https://doi.org/10.3390/biology14040335>

Comité Estatal de Sanidad Vegetal de Oaxaca, CESVO. (2015). Campaña Contra Huanglongbing de los Cítricos. <http://www.cesvo.org.mx/hlb/>

Comité Estatal de Sanidad Vegetal, CESAVER. (2017). Huanglongbing de los Cítricos "HLB" (*Candidatus Liberibacter* spp.). <https://cesave.org.mx/huanglongbing-de-los-citricos-hlb-candidatus-liberibacter-spp/>

Chen, S., Yuan, A., Wang, H., et al. (2024). Enhancing agrochemical delivery in citrus leaves with geraniol: a promising strategy for controlling huanglongbing (HLB). *Pest Management Science*. <https://doi.org/10.1002/ps.8526>

Cheng, B., Xu, L., Bilal, M., et al. (2023). Small RNAs contribute to citrus Huanglongbing tolerance by manipulating methyl salicylate signaling and exogenous methyl salicylate primes citrus groves from emerging infection. *The Plant Journal for Cell and Molecular Biology*. <https://doi.org/10.1111/tpj.16426>

Da Graça, J., Douhan, G., Halbert, S., et al. (2016). Huanglongbing: An overview of a complex pathosystem ravaging the world's citrus. *Journal of Integrative Plant Biology*, 58 4, 373-87. <https://doi.org/10.1111/jipb.12437>

Dong, R., Shiraiwa, A., Ichinose, K., et al. (2025). Hyperspectral Imaging and Machine Learning for Huanglongbing Detection on Leaf-Symptoms. *Plants*, 14. <https://doi.org/10.3390/plants14030451>

Flores-Sánchez, J., Mora-Aguilera, G., Loeza-Kuk, E., et al. (2017). Diffusion Model for Describing the Regional Spread of Huanglongbing from First-Reported Outbreaks and Basing an Area Wide Disease Management Strategy. *Plant Disease*, 101 7, 1119-1127. <https://doi.org/10.1094/pdis-04-16-0418-re>

García-Ávila, C., Trujillo-Arriaga, F., Quezada-Salinas, et al. (2021). Holistic Area-Wide Approach for Successfully Managing Citrus Greening (Huanglongbing) in Mexico. In: Hendrichs J., Pereira R., Vreysen M.J.V. (Eds). *Area-wide Integrated Pest Management*. CRC Press, pp. 33-49. <https://doi.org/10.1201/9781003169239-4>

Garnier M, Danel N., Bové M. (1984). The greening organism is a gram-negative bacterium. In *Proceedings of 9th Conference of the International Organization of Citrus Virologist*. Riverside, University of California. p 115-124. <https://swfrec.ifas.ufl.edu/hlb/database/pdf/00000469.pdf>

Ghosh, D., Kokane, S., Kokane, A., et al. (2018). Development of a recombinase polymerase based isothermal amplification combined with lateral flow assay (HLB-RPA-LFA) for rapid detection of "Candidatus *Liberibacter asiaticus*". *PLoS ONE*, 13. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0208530>

Ghosh, D., Kokane, S., Savita, B., et al. (2022). Huanglongbing Pandemic: Current Challenges and Emerging Management Strategies. *Plants*, 12. <https://doi.org/10.3390/plants12010160>

