



Universidad Católica de Cuyo

Facultad Don Bosco de Enología y

Ciencias de la Alimentación

Licenciatura en Tecnología de los Alimentos

Alumno: Tobías Esteban Serrano Carleti

Docente Tutor: Esp. Lic. Damián Sánchez

Docente de Revisión Formal: Mgter. Ing. Elena Caliguli

Sede Rodeo del Medio, Mendoza, 2026

Detección y evaluación de principios activos de plaguicidas en uvas para vinificación de Mendoza

DEFENSA ORAL

LUGAR: Mendoza, Rodeo del Medio

FECHA: ____/____/____

LIBRO N° _____ FOLIO N° _____

ACTA N° _____

CALIFICACIÓN _____

FIRMAS TRIBUNAL EXAMINADOR

Índice General

Dedicatoria	8
AGRADECIMIENTOS.....	9
Resumen.....	10
Abstract	12
INTRODUCCIÓN	14
Contexto de la viticultura en Mendoza	14
Importancia de la seguridad alimentaria y calidad agroindustrial	15
Brecha de conocimiento y justificación del estudio	16
Objetivos del estudio	17
Hipótesis	18
Capítulo I: Generalidades de la Vitivinicultura.....	19
1.1 Historia y evolución de la vitivinicultura argentina	19
1.2 Estadísticas de superficie cultivada y principales variedades	21
1.3 Estadísticas de litros elaborados de vino y su comercialización	22
1.4 Exigencias internacionales respecto a tolerancias en contenido de pesticidas	23
Capítulo II: Pesticidas en la Vitivinicultura	26
2.1 Uso de plaguicidas en el manejo fitosanitario de la vid	26
2.1.1 Persistencia ambiental, degradación y presencia de residuos.....	27
2.1.2 Riesgos para la salud humana y el medio ambiente	29
2.1.3 Importancia de los límites máximos de residuos en vitivinicultura	30
2.2 Principios activos seleccionados para el estudio: descripción, características y usos	31
2.3 Otras alternativas al empleo de pesticidas convencionales	36

Capítulo III: Regulaciones respecto a pesticidas en alimentos 38

3.1 Legislación y regulación internacional sobre residuos de pesticidas seleccionados	38
3.1.1 Normativa en Argentina (SENASA).....	39
3.1.2 Normativa en la Unión Europea, Estados Unidos y Codex Alimentarius	40
3.1.3 Otros destinos de interés: Chile, Brasil, Reino Unido y Canadá	44
3.2 Procedimientos y métodos de control de residuos de pesticidas	46
3.3 Importancia del cumplimiento de las normativas para la exportación de vinos.....	48

Capítulo IV: Técnicas Analíticas Aplicadas..... 50

4.1 Técnicas de Análisis de Residuos de Plaguicidas	50
4.1.1 Cromatografía de Gases (GC)	51
4.1.2 Cromatografía Líquida de Alta Resolución (HPLC)	52
4.2 Validación de Métodos Analíticos	53
4.3 Importancia de las Técnicas Analíticas en la Seguridad Alimentaria.....	55

Capítulo V: Materiales y Métodos 57

5.1 Tipo de Investigación: Aplicada y Cuantitativa	57
5.2 Diseño Experimental	57
5.2.1 Selección de viñedos	58
5.2.2 Variables del estudio	58
5.3 Protocolo de Muestreo.....	59
5.4 Transporte, Acondicionamiento y Almacenamiento de Muestras	60
5.5 Equipamiento y Laboratorio	61
5.5.1 Condiciones cromatográficas	62
5.5.2 Validación analítica	63

