



Artículo de revisión

## Roya de la soja en Paraguay: una revisión sobre el control químico y la importancia de estudios genético-moleculares para detectar poblaciones resistentes

### Asian soybean rust in Paraguay: a review on chemical control and the importance of molecular-genetic studies to detect resistant populations

Daniela Inés Haupenthal-Berwanger<sup>1</sup>, Marco Maidana-Ojeda<sup>1</sup>, Deisy Mariela Zimmer<sup>1</sup>, Diego Leandro Gallas Zaracho<sup>1</sup>, Liliana Noelia Talavera-Stefani<sup>2</sup>, Guillermo Andrés Enciso-Maldonado<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Universidad Católica “Nuestra Señora de la Asunción” Unidad Pedagógica Hohenau, Hohenau, Paraguay.

<sup>2</sup>Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Nacional de Itapúa, Encarnación, Paraguay.

\*Autor de correspondencia: Guillermo Andrés Enciso-Maldonado; guillermo.enciso@uc.edu.py

**Recibido:** 26/10/2024 **Aceptado:** 29/01/2025

#### Resumen

La roya asiática de la soja (*Phakopsora pachyrhizi*), es considerada la enfermedad más significativa en la agricultura de Paraguay, ya que, su agente causal posee una notable capacidad de evolución y desarrollo de resistencia a fungicidas, lo que lo convierte en un desafío agrícola considerable. El manejo principal de este patógeno se efectúa mediante el uso de premezclas de fungicidas con distintos modos de acción, como los inhibidores de la desmetilación, de la quinona externa y de la succinato deshidrogenasa. En otros países, se han identificado mutaciones en el patógeno que resultan en poblaciones resistentes a los tratamientos, afectando directamente la producción y obligando al aumento de dosis de fungicidas, haciendo urgente adoptar estrategias de manejo de resistencia, incluyendo la rotación y combinación de fungicidas. La detección genético-molecular de resistencias en *P. pachyrhizi* es vital para optimizar las estrategias de manejo y preservar la sostenibilidad productiva. La implementación de una red nacional de monitoreo en Paraguay mejoraría el manejo de fungicidas y ayudaría a prevenir el desarrollo acelerado de resistencia, complementándose con el uso de control biológico, variedades resistentes y sistemas predictivos para prevenir epidemias.

**Palabras clave:** *Glycine max*, *Phakopsora pachyrhizi*, control químico, resistencia a fungicidas.

## Abstract

Asian soybean rust (*Phakopsora pachyrhizi*) is the most significant disease in Paraguayan agriculture, and its causal agent has a remarkable ability to evolve and develop resistance to fungicides, making it a considerable agricultural challenge. The main disease control employs fungicide premixes with different modes of action, such as demethylation inhibitors, quinone outside inhibitors, and succinate dehydrogenase inhibitors. Pathogen mutations have been identified in other countries, resulting in populations resistant to treatments, directly affecting production and requiring fungicide dosage increase, thereby making it urgent to adopt resistance management strategies, including the rotation and combination of fungicides. The genetic-molecular detection of resistance in *P. pachyrhizi* is vital to optimize management strategies and preserve productive sustainability. Implementing a national monitoring network in Paraguay would improve fungicide management and prevent an accelerated resistance development, which can be enhanced by biological control, using resistant varieties, and predictive systems for epidemic prevention.

**Keywords:** *Glycine max*, *Phakopsora pachyrhizi*, chemical control, fungicide resistance.

## 1. Introducción

En Paraguay, la producción de soja se ha desarrollado durante más de un siglo, inicialmente destinada a la alimentación del ganado. A partir de la década de 1990, la superficie cultivada aumentó notablemente. Se pasó de alrededor de un millón de hectáreas a cerca de 3,6 millones de hectáreas, con una producción estimada de aproximadamente 10 millones de toneladas para el año 2024 (1).

La siembra de soja en Paraguay se lleva a cabo en la primavera, comenzando en septiembre, cuando las temperaturas del aire y del suelo son adecuadas para la germinación y el crecimiento óptimo del cultivo. La cosecha se realiza a mediados de enero y puede extenderse hasta febrero. Inmediatamente después de la cosecha, muchos agricultores optan por una segunda siembra de soja, conocida como "temporada de siembra alternativa" o "safriña" (2). En esta segunda temporada, por lo general, el cultivo de soja presenta un ciclo más corto debido a las condiciones climáticas cambiantes que limitan su crecimiento (3).

Sin embargo, tanto en la primera siembra como en la "safriña", la producción de soja en Paraguay se ve afectada por diversos factores bióticos y abióticos que impactan significativamente el rendimiento. Entre los factores abióticos, se incluyen la sequía, las variaciones de temperatura, la calidad del suelo, desequilibrios fisiológicos y otros factores como los fenómenos de El Niño y La Niña (4-7).

Los factores bióticos, incluyendo plagas y enfermedades, afectan negativamente la producción de soja. Entre las enfermedades más significativas se encuentran la roya asiática

de la soja (RAS), causada por *Phakopsora pachyrhizi* y la mancha ojo de rana, causada por *Cercospora sojina*. También son problemáticas las enfermedades de fin de ciclo, como el tizón foliar y la mancha púrpura de la semilla causadas por *Cercospora* spp. Otras enfermedades que impactan el cultivo son la mancha marrón (*Septoria glycines*) y la mancha anillada (*Corynespora casiiicola*). Además, hongos como *Macrophomina phaseolina*, que provoca la pudrición carbonosa del tallo; nematodos como el nematodo del quiste de la soja (*Heterodera glycines*), nematodos agalladores (*Meloidogyne* spp.), el nematodo lesionado (*Pratylenchus brachyurus*) y nematodos que pueden afectar las partes aéreas de la soja (*Aphelenchoides besseyi*); virus e insectos contribuyen a la disminución en la producción de soja (2,3,8-11).

La enfermedad de mayor importancia socioeconómica para el cultivo de soja en Paraguay es la RAS, debido a su potencial para reducir significativamente el rendimiento, impactando negativamente la economía agrícola del país (12). El manejo de la RAS se realiza principalmente mediante la aplicación de fungicidas químicos. Sin embargo, este método de control presenta desafíos importantes, como el aumento de los costos de producción y el impacto ambiental derivado del uso intensivo de productos químicos (13).

Actualmente, el gasto para aplicar fungicidas en el control de la RAS en Paraguay varía entre 120 y 145 USD por hectárea. Al considerar la superficie total cultivada, el costo del control de la RAS puede fluctuar entre 425 y 514 millones de dólares solo durante la temporada regular de cultivo, sin incluir la "safrinha" o siembra alternativa, que sumaría otras 500 mil hectáreas al cálculo (14).