- Gottwald, T. (2010). Current epidemiological understanding of citrus Huanglongbing. *Annual Review of Phytopathology*, 48, 119-39. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-073009-114418>
- Grace, E.R., Rabiey, M., Friman, et al. (2021) Seeing the forest for the trees: Use of phages to treat bacterial tree diseases. *Plant Pathology*, 70, 1987–2004. <https://doi.org/10.1111/ppa.13465>
- He, C., Li, X., Liu, Y., et al. (2022). Combining multicolor fluorescence imaging with multispectral reflectance imaging for rapid citrus Huanglongbing detection based on lightweight convolutional neural network using a handheld device. *Comput. Electron. Agric.*, 194, 106808. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.106808>
- Hu, B., Rao, M., Deng, X., et al. (2021). Molecular signatures between citrus and *Candidatus Liberibacter asiaticus*. *PLoS Pathogens*, 17. <https://doi.org/10.1371/journal.ppat.1010071>
- Hu, J., Jiang, J., Wang, N. (2018). Control of Citrus Huanglongbing via Trunk Injection of Plant Defense Activators and Antibiotics. *Phytopathology*, 108 2, 186-195. <https://doi.org/10.1094/phyto-05-17-0175-r>
- Hu, Y., Lu, N., Bao, K., et al. (2025). Swords and shields: the war between *Candidatus Liberibacter asiaticus* and citrus. *Frontiers in Plant Science*, 15. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1518880>
- Huang, C., Araujo, K., Sánchez, J., et al. (2021). A stable antimicrobial peptide with dual functions of treating and preventing citrus Huanglongbing. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2019628118>
- Huang, J., Alanís-Martínez, I., Kumagai, L., et al. (2022). Machine learning and analysis of genomic diversity of “*Candidatus Liberibacter asiaticus*” strains from 20 citrus production states in Mexico. *Frontiers in Plant Science*, 13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1052680>
- Huang, W., Zhong, Z., Lin, Z., et al. (2023). An inhibitor-monitorable single-tube duplex quantitative real-time PCR assay for the detection of *Candidatus Liberibacter asiaticus*. *Plant Disease*. <https://doi.org/10.1094/pdis-09-22-2168-sr>
- Kennedy, J., Wood, K., Pitino, M., et al. (2023). A perspective on current therapeutic molecule screening methods against *Candidatus Liberibacter asiaticus*, the presumed causative agent of citrus Huanglongbing. *Phytopathology*. <https://doi.org/10.1094/phyto-12-22-0455-per>
- Lee, J., Halbert, S., Dawson, W., et al. (2015). Asymptomatic spread of huanglongbing and implications for disease control. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112, 7605-7610. <https://doi.org/10.1073/pnas.1508253112>
- Li, J., Li, L., Pang, Z., et al. (2019). Developing Citrus Huanglongbing (HLB) Management Strategies Based on the Severity of Symptoms in HLB-Endemic Citrus-Producing Regions. *Phytopathology*, 109 4, 582-592. <https://doi.org/10.1094/phyto-08-18-0287-r>
- Li, X., Ruan, H., Zhou, C., et al. (2021). Controlling Citrus Huanglongbing: Green Sustainable Development Route Is the Future. *Frontiers in Plant Science*, 12. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.760481>
- Limayem, A., Martin, E., Shankar, S. (2024). Study on the citrus greening disease: Current challenges and novel therapies. *Microbial Pathogenesis*, 106688. <https://doi.org/10.1016/j.micpath.2024.106688>
- Lin Kung Hsang. 1956. Yellow shoot of citrus. *Symptomatology. Investigations in the cause of huanglongbing. Natural transmission and spread. General conclusions. Acta Phytopathologica Sinica* 2: 1-42.
- Lopez-Buenfil, J., Ramirez-Pool, J., Ruiz-Medrano, R., et al. (2017). Dynamics of Huanglongbing-associated Bacterium *Candidatus Liberibacter asiaticus* in *Citrus aurantifolia* Swingle (Mexican Lime). *Pakistan Journal of Biological Sciences: PJBS*, 20 3, 113-123. <https://doi.org/10.3923/pjbs.2017.113.123>