5.6 Análisis de Residuos de Pesticidas (GC y HPLC).....	63
5.7 Análisis Estadístico.....	64
Capítulo VI: Resultados y Discusión	67
6.1 Presentación de los datos obtenidos	67
6.1.1 Concentraciones de pesticidas en las muestras analizadas	67
6.1.2 Comparación con los límites máximos de residuos (LMR)	69
6.2 Análisis e interpretación de los resultados	72
6.2.1 Evaluación del cumplimiento de las normativas	73
6.2.2 Identificación de patrones según zonas de producción	73
6.3 Discusión sobre los hallazgos.....	76
6.3.1 Comparación con antecedentes científicos	77
6.3.2 Relación entre prácticas agrícolas y residuos detectados	78
6.3.3 Implicancias para la exportación de vinos	79
Capítulo VII: Conclusiones.....	82
7.1 Cumplimiento de los objetivos del estudio	82
7.2 Resumen de los principales hallazgos.....	83
7.3 Impacto del estudio en la viticultura de Mendoza.....	84
7.4 Recomendaciones para el sector vitivinícola	85
7.5 Limitaciones del estudio	87
Índice de Figuras	89
Índice de Tablas	90
ANEXOS.....	91
Anexo 1: Glosario de Términos Técnicos	91

Anexo 2: Formulario de Recolección de Datos	91
Referencias Bibliográficas	92

Dedicatoria

"A mis padres, quienes me dieron la oportunidad de estudiar y desarrollarme profesionalmente, les dedico esta tesis con profundo amor y agradecimiento. Este logro es el resultado de un largo camino recorrido, posible solo gracias a su apoyo incondicional y su sacrificio constante. También quiero dedicarle este trabajo final a la profesora Lic. Estela Jaime a quien siempre recordaré con un gran cariño y le deseo un eterno descanso en paz"

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por guiarme en las decisiones importantes de mi vida y por darme la fuerza para seguir adelante, incluso en momentos de incertidumbre. Agradezco profundamente a mi familia, por su apoyo incondicional para poder tener un título universitario, y también a todas las personas que forman parte de esta institución, quienes dejaron huellas imborrables en mí y contribuyeron a mi formación tanto profesional como personal. Quiero agradecerle también a Damián Sánchez, quien me ayudó y me guió para terminar mi trabajo final.

Resumen

La vitivinicultura mendocina constituye un eje estratégico de la agroindustria argentina, destacándose por su volumen de producción y su creciente inserción en mercados internacionales altamente regulados. En este contexto, el cumplimiento de las normativas sobre residuos de pesticidas resulta indispensable para garantizar la inocuidad y la calidad de los productos derivados de la vid. El presente trabajo tuvo como objetivo evaluar la presencia de residuos de plaguicidas en uvas de vinificación de Mendoza, focalizando el análisis en principios activos de interés fitosanitario, analítico y regulatorio: dimetoato, ometoato, benomilo-carbendazima y tiofanato-metilo, seleccionados por su utilización histórica, su posible presencia como residuos o metabolitos y las restricciones regulatorias existentes en distintos mercados. Se realizó una investigación aplicada, de enfoque cuantitativo, que incluyó el análisis de 40 muestras recolectadas en tres zonas vitivinícolas clave de la provincia: Valle de Uco, Luján de Cuyo y Maipú. Las muestras fueron procesadas y analizadas mediante cromatografía líquida acoplada a espectrometría de masas (HPLC-MS/MS), según lo informado por el laboratorio actuante, comparando los resultados con los límites máximos de residuos (LMRs) establecidos por normativas nacionales e internacionales. Los resultados mostraron que el 25 % de las muestras presentaron residuos detectables. Entre ellas, dos muestras (5 % del total) registraron concentraciones de ometoato superiores al valor de referencia de 0,010 mg/kg establecido en distintos marcos regulatorios, constituyendo los principales puntos críticos del estudio. Asimismo, la presencia de dimetoato y ometoato, aun en concentraciones bajas, adquiere relevancia comercial en aquellos destinos donde no existe un LMR específico para uva o donde estos principios activos presentan restricciones regulatorias. Se observó una mayor proporción de detecciones en la

zona de Maipú respecto de Luján de Cuyo y Valle de Uco, aunque la prueba de Kruskal-Wallis no encontró diferencias estadísticamente significativas entre zonas ($p > 0,05$). La presencia de carbendazima/benomilo se detectó en una única muestra, en una concentración baja, mientras que no se hallaron residuos cuantificables de tiofanato-metilo. Estos hallazgos evidencian un cumplimiento mayoritario respecto de los criterios evaluados, aunque señalan puntos críticos que deben interpretarse según el destino comercial considerado. Se concluye que es necesario fortalecer el monitoreo de residuos, ajustar los períodos de carencia y fomentar prácticas sostenibles, como el manejo integrado de plagas (MIP), junto con el uso de técnicas analíticas avanzadas que aseguren la calidad, inocuidad y trazabilidad de los productos vitivinícolas.