El control químico mediante fungicidas, aunque efectivo, es costoso y conlleva riesgos ambientales. Además, la aparición de poblaciones de *P. pachyrhizi*, resistentes a fungicidas, puede reducir la eficacia de estos productos, complicando aún más el manejo de la enfermedad (15). Sin embargo, el uso de fungicidas como única estrategia de control de la RAS no es sostenible a largo plazo debido a los altos costos y al impacto ambiental. Por lo tanto, es crucial desarrollar enfoques integrados que incluyan el uso de cultivares resistentes. Siendo los estudios genético-moleculares esenciales para identificar los genes de resistencia y comprender mejor las bases genéticas de esta resistencia, lo que permitirá la selección asistida por marcadores en los programas de mejoramiento del cultivo. Esta combinación de métodos puede ofrecer una solución más sostenible y económica para los agricultores (16).

Por otro lado, algunos estudios han demostrado una considerable diversidad patogénica en poblaciones de *P. pachyrhizi* en Sudamérica, incluyendo Paraguay, lo cual complica el desarrollo de variedades resistentes (17). Además, se han observado cambios en la patogenicidad de las poblaciones a lo largo de las temporadas agrícolas, lo que indica la necesidad de monitoreo continuo y análisis molecular para detectar variantes más virulentas (18). Por ello, la realización de estudios moleculares es esencial para detectar y caracterizar

poblaciones resistentes de *P. pachyrhizi*, lo que permitiría un manejo más efectivo de la RAS y la implementación de estrategias de mejoramiento genético para desarrollar cultivares resistentes.

Por lo anterior, los objetivos de este trabajo son: exponer en qué se basa el control químico de la RAS en Paraguay y resumir su evolución desde la primera aparición de la enfermedad en el país, destacar la importancia de los estudios genético-moleculares para detectar resistencia de las poblaciones de *P. pachyrhizi* a fungicidas y proponer estrategias integradas de manejo. Con este trabajo se busca proporcionar una visión comprensiva sobre el estado actual y las perspectivas futuras del manejo de la roya de la soja en Paraguay, haciendo énfasis en la necesidad de integrar métodos químicos y genético-moleculares para enfrentar esta amenaza de manera efectiva.

## **2. Materiales y Métodos**

Esta revisión se llevó a cabo mediante un análisis exhaustivo de la literatura científica relacionada con la roya de la soja en Paraguay, enfocándose en dos aspectos principales: el control químico y la importancia de los estudios genético-moleculares para la detección de poblaciones de *P. pachyrhizi* resistentes a fungicidas.

La metodología seguida para esta revisión incluyó la búsqueda y selección de literatura en bases de datos académicas y científicas como Google Scholar, PubMed y Web of Science.

Se seleccionaron estudios publicados desde el primer reporte de la RAS en Paraguay (Morel, 2001). Además, se incluyeron artículos que discutieran la epidemiología de la roya de la soja, métodos de control químico, y estudios genético-moleculares enfocados en la detección de poblaciones de *P. pachyrhizi* resistentes a fungicidas. También se consideraron estudios que abordaran la situación específica de Paraguay.

Los artículos seleccionados se revisaron minuciosamente para extraer información relevante. Se prestó especial atención a los estudios que proporcionaran datos específicos sobre Paraguay o que pudieran ser aplicables al contexto paraguayo. Posteriormente, se realizó una síntesis de la información obtenida, destacando los hallazgos más relevantes y agrupándolos en categorías temáticas.

## **3. Resultados y Discusión**

### *4.1. Roya asiática de la soja: la enfermedad*

Los primeros signos de la RAS aparecen como pequeñas lesiones de color marrón claro o grisáceo en la superficie inferior de las hojas de la soja. Estas lesiones, conocidas como pústulas o uredinios, son inicialmente pequeñas y se desarrollan a medida que avanza la infección (19).

Con el tiempo, las pústulas aumentan de tamaño y se tornan más prominentes, volviéndose de color marrón oscuro a negro. Estas pústulas se agrupan en las hojas y dan lugar a grandes manchas irregulares que pueden abarcar una gran parte del área foliar. Además, la infección provoca clorosis, que consiste en el amarillamiento de las hojas alrededor de las pústulas. Este proceso reduce la capacidad fotosintética de la planta y afecta su crecimiento y rendimiento (20).

En las etapas más avanzadas de la enfermedad, las hojas infectadas pueden presentar necrosis y eventualmente caer de la planta. La defoliación prematura es un síntoma común de la roya asiática de la soja y puede llevar a pérdidas significativas en el rendimiento del cultivo. La infección severa también puede afectar las vainas y las semillas, lo que disminuye tanto la calidad como la cantidad de la cosecha (21).

En cuanto a las pérdidas económicas, en los Estados Unidos, se estimó que las pérdidas de rendimiento debido a la roya asiática de la soja oscilaron entre el 1% y el 25%, lo que varía en función de la severidad de la enfermedad y de las condiciones locales (22). En Brasil, se ha reportado que las pérdidas pueden alcanzar hasta el 90% en años particularmente favorables para la enfermedad (23). Mientras que en Paraguay se estiman pérdidas de hasta 60% (3).

En cuanto a las condiciones ambientales sobre el desarrollo de la enfermedad, se ha visto que la humedad relativa y el período de humedad son factores determinantes para la infección y el desarrollo de la RAS. Nunkumar *et al.* (24) detallaron que la enfermedad se desarrolló de manera más severa a niveles de humedad relativa entre 85% y 100%, especialmente cuando el período de humedad duró 14 horas o más. A niveles de humedad relativa más bajos (75-80%), la severidad de la enfermedad fue menor y requirió períodos de humedad más prolongados para alcanzar niveles de infección significativos.

Por otro lado, la temperatura es un factor crucial en el desarrollo de la roya asiática de la soja, donde las pústulas se desarrollan de manera óptima a temperaturas entre 21°C y 24°C. A temperaturas extremas fuera de este rango, el desarrollo de la enfermedad se ve significativamente limitado. Por ejemplo, a 30°C, la infección no se produjo independientemente de la humedad relativa, mientras que, a 15°C y 19°C, la infección también fue limitada a niveles de humedad relativa más bajos (24).

La luz también tiene un impacto considerable en la progresión de la roya asiática de la soja. Estudios han mostrado que la radiación solar puede reducir la viabilidad de las urediniosporas, lo que disminuye la severidad de la enfermedad en las plantas expuestas a niveles altos de luz. Young *et al.* (25) demostraron que la reducción de la luz mediante estructuras de sombra (que atenuaban entre el 30% y el 60% de la luz solar) aumentó la severidad de la enfermedad

en la parte inferior del dosel de la soja, lo que evidencia la importancia de la luz en la mitigación de la enfermedad.