- López-San Juan M.P., Ortega-Arenas L.D., López-Buenfil J.A., et al. (2021). Endosymbionts associated with *Diaphorina citri*, vector of *Candidatus Liberibacter asiaticus*. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 27(1), 43-54. <http://dx.doi.org/10.5154/r.rchsh.2019.12.022>
- Machado, R., Moschen, S., Conti, G., et al. (2025). Exploring the Genetic Networks of HLB Tolerance in Citrus: Insights Across Species and Tissues. *Plants*, 14. <https://doi.org/10.3390/plants14121792>
- Martinelli, F., Uratsu, S., Albrecht, U., et al. (2012). Transcriptome Profiling of Citrus Fruit Response to Huanglongbing Disease. *PLoS ONE*, 7. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0038039>
- Morán, F., Herrero-Cervera, M., Carvajal-Rojas, S., Marco-Noales, E. (2023). Real-time on-site detection of the three *Candidatus Liberibacter* species associated with HLB disease: a rapid and validated method. *Frontiers in Plant Science*, 14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1176513>
- Mubeen, M., Ali, A., Iftikhar, Y., et al. (2024). Innovative strategies for characterizing and managing huanglongbing in citrus. *World Journal of Microbiology & Biotechnology*, 40 11, 342. <https://doi.org/10.1007/s11274-024-04135-3>
- Munir, S., He, P., Wu, Y., et al. (2018). Huanglongbing Control: Perhaps the End of the Beginning. *Microbial Ecology*, 76, 192-204. <https://doi.org/10.1007/s00248-017-1123-7>
- National Academies (2020). Genetically Engineered Resistance to HLB <https://nap.nationalacademies.org/catalog/25797/genetically-engineered-resistance-to-citrus-huanglongbing-disease>
- Ojo, I., Ampatzidis, Y., Neto, A., Batuman, O. (2024). Development of an automated needle-based trunk injection system for HLB-affected citrus trees. *Biosystems Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2024.03.003>
- Orjuela, W., Echeverry, W., Pedraza, R. (2020). Identificación de tecnologías y métodos para la detección temprana del Huanglongbing (HLB) a través de ciencia métrica en artículos científicos y patentes. *Cienc. Tecnol. Agropecuaria*, 21 (2): e1208. https://doi.org/10.21930/rcta.vol21_num2_art:1208
- Paudyal, K. (2016). Technological Advances in Huanglongbing (HLB) or Citrus Greening Disease Management. *Journal of Nepal Agricultural Research Council*, 1, 41-50. <https://doi.org/10.3126/jnarc.v1i0.15735>
- Qiu, R., Chen, S., Chi, M., et al. (2022). An automatic identification system for citrus greening disease (Huanglongbing) using a YOLO convolutional neural network. *Frontiers in Plant Science*, 13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1002606>
- Reynaud, B., Turpin, P., Molinari, F., et al. (2022). The African citrus psyllid *Trioza erytreae*: An efficient vector of *Candidatus Liberibacter asiaticus*. *Frontiers in Plant Science*, 13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1089762>
- Robles-González M.M., Orozco-Santos M., Manzanilla-Ramírez M.A., et al. (2017). Efecto del HLB sobre el rendimiento de limón mexicano en Colima, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 8(5):1101-1111. <https://cienciasagricolas.inifap.gob.mx/index.php/agricolas/article/view/111>
- SADER-BCS (2021). Impacto del HLB en Baja California Sur. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. <https://www.gob.mx/sader/acciones-y-programas/impacto-del-hlb-en-bcs>
- Salcedo, D., Mora, G., Covarrubias, I., et al. (2011). Assessment of the Economic Impact of Huanglongbing (HLB) disease on Mexico's Citrus Chain. *Comuniica online*, 7: 1-9. [file:///Users/felipeascenciovalle/Downloads/Assessment of the Economic Impact of Hua.pdf](file:///Users/felipeascenciovalle/Downloads/Assessment%20of%20the%20Economic%20Impact%20of%20Hua.pdf)

- Samiei, F. Fotoohiyan, Z., Salehi-Sardoei A. *et al.* (2024). Phage Therapy: Application in Plant Disease Control. In: Parray, J.A. (eds) Progress in Soil Microbiome Research. Progress in Soil Science. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-71487-0_11
- SENASICA (2010). HLB en México: Diagnóstico y estrategias. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/senasica/documentos/hlb-en-mexico-diagnostico-y-estrategias>
- Soto-Plancarte A., Santillán-Mendoza R., Rodríguez-Alvarado G., Fernández-Pavía S.P., Hernández-Macías B., Alanis-Martínez E. 2024. Métodos de detección de Huanglongbing en cítricos». Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas 15(4). ME:e3300. <https://doi.org/10.29312/remexca.v15i4.3300>
- Thakuria, D., Chaliha, C., Dutta, P., *et al.* (2023). Citrus Huanglongbing (HLB): Diagnostic and management options. Physiological and Molecular Plant Pathology. <https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2023.102016>
- Tiwari, T., Robertson, C., El-Mohtar, C., *et al.* (2024). Genetic and physiological characteristics of CsNPR3 edited citrus and their impact on HLB tolerance. Frontiers in Genome Editing, 6. <https://doi.org/10.3389/fgeed.2024.1485529>
- USDA-APHIS (2023). Huanglongbing Disease Management. <https://www.aphis.usda.gov/aphis/resources/pests-diseases/hungry-pests/the-threat/huanglongbing/huanglongbing>
- Valdés, R., Ortiz, J., Beache, M., *et al.* (2016). A review of techniques for detecting Huanglongbing (greening) in citrus. Canadian Journal of Microbiology, 62, 803-811. <https://doi.org/10.1139/cjm-2016-0022>
- Villar-Luna, H., Santos-Cervantes, M., Rodríguez-Negrete, E., *et al.* (2024). Economic and Social Impact of Huanglongbing on the Mexico Citrus Industry: A Review and Future Perspectives. Horticulturae. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10050481>
- Wang, N., Trivedi, P. (2013). Citrus huanglongbing: a newly relevant disease presents unprecedented challenges. Phytopathology, 103 7, 652-65. <https://doi.org/10.1094/phyto-12-12-0331-rvw>
- Wenxiu M., Pang, Z., Huang, X., *et al.* (2022). Citrus Huanglongbing is a pathogen-triggered immune disease that can be mitigated with antioxidants and gibberellin. Nature Communications, 13. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-28189-9>
- Xu, Q., Bai, J., *et al.* (2023). Identification of multiple symptoms of Huanglongbing (HLB) by electronic nose based on the variability of volatile organic compounds (VOCs). Annals of Applied Biology. <https://doi.org/10.1111/aab.12845>
- Yang, D., Wang, F., Hu, Y., *et al.* (2021). Citrus Huanglongbing Detection Based on Multi-Modal Feature Fusion Learning. Frontiers in Plant Science, 12. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.809506>
- Yang, K., Hu, B., Zhang, W., *et al.* (2024). Recent progress in the understanding of Citrus Huanglongbing: from the perspective of pathogen and citrus host. Molecular Breeding 44: 77. <https://doi.org/10.1007/s11032-024-01517-1>
- Ye, N., Mai, W., Qin, F., *et al.* (2025). Early detection of Citrus Huanglongbing by UAV remote sensing based on MGA-UNet. Frontiers in Plant Science, 16. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1503645>
- Yin, H., Wan, J., Zhang, S., *et al.*, (2025). Unveiling Prophage Diversity and Host Interactions in *Liberibacter*: Genomic Insights for Phage Therapy Against Citrus Huanglongbing. Biology 14, 576. <https://doi.org/10.3390/biology14050576>
- Younas, M., Zheng, Z., Atiq, M., *et al.* (2025). Insights into the Huanglongbing pandemic focusing on transmission biology, virulence factors and multifaceted management strategies. Pest Management Science. <https://doi.org/10.1002/ps.70073>