Palabras clave: vitivinicultura, residuos de pesticidas, límites máximos de residuos, cromatografía, seguridad alimentaria.

Abstract

The wine industry in Mendoza represents a strategic pillar of Argentina's agri-food sector, standing out for its production volume and its growing presence in highly regulated international markets. In this context, compliance with pesticide residue regulations is essential to ensure the safety and quality of grape-derived products. This study aimed to evaluate the presence of pesticide residues in wine grapes from Mendoza, focusing on active ingredients of phytosanitary, analytical, and regulatory interest: dimethoate, omethoate, benomyl-carbendazim, and thiophanate-methyl, selected due to their historical use, potential occurrence as residues or metabolites, and regulatory restrictions in different markets. An applied quantitative approach was employed, including the analysis of 40 samples collected from three key wine-producing regions of Mendoza: Valle de Uco, Luján de Cuyo, and Maipú. Samples were processed and analyzed using liquid chromatography coupled with tandem mass spectrometry (HPLC-MS/MS), as reported by the laboratory involved, and the results were compared with the maximum residue limits (MRLs) established by national and international regulations. The results showed that 25% of the samples contained detectable residues. Among them, two samples (5% of the total) showed omethoate concentrations above the reference value of 0.010 mg/kg established in different regulatory frameworks, representing the main critical points of the study. Likewise, the presence of dimethoate and omethoate, even at low concentrations, becomes commercially relevant in destinations where no specific MRL is established for grapes or where these active ingredients are subject to regulatory restrictions. A higher proportion of detections was observed in the Maipú zone compared with Luján de Cuyo and Valle de Uco, although the Kruskal-Wallis test found no statistically significant differences between zones ($p > 0.05$). Benomyl-carbendazim was detected

in only one sample, at a low concentration, while no quantifiable residues of thiophanate-methyl were found. These findings indicate overall compliance with the criteria evaluated, although they also highlight critical points that must be interpreted according to the intended commercial destination. In conclusion, strengthened residue monitoring, adjusted pre-harvest intervals, and the promotion of sustainable practices such as Integrated Pest Management (IPM), together with the use of advanced analytical techniques, are necessary to ensure the quality, safety, and traceability of wine products.

Keywords: viticulture, pesticide residues, maximum residue limits, chromatography, food safety.

INTRODUCCIÓN

Contexto de la viticultura en Mendoza

La vitivinicultura constituye una de las actividades agroindustriales más relevantes de la provincia de Mendoza y representa un componente central de la identidad productiva, económica y cultural de la región. Según el Instituto Nacional de Vitivinicultura, al 31 de diciembre de 2024 la superficie total implantada con vid en Argentina fue de 199.946 ha, distribuidas en 22.039 viñedos. Dentro de este escenario, Mendoza se posiciona como la principal provincia vitivinícola del país, con 142.785 ha cultivadas y 14.593 viñedos, lo que representa el 71,4 % de la superficie vitícola nacional (Instituto Nacional de Vitivinicultura [INV], 2025).

La importancia de Mendoza dentro del sector se explica no solo por la extensión de su superficie cultivada, sino también por la aptitud enológica de sus variedades. En la provincia, el 98,5 % de la superficie implantada corresponde a uvas aptas para elaboración de vinos y mostos, con predominio de variedades tintas, entre las que se destaca el Malbec como la variedad más cultivada (INV, 2025). Estas características consolidan a Mendoza como una región estratégica para la producción de vinos destinados tanto al mercado interno como a la exportación.