#### 4.2. *Phakopsora pachyrhizi*: el patógeno

*Phakopsora pachyrhizi* es un hongo biotrófico que pertenece al dominio Eukaryota, reino Fungi, filo Basidiomycota, clase Urediniomycetes, orden Uredinales, familia Phakopsoraceae y género *Phakopsora*. La especie fue descrita por primera vez por Sydow y P. Sydow (20).

Las urediniosporas, que son las estructuras de dispersión del hongo, son pequeñas esporas de forma redondeada, ligeramente equinuladas, y miden aproximadamente 21-26,3  $\mu\text{m}$  (26). Estas esporas tienen una importancia crítica en la rápida propagación y supervivencia del hongo.

La supervivencia de las urediniosporas de este patógeno depende de las condiciones ambientales en las que se desarrollen, se ha demostrado que las urediniosporas pueden permanecer viables hasta 30 días en condiciones favorables de temperatura y humedad relativa, siendo la hidratación de las esporas un factor crucial para la germinación y la infección subsecuente (27). Además, *P. pachyrhizi* prospera en un rango de temperatura de 15°C a 30°C, sin embargo, la germinación de las urediniosporas es más alta a una humedad relativa del 85% y a temperaturas entre 21°C y 24°C (24).

La capacidad de *P. pachyrhizi* para infectar las plantas de soja se debe en parte a sus características fisiológicas únicas, este hongo utiliza estructuras especializadas llamadas haustorios para penetrar y extraer nutrientes de las células del huésped. La penetración se realiza directamente a través de la cutícula de la hoja sin necesidad de entrar por las estomas, utilizando fuerza mecánica y posiblemente enzimas digestivas para atravesar las paredes celulares (28).

#### 4.3. Aparición de la roya asiática de la soja en Paraguay.

Debido a la capacidad de *P. pachyrhizi* de dispersarse rápidamente a través de las corrientes de aire mediante las urediniosporas, este hongo ha logrado alcanzar grandes distancias en poco tiempo para infectar cultivos de soja. En Estados Unidos, la roya de la soja fue reportada por primera vez en Hawái en 1994. Sin embargo, la primera epidemia en Sudamérica fue reportada el 5 de marzo de 2001 en Pirapó, Itapúa, al sur de Paraguay (19).

Durante la temporada de cosecha 2001-2002, la RAS fue encontrada en todos los campos de Paraguay, desde Encarnación (Itapúa) hasta Katueté (Canindeyú), y afectó entre el 50 y el 60% del área de producción, con pérdidas significativas de rendimiento (29). Desde entonces, las epidemias de roya han variado en intensidad cada año (3).

En un estudio realizado durante las temporadas 2007/2008 a 2009/2010, donde se evaluaron 16 genotipos diferenciales de soja, cada uno con diferentes genes Rpp (*Resistance to Phakopsora pachyrhizi*), para determinar la patogenicidad de 59 poblaciones de roya de

Argentina, Brasil y Paraguay, se demostró que existe una variación en las poblaciones de *P. pachyrhizi* que infectan la soja en América del Sur. La patogenicidad de las poblaciones de roya con el mismo origen geográfico varió entre las tres temporadas de cultivo, dentro de cada país y entre países (17). Esta diversidad genética entre los aislados del patógeno se atribuye al ciclo parasexual del patógeno (30).

#### 4.4. Manejo de la roya asiática de la soja

El manejo de la RAS abarca estrategias que disminuyen la presencia del inóculo en el entorno. Entre estas se encuentran el uso de variedades de soja resistentes y de maduración temprana (29), la monitorización y eliminación de plantas hospederas alternativas, y el cumplimiento estricto del período de vacío sanitario (31), además de la aplicación de fungicidas (32). Sin embargo, la adopción de variedades resistentes por parte de los productores paraguayos es limitada, con una tasa anual de solo 1,47 % (16). Además, la práctica de cultivar soja durante la zafriña permite que el inóculo permanezca en los campos, aumentando la probabilidad de que sobreviva hasta la próxima temporada de siembra (33).

Por otro lado, el uso de fungicidas químicos continúa siendo la estrategia más efectiva para combatir la RAS (2). En Paraguay, los fungicidas de acción específica utilizados contra la RAS en cultivos de soja son los inhibidores de la demetilación (DMI), los inhibidores de la quinona externa (QoI) y los inhibidores de la succinato deshidrogenasa (SDHI). Estos productos se comercializan en premezclas que combinan dos o tres ingredientes activos (como DMI + QoI, DMI + SDHI, QoI + SDHI o DMI + QoI + SDHI) y se aplican de forma alternada a lo largo del ciclo del cultivo, realizando entre tres y seis aplicaciones (3). Además, estos fungicidas se emplean junto con protectores multisitio como mancozeb, clorotalonil u oxiclóruo de cobre (34). Sin embargo, una desventaja del control químico es que la eficacia de los fungicidas suele disminuir a una tasa anual del 8,49 % (16).

La disminución en la efectividad del control se atribuye a que los fungicidas se enfocan en sitios específicos de reacciones bioquímicas dentro de las células fúngicas, lo que permite la selección de cepas resistentes (23). Los factores que contribuyen a esta reducción incluyen mecanismos como el eflujo (expulsión de los fungicidas fuera de la célula), la sobreexpresión de genes, la desintoxicación y mutaciones en los sitios de acción. En particular, las mutaciones puntuales en los genes objetivo son el principal medio por el cual los hongos fitopatógenos desarrollan resistencia a los fungicidas (35). Por ejemplo, los fungicidas DMI inhiben la enzima 14- $\alpha$  desmetilasa en la vía de biosíntesis del ergosterol, codificada por el gen CYP51; los fungicidas QoI interfieren con una proteína del complejo citocromo bc1-ubiquinol oxidasa, codificada por el gen mitocondrial CYTB; y los fungicidas SDHI bloquean el complejo succinato deshidrogenasa en la cadena respiratoria, codificado por los genes Sdh (13,36-38).

Por su parte, el Comité de Acción sobre la Resistencia a Fungicidas (39-41) clasifica los fungicidas DMI como de riesgo medio para el desarrollo de resistencia en patógenos, mientras que los fungicidas QoI y SDHI son considerados de alto riesgo. Por esta razón, se aconseja utilizarlos siempre en combinación con otros fungicidas que tengan diferentes modos de acción, aplicarlos de manera preventiva y evitar depender únicamente de sus propiedades curativas, ya sea de forma individual o en mezclas. Además, se recomienda limitar a dos el número de aplicaciones que contengan fungicidas SDHI por ciclo de cultivo de soja (incluyendo la siembra de entrefa), reducir la cantidad de pulverizaciones que incluyen fungicidas QoI y aplicar los DMI siguiendo estrictamente los intervalos sugeridos por los fabricantes, evitando así prolongados periodos entre aplicaciones.