Zhang, Y., Hu, C., Yin, Y., et al. (2024). CRISPR/Cas12a-Responsive Smart DNA Hydrogel for Sensitive Electrochemiluminescence Detection of the Huanglongbing Outer Membrane Protein Gene. *Analytical Chemistry*.
<https://doi.org/10.1021/acs.analchem.4c02489>

Zheng D., Armstrong C.M., Yao W., Wu B., Luo W., Powell C., Hunter W., Luo F., Gabriel D., Duan Y. (2024). Towards the completion of Koch's postulates for the citrus huanglongbing bacterium, *Candidatus Liberibacter asiaticus*. *Horticulture Research* 11: uhae011. <https://doi.org/10.1093/hr/uhae011>

Zhao, P., Yang, H., Sun, Y., et al. (2025). Targeted MYC2 stabilization confers citrus Huanglongbing resistance. *Science*, 388 6743, 191-198.
<https://doi.org/10.1126/science.adq7203>

Zhou, C. (2020). The status of citrus Huanglongbing in China. *Tropical Plant Pathology*, 1-6.
<https://doi.org/10.1007/s40858-020-00363-8>

Zhou, C. (2020). The status of citrus Huanglongbing in China. *Tropical Plant Pathology*, 1-6.
<https://doi.org/10.1007/s40858-020-00363-8>

Zhou, Y., Li, X., Guo, Z., et al. (2025). Chitosan Nanoparticles Encapsulate Antimicrobial Peptides for the Prevention and Control of Citrus *reticulata* Huanglongbing and Their Distribution in Plants. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*.
<https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5c01419>

Zou, X., Jiang, X., Xu, L., et al. (2017). Transgenic citrus expressing synthesized cecropin B genes in the phloem exhibits decreased susceptibility to Huanglongbing. *Plant Molecular Biology*, 93, 341-353.
<https://doi.org/10.1007/s11103-016-0565-5>

Zou, X., Zhao, K., Liu, Y., et al. (2021). Overexpression of Salicylic Acid Carboxyl Methyltransferase (CsSAMT1) Enhances Tolerance to Huanglongbing Disease in Wanjincheng Orange (*Citrus sinensis* (L.) Osbeck). *International Journal of Molecular Sciences*, 22.
<https://doi.org/10.3390/ijms22062803>

Cita:

Ascencio, F., & Gómez-Anduro, G. (2026). Huanglongbing (HLB): Retos y Soluciones en la Citricultura Moderna. *Biotecnológica Magazine*, 4(1), 35-48.
<https://doi.org/10.5281/zenodo.19075152>