Las condiciones agroecológicas de la provincia, caracterizadas por clima árido, elevada amplitud térmica, alta radiación solar, suelos aluviales y disponibilidad de agua proveniente del deshielo cordillerano, favorecen el desarrollo de uvas con atributos adecuados para la vinificación. Sin embargo, estas condiciones también presentan desafíos vinculados al manejo del cultivo, la disponibilidad hídrica, la presión de plagas y enfermedades, y la necesidad de sostener sistemas productivos que combinen calidad, inocuidad y competitividad comercial.

Importancia de la seguridad alimentaria y calidad agroindustrial

En el contexto actual, la calidad de los productos vitivinícolas no puede evaluarse únicamente a partir de sus características organolépticas, como el color, aroma, sabor o estructura del vino. La calidad agroindustrial también incluye aspectos relacionados con la inocuidad, la trazabilidad, el cumplimiento normativo y la sostenibilidad de las prácticas productivas. En este sentido, la presencia de residuos de plaguicidas en uvas destinadas a vinificación constituye un aspecto de relevancia creciente, especialmente cuando la producción se orienta a mercados nacionales e internacionales con exigencias regulatorias cada vez más estrictas.

Los plaguicidas son herramientas utilizadas en la producción agrícola para prevenir, controlar o reducir el impacto de plagas, enfermedades y malezas que pueden afectar el rendimiento y la calidad de los cultivos. No obstante, su uso debe realizarse bajo criterios técnicos y respetando las buenas prácticas agrícolas, ya que una aplicación inadecuada, excesiva o cercana al momento de cosecha puede generar residuos en el producto final. Estos residuos, cuando superan los valores legalmente permitidos, pueden representar un riesgo para la inocuidad alimentaria y afectar la comercialización de los productos.

El Codex Alimentarius define el límite máximo de residuos (LMR) como el nivel máximo de residuos de un plaguicida legalmente permitido en alimentos o piensos, tanto en el interior como en la superficie del producto, cuando los plaguicidas son aplicados correctamente conforme a las buenas prácticas agrícolas (Codex Alimentarius, 2023a). Por lo tanto, los LMR constituyen una herramienta regulatoria fundamental para proteger la salud de los

consumidores, facilitar el comercio internacional y establecer criterios objetivos para evaluar la conformidad de los productos agroalimentarios.

En el caso de la vitivinicultura, el control de residuos de plaguicidas adquiere particular importancia debido a que la uva constituye la materia prima inicial del proceso de elaboración del vino. Si bien durante la vinificación pueden producirse transformaciones físicas, químicas y microbiológicas que modifiquen la concentración de determinados compuestos, la calidad e inocuidad de la materia prima continúa siendo un factor determinante para asegurar la seguridad del producto final y el cumplimiento de los requisitos exigidos por los mercados de destino

Brecha de conocimiento y justificación del estudio

A pesar de la relevancia económica y productiva de la vitivinicultura mendocina, resulta necesario fortalecer la información local disponible sobre la presencia de residuos de plaguicidas en uvas destinadas a vinificación. La existencia de normativas nacionales e internacionales sobre LMR exige contar con datos actualizados y específicos que permitan evaluar el grado de cumplimiento de los productos primarios frente a los estándares vigentes.

En particular, los principios activos dimetoato, ometoato, benomilo-carbendazima y tiofanato-metilo presentan interés para el sector vitivinícola debido a su utilización histórica o presencia potencial en esquemas de manejo fitosanitario, así como por su regulación en diferentes mercados. La evaluación de estos compuestos en muestras de uvas provenientes de distintas zonas productivas de Mendoza permite generar información aplicada sobre la situación local, identificar posibles puntos críticos y contribuir a la mejora de las prácticas agrícolas.

La problemática adquiere mayor importancia si se considera que los mercados internacionales pueden presentar criterios diferentes respecto de los LMR permitidos. La Organización Internacional de la Viña y el Vino ha señalado que no existe una armonización internacional única en materia de LMR, debido a que cada país o bloque comercial aplica sus propias estrategias regulatorias y de seguridad alimentaria (Organización Internacional de la Viña y el Vino [OIV], 2025). En consecuencia, una misma concentración de residuo puede ser aceptable para un destino comercial y no conforme para otro, lo que obliga a los productores y bodegas a mantener controles actualizados según los mercados a los que se orienta la producción.