#### 4.5. Evolución del control químico de la roya asiática de la soja en Paraguay

La evolución del control químico para el control de la RAS se resume en la Figura 1. Entre 2001 y 2004, durante los primeros brotes de roya asiática de la soja en Paraguay, se adoptó una estrategia de control basada en el uso de fungicidas sistémicos, donde se destacaron los DMI (como los triazoles) y los QoI (estrobilurinas), a menudo combinados en un mismo producto. Sin embargo, la eficacia de estos tratamientos disminuyó progresivamente debido al uso inadecuado y al desarrollo de resistencia por parte del patógeno. Para contrarrestar esto, en 2005 se introdujeron nuevas formulaciones que integraban dos ingredientes activos con modos de acción distintos, tales como azoxystrobina con ciproconazole, piraclostrobina con epoxiconazole, y ciproconazole con trifloxistrobina, fungicidas que lograron inicialmente un control efectivo y sostenido de la enfermedad, lo que dio lugar a una mejora de los rendimientos agrícolas (3).



**Figura 1.** Cronología y evolución del control químico contra la roya asiática de la soja en Paraguay (Elaborado por los autores).

Enciso-Maldonado *et al.* (3) mencionan que, a pesar de estos avances, la resistencia continuó aumentando, lo que llevó a la necesidad de desarrollar y registrar nuevas moléculas en 2014, como el prothioconazole (una triazolintiona) y carboxamidas como el benzovindiflupyr y el fluxapyroxad. Estos últimos se combinaron con otros fungicidas para formular productos como la mezcla de benzovindiflupyr y azoxystrobina, y el innovador trifungicida compuesto por fluxapyroxad, epoxiconazole y piraclostrobina, el primero de su tipo en Paraguay.

Investigaciones adicionales en Brasil han demostrado la disminución de la eficacia de estas nuevas formulaciones, lo que impulsó el uso de mancozeb, un fungicida multisitio, en combinación con agentes más específicos. Esta estrategia no solo mejoró el control de la enfermedad, sino que también ayudó a retrasar el desarrollo de resistencia (42). A raíz de estos resultados, desde 2016, el mancozeb se ha incluido sistemáticamente en los programas de tratamiento de la roya asiática en Paraguay, recomendándose su uso continuo a lo largo del ciclo productivo a partir de 2018, lo cual, aunque efectivo, ha elevado significativamente los costos de producción de soja (34,43).

A partir del 2018, se observaron en el mercado nuevas carboxamidas (Bixafen, Impyrfluxan y Pydiflumetofen) y fungicidas del grupo de las morfolinas (como Fenpropimorph), con el objetivo de reforzar el control de la RAS ante la disminución de eficacia de los productos anteriores (44-47). No obstante, aún persiste la necesidad de investigar si estas nuevas moléculas lograrán mantener su eficacia frente al surgimiento de poblaciones resistentes de *P. pachyrhizi*. En este contexto, es fundamental conocer y monitorear la resistencia del patógeno a los distintos modos de acción mediante diferentes métodos, por ejemplo, con la utilización de plantas diferenciales, ensayos *in vitro* con hojas desprendidas, ensayos en plantas enteras, y también, por medio de técnicas de biología molecular.

#### 4.6. Detección de poblaciones de *Phakopsora pachyrhizi* resistentes a fungicidas

Los estudios con plantas diferenciales han permitido detectar que existe una variación anual en la virulencia de *P. pachyrhizi* en Paraguay (13-14,48), lo que indica una constante adaptación y evolución del patógeno, posiblemente debido a presiones de selección como el uso de fungicidas y la introducción de variedades resistentes. Sin embargo, en Paraguay no se han realizado hasta la fecha estudios de detección de poblaciones de *P. pachyrhizi* resistentes a fungicidas. Mientras que, por medio de técnicas de biología molecular se ha podido determinar resistencia de este patógeno a fungicidas en Brasil y Estados Unidos.

La mutación SDHC-I86F es una de las principales responsables de la resistencia a los fungicidas SDHI en *P. pachyrhizi*. Esta mutación se ha identificado en poblaciones con menor sensibilidad a benzovindiflupyr y fluxapyroxad. La frecuencia de esta mutación ha aumentado

con el tiempo y ha alcanzado hasta el 50% en algunas poblaciones del patógeno en Brasil (49).

Por otro lado, las mutaciones Y131F, Y131H y K142R en el gen CYP51 se han asociado con la resistencia a DMIs, mientras que la mutación F129L en el gen CYTB está ligada a la resistencia a Qols (50). Además, se han detectado aislados con múltiples mutaciones que afectan a diferentes sitios objetivo de los fungicidas, una resistencia cruzada y múltiple. La mutación F120L+Y131H en CYP51 fue frecuente en los aislados brasileños, y la mutación I86F en SdhC también se ha encontrado, lo que incrementa los valores de EC50 para fungicidas SDHI como bixafen y benzovindiflupyr (13).

En síntesis, los resultados descritos muestran una clara evolución en el uso de fungicidas para combatir la RAS en Paraguay, así como indicios de la adaptación continua del patógeno a las distintas estrategias de control. Se observa la necesidad de profundizar en los estudios que permitan identificar a tiempo poblaciones resistentes de *P. pachyrhizi*, y de integrar enfoques complementarios (control biológico, genético y químico) para retrasar la aparición de resistencias.

#### 4.7. Consideraciones finales

*Phakopsora pachyrhizi*, causante de la roya asiática de la soja, es un patógeno de gran impacto en la agricultura mundial debido a su habilidad para evolucionar rápidamente y desarrollar resistencia a los fungicidas empleados en su control. Esta resistencia se hace evidente en las frecuentes mutaciones genéticas del hongo, como la mutación SDHC-I86F en Brasil, que reduce la sensibilidad a los fungicidas inhibidores de la succinato deshidrogenasa (SDHI), así como en otras mutaciones que comprometen la eficacia de los fungicidas inhibidores de la desmetilación (DMI) y de los inhibidores de la quinona externa (QoI). Estas mutaciones crean la necesidad de aumentar las dosis efectivas necesarias para controlar la enfermedad (50). Estos desarrollos resaltan la urgencia de implementar estrategias de manejo de resistencia efectivas, que incluyen la rotación y combinación de fungicidas con diferentes modos de acción para prolongar la efectividad de los tratamientos existentes y retrasar la aparición de nuevas resistencias (33).

Además del manejo sustentable de fungicidas, la variabilidad en la eficacia de las variedades resistentes de soja muestra que la adaptación constante del mejoramiento genético es necesaria. Ishikawa-Ishiwata y Furuya (16), a través de un modelo, establecieron tres escenarios para la soja ante futuras pandemias de RAS en la que los fungicidas se vuelven ineficaces (Escenario 1), y la adopción de cultivares resistentes a la RAS en el 33% (Escenario 2) y el 75% (Escenario 3) de las áreas cultivadas. La estimación de estos tres escenarios demuestra que la adopción de cultivares resistentes a la RAS podría reducir significativamente los costos actuales de fungicidas para los agricultores entre 112 y 253 millones de USD. Por

lo tanto, la adaptación del mejoramiento genético debe incluir la incorporación y evaluación continua de múltiples genes de resistencia para manejar cambios en la virulencia del patógeno (48). Este aspecto es crítico ya que la dinámica de la enfermedad puede variar significativamente de un año a otro, influenciada por factores ambientales y genéticos.

También, la frecuencia y momento de las aplicaciones de fungicidas es un desafío, especialmente en Paraguay donde la eficacia del control químico varía según la presión del inóculo y las condiciones climáticas (3). El manejo basado únicamente en las fases fenológicas del cultivo ha demostrado ser insuficiente, como lo indican las variaciones en la aparición anual de uredosporas, que en algunos años aparecen mucho antes de lo esperado, lo que disminuye la eficacia de los fungicidas aplicados (51, 52). Esto subraya la necesidad de un monitoreo más riguroso y basado en evidencia científica que permita ajustar las prácticas de manejo a las condiciones reales del campo (3).

El contexto genético-molecular de detección de resistencia en las poblaciones de *P. pachyrhizi* es también crucial para entender y prevenir la resistencia a fungicidas. Estudios limitados en Paraguay han dejado un vacío en el conocimiento que es necesario. La evaluación de la sensibilidad de las poblaciones de *P. pachyrhizi* a fungicidas es crucial para ajustar las recomendaciones de manejo, asegurar el control eficaz de la enfermedad y garantizar la sostenibilidad de la producción de soja (27). Cabe resaltar que, el manejo químico de la RAS en Paraguay ha tenido que adaptarse con la retirada de algunos fungicidas del mercado y la introducción de nuevos productos, lo cual refleja los desafíos continuos en el control efectivo de la enfermedad (3).

La importancia económica de la roya asiática de la soja en Paraguay justifica la creación de una red nacional de monitoreo que evalúe la eficacia de los fungicidas y la presión de inóculo en diferentes áreas geográficas a nivel de campo y laboratorio. Esto no solo ayudaría a mitigar las fallas en el control observadas en las parcelas de los productores, sino que también permitiría un mejor posicionamiento de los fungicidas en el mercado, previniendo el desarrollo acelerado de resistencia en las poblaciones de *P. pachyrhizi*.

Finalmente, la capacidad de este hongo para propagarse de manera rápida y eficaz a través de sus urediniosporas transportadas por el viento ha impulsado el desarrollo de nuevas estrategias de manejo que deben aplicarse en un contexto biorracional (es decir, con un uso racional de fungicidas y una perspectiva que minimice el impacto ambiental). Algunas de estas estrategias incluyen el empleo de agentes de control biológico (hongos y bacterias) que promueven el crecimiento vegetal y estimulan defensas naturales en las plantas (53), así como la implementación de sistemas de predicción —como DigiFarmz y Smart Soil PY, ya establecidos en Paraguay— para monitorear de manera continua al patógeno y anticiparse a posibles epidemias (2).

#### 4. Conclusiones

El manejo de la RAS en Paraguay ha evolucionado significativamente desde la detección inicial de la enfermedad. Los fungicidas han sido la columna vertebral del control químico, a pesar de la emergencia de cepas resistentes que desafían las estrategias actuales. La adaptación de estos métodos ha sido crucial, y el empleo de pre-mezclas que combinan múltiples modos de acción de fungicidas ha mostrado ser un enfoque eficaz para retrasar la resistencia.

El papel de la investigación genético-molecular es indispensable, no solo para detectar y caracterizar la resistencia, sino también para guiar las decisiones de manejo y el desarrollo de cultivares de soja con resistencia genética. La detección temprana y precisa de variantes resistentes a fungicidas permite ajustar las prácticas de manejo de manera proactiva, optimizando el uso de fungicidas y reduciendo la probabilidad de fallos en el control.

Finalmente, la propuesta de un enfoque integrado que combina estrategias de control químico, biológico y genético refleja la necesidad de un manejo más sostenible y menos dependiente de los fungicidas. El fortalecimiento de redes nacionales de monitoreo y la adopción de sistemas predictivos avanzados pueden facilitar una respuesta rápida y efectiva frente a la dinámica cambiante de las enfermedades, garantizando así la sostenibilidad a largo plazo de la producción de soja en Paraguay. Esta integración de métodos promete no solo mitigar el impacto de la RAS, sino también mejorar la resiliencia del sistema agrícola frente a futuras amenazas fitosanitarias.

**Contribución de los autores:** Concepción del trabajo, D.I.H.-B. y G.A.E.-M.; diseño de la metodología, M.M.-O., L.N.T.-S. y G.A.E.-M.; redacción, preparación del manuscrito, visualización y edición, M.M.-O., D.M.Z., D.L.G.-Z., L.N.T.-S. y G.A.E.-M.; supervisión, D.I.H.-B.

**Conflicto de interés:** Los autores declaran que no existe ningún conflicto de interés con respecto a la publicación de este artículo.

**Agradecimientos:** Esta revisión fue escrita dentro del marco del proyecto “PINV18 - 1116 Mecanismos de resistencia de aislados de la roya de la soja al tebuconazole”, cofinanciado por el CONACYT.

#### Bibliografía

1. CÁMARA PARAGUAYA DE EXPORTADORES Y COMERCIALIZADORES DE CEREALES Y OLEAGINOSAS. Área de Siembra, Producción y Rendimiento [en línea]. 2024. Disponible en: <https://capeco.org.py/area-de-siembra-produccion-y-rendimiento/>

2. CABALLERO-MAIRESSE, G. G., MENDES, F. H., ARRUA, A. A., LOPEZ-NICORA, H. D., & ENCISO-MALDONADO, G. A. Percepción de agricultores sobre el manejo de enfermedades fúngicas de la soja (*Glycine max* (L.) Merr.) en Paraguay. *Agronomía Mesoamericana* [en línea]. 2024. Vol. 35, no. 1.
3. ENCISO-MALDONADO, G. A., SANABRIA-VELÁZQUEZ, A. D., SCHLICKMANN-TANK, J. A., & MAIDANA-OJEDA, M. Una carrera contra la pérdida de la eficacia de fungicidas: 20 años de manejo de la roya asiática de la soja en Paraguay. *Investigaciones y Estudios UNA* [en línea]. 2021. Vol. 12, no. 2, p. 59-61.
4. MAIDANA-OJEDA, M., VARGAS-BRITEZ, S., FIN-MIERES, M. B., & ENCISO-MALDONADO, G. A. Influence of the source/sink relationship on green stem syndrome in soybean. *Revista Fitotecnia Mexicana* [en línea]. 2021. Vol. 44, no. 3, p. 465-470.
5. ENGELS, C., RODRIGUES, F. A., FERREIRA, A. D. O., INAGAKI, T. M., & NEPOMUCENO, A. L. Drought effects on soybean cultivation—A review. *Annual Research & Review in Biology* [en línea]. 2017. Vol. 16, no. 1, p. 1-13.
6. FRAISSE, C. W., CABRERA, V. E., BREUER, N. E., BAEZ, J., QUISPE, J., & MATOS, E. El Niño—southern oscillation influences on soybean yields in Eastern Paraguay. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society* [en línea]. 2008. Vol. 28, no. 10, p. 1399-1407.
7. JUMRANI, K., & BHATIA, V. S. Identification of drought tolerant genotypes using physiological traits in soybean. *Physiology and Molecular Biology of Plants* [en línea]. 2019. Vol. 25, no. 3, p. 697-711.
8. ARRUA, A. A., LOPEZ-NICORA, H. D., FERNÁNDEZ RÍOS, D., GRABOWSKI, C. J., CAZAL-MARTÍNEZ, C. C., & KOHLI, M. M. El impacto de las enfermedades fúngicas en el cultivo de soja (*Glycine max*) en Paraguay: ¿es posible estimar las pérdidas? *Investigaciones y Estudios-UNA* [en línea]. 2021. Vol. 12, no. 1, p. 34-46.
9. MAIDANA-OJEDA, M., SOSA-GERKE, J. C., BOGADO-GONZÁLEZ, C. E., FERNANDEZ-GAMARRA, M. A., SANABRIA-VELAZQUEZ, A. D., LOPEZ-NICORA, H. D., & ENCISO-MALDONADO, G. A. Cuantificación de inóculo de *Macrophomina phaseolina* (Tassi) Goid en parcelas de soja del Departamento de Itapúa-Paraguay. *Investigaciones y Estudios-UNA* [en línea]. 2020. Vol. 11, no. 2, p. 69-77.
10. ENCISO-MALDONADO, G. A., & FERNÁNDEZ-GAMARRA, M. A. *Cercospora kikuchii* ¿patógeno potencial de la soja? Impacto [en línea]. 2021b. Vol. 1, no. 1, p. 69-72.
11. ENCISO-MALDONADO, G. A., & FERNÁNDEZ-GAMARRA, M. A. Presencia de la mancha anillada de la soja en el Departamento de Canindeyú. *Campo Agropecuario* [en línea]. 2021a. Disponible en: <https://www.campoagropecuario.com.py/notas/2121/presencia-de-la-mancha-anillada-de-la-soja-en-el-departamento-de-canindeyu>
12. HARTMAN, G. L., RUPE, J. C., SIKORA, E. J., DOMIER, L. L., DAVIS, J. A., & STEFFEY, K. L. (Eds.). *Compendium of soybean diseases and pests.* (5th ed.). The American Phytopathological Society [en línea]. 2015.

13. MÜLLER, M. A., STAMMLER, G., & DE MIO, L. L. M. Multiple resistance to DMI, QoI and SDHI fungicides in field isolates of *Phakopsora pachyrhizi*. *Crop Protection* [en línea]. 2021. Vol. 145, p. 105618. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2021.105618>
14. ENCISO-MALDONADO, G., SANABRIA-VELÁZQUEZ, A., FERNÁNDEZ-RIQUELME, F., DÍAZ-NÁJERA, J., FERNÁNDEZ-SALINAS, P., & LUGO-PEREIRA, W. Soybean yield components at different densities and planting seasons in Paraguay. *Agronomía Colombiana* [en línea]. 2021. Vol. 39, no. 1, p. 12-21.
15. SAÇON, D., NETTO, A., FOCHESTATTO, M., STEFANSKI, F. S., GALLINA, A., MILANESI, P. M., & BORGES, L. L. Integration between genetic and chemical control on the progress of Asian soybean rust and yield. *Summa Phytopathologica* [en línea]. 2020. Vol. 46, p. 198-204.
16. ISHIKAWA-ISHIWATA, Y., & FURUYA, J. Fungicide cost reduction with soybean rust-resistant cultivars in Paraguay: A supply and demand approach. *Sustainability* [en línea]. 2021. Vol. 13, no. 2, p. 887.
17. AKAMATSU, H., YAMANAKA, N., YAMAOKA, Y., SOARES, R. M., MOREL, W., IVANCOVICH, A. J. G., ... & SUENAGA, K. Pathogenic diversity of soybean rust in Argentina, Brazil, and Paraguay. *Journal of General Plant Pathology* [en línea]. 2013. Vol. 79, p. 28-40.
18. AKAMATSU, H., YAMANAKA, N., SOARES, R. M., IVANCOVICH, A. J. G., LAVILLA, M. A., BOGADO, A. N., ... & KATO, M. Pathogenic variation of South American *Phakopsora pachyrhizi* populations isolated from soybeans from 2010 to 2015. *Japan Agricultural Research Quarterly: JARQ* [en línea]. 2017. Vol. 51, no. 3, p. 221-232.
19. SCHNEIDER, R. W., HOLLIER, C. A., WHITAM, H. K., PALM, M. E., MCKEMY, J. M., HERNANDEZ, J. R., ... & DEVRIES-PATERSON, R. First report of soybean rust caused by *Phakopsora pachyrhizi* in the continental United States. *Plant Disease* [en línea]. 2005. Vol. 89, no. 7, p. 774.
20. GOELLNER, K., LOEHRER, M., LANGENBACH, C., CONRATH, U. W. E., KOCH, E., & SCHAFFRATH, U. *Phakopsora pachyrhizi*, the causal agent of Asian soybean rust. *Molecular Plant Pathology* [en línea]. 2010. Vol. 11, no. 2, p. 169-177.
21. FURLANETTO, R. H., NANNI, M. R., MIZUNO, M. S., CRUSIOL, L. G. T., & DA SILVA, C. R. Identification and classification of Asian soybean rust using leaf-based hyperspectral reflectance. *International Journal of Remote Sensing* [en línea]. 2021. Vol. 42, no. 11, p. 4177-4198.
22. BEKKERMAN, A., GOODWIN, B. K., & PIGGOTT, N. E. Spatio-temporal risk and severity analysis of soybean rust in the United States. *Journal of Agricultural and Resource Economics* [en línea]. 2008. p. 311-331.
23. GODOY, C. V., SEIXAS, C. D. S., SOARES, R. M., MARCELINO-GUIMARÃES, F. C., MEYER, M. C., & COSTAMILAN, L. M. Asian soybean rust in Brazil: past, present, and future. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* [en línea]. 2016. Vol. 51, no. 05, p. 407-421.
24. NUNKUMAR, A., CALDWELL, P. M., & PRETORIUS, Z. A. Development of *Phakopsora pachyrhizi* on soybean at controlled temperature, relative humidity, and moisture periods. *South African Journal of Plant and Soil* [en línea]. 2009. Vol. 26, no. 4, p. 225-230.

Haupenthal-Berwanger, D. I.; Maidana-Ojeda, M.; Zimmer, D. M.; Gallas Zaracho, D. L.; Talavera-Stefani, L. N.; Enciso-Maldonado, G. A. Royas de la soja en Paraguay: una revisión sobre el control químico y la importancia de estudios genético-moleculares para detectar poblaciones resistentes.

25. YOUNG, H. M., GEORGE, S., NARVÁEZ, D. F., SRIVASTAVA, P., SCHUERGER, A. C., WRIGHT, D. L., & MAROIS, J. J. Effect of solar radiation on severity of soybean rust. *Phytopathology* [en línea]. 2012. Vol. 102, no. 8, p. 794-803.
26. STEWART, S., GUILLIN, E. A., & DÍAZ, L. First report of soybean rust caused by *Phakopsora pachyrhizi* in Uruguay. *Plant Disease* [en línea]. 2005. Vol. 89, no. 8, p. 909-909.
27. TWIZEYIMANA, M., & HARTMAN, G. Sensitivity of *Phakopsora pachyrhizi* isolates to fungicides and reduction of fungal infection based on fungicide and timing of application. *Plant Disease* [en línea]. 2017. Vol. 101, no. 1, p. 121-128. Disponible en: [https://consensus.app/papers/sensitivity-phakopsora-pachyrhizi-isolates-fungicides-twizeyimana/1d37da42d3eb55fa8c5ea8d8337be1aa/?utm\\_source=chatgpt](https://consensus.app/papers/sensitivity-phakopsora-pachyrhizi-isolates-fungicides-twizeyimana/1d37da42d3eb55fa8c5ea8d8337be1aa/?utm_source=chatgpt) DOI 10.1094/PDIS-04-16-0552-RE.
28. EDWARDS, H. H., & BONDE, M. R. Penetration and establishment of *Phakopsora pachyrhizi* in soybean leaves as observed by transmission electron microscopy. *Phytopathology* [en línea]. 2011. Vol. 101, no. 7, p. 894-900.
29. YORINORI, J. T., PAIVA, W. M., FREDERICK, R. D., COSTAMILAN, L. M., BERTAGNOLLI, P. F., HARTMAN, G. E., ... & NUNES JR, J. Epidemics of soybean rust (*Phakopsora pachyrhizi*) in Brazil and Paraguay from 2001 to 2003. *Plant Disease* [en línea]. 2005. Vol. 89, no. 6, p. 675-677.
30. VITTAL, R. Detection of viable urediniospores, morphological characterization in resistant and susceptible genotypes, and germ tube anastomosis of *Phakopsora pachyrhizi*. University of Illinois at Urbana-Champaign [en línea]. 2012.
31. XAVIER, S. A., CANTERI, M. G., BARROS, D., & GODOY, C. V. Sensitivity of *Corynespora cassiicola* from soybean to carbendazim and prothioconazole. *Tropical Plant Pathology* [en línea]. 2013. Vol. 38, no. 5, p. 431-435.
32. LANGENBACH, C., CAMPE, R., BEYER, S. F., MUELLER, A. N., & CONRATH, U. Fighting Asian soybean rust. *Frontiers in Plant Science* [en línea]. 2016. Vol. 7, Art. 797.
33. ENCISO-MALDONADO, G. A., NÚÑEZ-RAMÍREZ, R. A., MONTOYA-GARCÍA, C. O., SCHLICKMANN-TANK, J. A., MAIDANA-OJEDA, M., MENDOZA-DUARTE, M. J., ... & SANABRIA-VELÁZQUEZ, A. D. Efecto de la época de siembra y diferentes programas de aplicación de fungicidas sobre la severidad de la roya asiática de la soja. *Investigaciones y Estudios-UNA* [en línea]. 2022. Vol. 13, no. 2, p. 37-48.
34. MENDOZA-DUARTE, M. J., MELGAREJO-ARRUA, M., SCHLICKMANN-TANK, J. A., CABALLERO-MAIRESSE, G. G., & ENCISO-MALDONADO, G. A. Efecto de mezclas de fungicidas sitio-específicos combinados con mancozeb en el control de la roya de la soja en el noreste de Paraguay. *Summa Phytopathologica* [en línea]. 2023. Vol. 49, p. e264911.
35. HOLLOMON, D. W. Fungicide resistance: facing the challenge. *Plant Protection Science* [en línea]. 2015. Vol. 51, no. 4.
36. GISI, U., CHIN, K. M., KNAPPOVA, G., FÄRBER, R. K., MOHR, U., PARISI, S., SIEROTZKI, H., & STEINFELD, U. Recent developments in elucidating modes of resistance to phenylamide,

- DMI, and strobilurin fungicides. *Crop Protection* [en línea]. 2000. Vol. 19, no. 8-10, p. 863-872. DOI 10.1016/S0261-2194(00)00114-9.
37. GISI, U. Chemical control of downy mildews. *Advances in Downy Mildew Research* [en línea]. 2002. p. 119-159.
38. GRASSO, V., PALERMO, S., SIEROTZKI, H., GARIBALDI, A., & GISI, U. Cytochrome b gene structure and consequences for resistance to Qo inhibitor fungicides in plant pathogens. *Pest Management Science: formerly Pesticide Science* [en línea]. 2006. Vol. 62, no. 6, p. 465-472. DOI 10.1002/ps.1236.
39. FUNGICIDE RESISTANCE ACTION COMMITTEE. (FRAC). Protocol of the discussions and recommendations of the SBI Working Group of the Fungicide Resistance Action Committee (FRAC) [en línea]. 2024a. Retrieved Oct 17, 2024: [https://www.frac.info/docs/default-source/working-groups/sbi-fungicides/group/minutes-of-the-2024-sbi-meeting-recommendations-for-2024-from-jan-19th-and-march-21st-2024.pdf?sfvrsn=bec24e9a\\_2](https://www.frac.info/docs/default-source/working-groups/sbi-fungicides/group/minutes-of-the-2024-sbi-meeting-recommendations-for-2024-from-jan-19th-and-march-21st-2024.pdf?sfvrsn=bec24e9a_2)
40. FUNGICIDE RESISTANCE ACTION COMMITTEE. (FRAC). Protocol of the discussions and use recommendations of the QoI Working Group of the Fungicide Resistance Action Committee (FRAC) [en línea]. 2024b. Retrieved Oct 17, 2024: [https://www.frac.info/docs/default-source/working-groups/qoi-fungicides/qoi-meeting-minutes/2024-qoi-wg-meeting-minutes-and-recommendations-17jan2024-and-24mar2024.pdf?sfvrsn=d4ec4e9a\\_2](https://www.frac.info/docs/default-source/working-groups/qoi-fungicides/qoi-meeting-minutes/2024-qoi-wg-meeting-minutes-and-recommendations-17jan2024-and-24mar2024.pdf?sfvrsn=d4ec4e9a_2)
41. FUNGICIDE RESISTANCE ACTION COMMITTEE. (FRAC). Protocol of the discussions and use recommendations of the SDHI Working Group of the Fungicide Resistance Action Committee (FRAC) [en línea]. 2024c. Retrieved Oct 17, 2024: [https://www.frac.info/docs/default-source/working-groups/sdhi-fungicides/sdhi-meeting-minutes/minutes-of-the-2024-sdhi-meeting-with-recommendations-for-2024-from-16-17th-jan-and-22nd-march-2024.pdf?sfvrsn=7ceb4e9a\\_2](https://www.frac.info/docs/default-source/working-groups/sdhi-fungicides/sdhi-meeting-minutes/minutes-of-the-2024-sdhi-meeting-with-recommendations-for-2024-from-16-17th-jan-and-22nd-march-2024.pdf?sfvrsn=7ceb4e9a_2)
42. SILVA, L. H. C. P. D., CAMPOS, H. D., SILVA, J. R. C., & REIS, E. M. Control of Asian soybean rust with mancozeb, a multi-site fungicide. *Summa Phytopathologica* [en línea]. 2015. Vol. 41, p. 64-67.
43. ENCISO-MALDONADO, G. A., MAIDANA-OJEDA, M., SCHLICKMANN-TANK, J. A., MONTOYA-GARCÍA, C. O., PÁEZ-RANONI, H. J., FERNÁNDEZ-RIQUELME, F., & DOMÍNGUEZ-SANABRIA, J. A. Fungicidas sitio-específicos combinados con Mancozeb para el control de la roya asiática de la soja. *Revista Mexicana de Fitopatología, Mexican Journal of Phytopathology* [en línea]. 2019. Vol. 37, no. 1, p. 1903-3.
44. BARRO, J. P., ALVES, K. S., GODOY, C. V., DIAS, A. R., FORCELINI, C. A., UTIAMADA, C. M., ... & DEL PONTE, E. M. Temporal and regional performance of dual and triple premixes for soybean rust management in Brazil: A meta-analysis update. *Journal name missing* [online] 2021.
45. CHECHI, A., GHISSI-MAZETTI, V. C., ZUCHELLI, E., DEUNER, C. C., FORCELINI, C. A., & BOLLER, W. In vivo sensitivity of *Phakopsora pachyrhizi* to fungicides. *Ciência Rural* [en línea]. 2019. Vol. 50, no. e20190593.

46. JULIATTI, F. C., & ZAMBOLIM, L. Etiology, Epidemiology and Management of Asian Soybean Rust (ASR) in Brazil and Vulnerability of Chemical Control of Specific without Multisite Fungicides. In *Cereal Grains—Volume 1*. IntechOpen [en línea]. 2021.
47. NEVES, D. L., & BRADLEY, C. A. Baseline sensitivity of *Cercospora sojina* and *Corynespora cassiicola* to pydiflumetofen. *Crop Protection* [en línea]. 2021. Vol. 147, p. 105461.
48. SCHOLZ, R., FERNÁNDEZ GAMARRA, M. A., VARGAS, M. J., & YAMANAKA, N. Yearly changes in virulence of *Phakopsora pachyrhizi* isolates in Paraguay. *Tropical Plant Pathology* [en línea]. 2024. Vol. 1-8. DOI 10.1007/s40858-024-00639-3.
49. DE MELLO, F. D., MATHIONI, S. M., FANTIN, L. H., ROSA, D. D., DESJARDINS ANTUNES, R. F., CHAGAS FILHO, N. R., DUVARESCH, D. L., & CANTERI, M. Sensitivity assessment and SDHC-I86F mutation frequency of *Phakopsora pachyrhizi* populations to benzovindiflupyr and fluxapyroxad fungicides from 2015 to 2019 in Brazil. *Pest Management Science* [en línea]. 2021. DOI 10.1002/ps.6466.
50. SCHMITZ, H. K., MEDEIROS, C., CRAIG, I. R., & STAMMLER, G. Sensitivity of *Phakopsora pachyrhizi* towards quinone-outside-inhibitors and demethylation-inhibitors, and corresponding resistance mechanisms. *Pest Management Science* [en línea]. 2014. Vol. 70, no. 3, p. 378-388.
51. REIS, E. M., ZAMBOLIN, L., & GUERRA, W. Directional Selection of *Phakopsora pachyrhizi* Towards Site-Specific Fungicides in Mato Grosso State. *The Journal of Agricultural Science* [en línea]. 2021. Vol. 13, no. 100. Disponible en: [https://consensus.app/papers/selection-phakopsora-pachyrhizi-towards-sitespecific-reis/3065ce0f164c589b9d921ade09540e4e/?utm\\_source=chatgpt](https://consensus.app/papers/selection-phakopsora-pachyrhizi-towards-sitespecific-reis/3065ce0f164c589b9d921ade09540e4e/?utm_source=chatgpt) DOI 10.5539/JAS.V13N6P100.
52. MENDOZA-DUARTE, M. J., ZARZA-CABRERA, A. C., DÍAZ, O. R. A. R., ARRUA, A. A., FERNÁNDEZ-GAMARRA, M. A., LOPEZ-NICORA, H. D., & MALDONADO, G. A. E. Sequential application of fungicides with different modes of action for the control of soybean diseases in Canindeyú, Paraguay. *AgriScientia*. 2024. Vol 41, no. 2, p. 37-49. <https://doi.org/10.31047/1668.298x.v41.n2.44095>
53. MARCHUK-LARREA, C. N., BENITEZ-RODAS, G.A., SANDOVAL-ESPINOLA, W.J., ARRÚA-ALVARENGA, P. D., LÓPEZ-NICORA, H. D., ENCISO-MALDONADO, G. A., QUINTANA, S. A., FERNÁNDEZ-RÍOS, D., & ARRÚA, A. A. *Trichoderma* como agente biocontrolador- en foco. *Revista de la Sociedad Científica del Paraguay*. Vol 29, no. 1. p. 137-171. <https://doi.org/10.32480/rscp.2024.29.1.137>