En este marco, el presente trabajo busca aportar información sobre la presencia de residuos de plaguicidas en uvas de vinificación provenientes de Mendoza, mediante el análisis de muestras representativas y la comparación de los resultados obtenidos con los LMR establecidos por normativas nacionales e internacionales. De esta manera, se pretende contribuir al fortalecimiento de la seguridad alimentaria, la trazabilidad y la competitividad del sector vitivinícola mendocino.

Objetivos del estudio

El objetivo general de este estudio es evaluar la presencia de residuos de dimetoato, ometoato, benomilo-carbendazima y tiofanato-metilo en uvas de vinificación provenientes de distintas zonas productivas de la provincia de Mendoza, mediante técnicas cromatográficas, con el fin de determinar su grado de cumplimiento respecto de los límites máximos de residuos establecidos por normativas nacionales e internacionales.

Los objetivos específicos del estudio son:

1. Cuantificar la concentración de los principios activos seleccionados en 40 muestras de uvas de vinificación provenientes de la provincia de Mendoza.
2. Comparar las concentraciones detectadas con los límites máximos de residuos establecidos por normativas nacionales e internacionales aplicables.
3. Identificar posibles diferencias en la presencia de residuos según la zona de producción de las muestras analizadas.
4. Proponer recomendaciones orientadas a fortalecer el monitoreo de residuos, mejorar las prácticas agrícolas y contribuir a una vitivinicultura más segura y sostenible.

A partir de estos objetivos, el trabajo pretende aportar evidencia aplicada para la toma de decisiones en el sector vitivinícola, especialmente en relación con el control de residuos de plaguicidas, el cumplimiento normativo y la mejora continua de la calidad de las uvas destinadas a vinificación.

Hipótesis

Sobre la base de los antecedentes revisados y del objetivo general planteado, se formula la siguiente hipótesis de trabajo: las uvas de vinificación producidas en Mendoza presentan bajos niveles de residuos de dimetoato, ometoato, benomilo-carbendazima y tiofanato-metilo, mayoritariamente compatibles con el cumplimiento de los límites máximos de residuos establecidos por las normativas nacionales e internacionales, pudiendo observarse diferencias en la frecuencia de detección según la zona de procedencia (Valle de Uco, Luján de Cuyo y Maipú).

Capítulo I: Generalidades de la Vitivinicultura

1.1 Historia y evolución de la vitivinicultura argentina

La vitivinicultura argentina posee una trayectoria histórica de más de cinco siglos y se encuentra estrechamente vinculada con el desarrollo económico, social y cultural de distintas regiones del país. Sus orígenes se remontan al período colonial, cuando las primeras cepas de vid fueron introducidas por los españoles y comenzaron a cultivarse en zonas como Santiago del Estero, Cuyo y otras regiones del actual territorio argentino. Con el paso del tiempo, la vid se adaptó de manera favorable a las condiciones agroecológicas del oeste argentino, especialmente en las provincias de Mendoza y San Juan, donde el cultivo encontró un ambiente propicio para su expansión (Argentina.gob.ar, s.f.).

Durante los siglos XVI, XVII y XVIII, la producción vitivinícola estuvo vinculada principalmente al consumo local y regional. En esta etapa inicial, la elaboración de vino se desarrollaba con técnicas artesanales y en pequeña escala. Sin embargo, la actividad comenzó a adquirir mayor importancia a medida que se consolidaron los asentamientos poblacionales, se expandieron las áreas de cultivo y se desarrollaron sistemas de riego que permitieron aprovechar el agua proveniente de la cordillera de los Andes.

La transformación de la vitivinicultura en una actividad industrial de mayor escala se produjo especialmente hacia fines del siglo XIX. En Mendoza, este proceso estuvo asociado a la llegada de inmigrantes europeos, principalmente españoles e italianos, quienes aportaron mano de obra calificada, conocimientos técnicos y una cultura de consumo vinculada al vino. A ello se sumaron otros factores decisivos, como la llegada del ferrocarril, la incorporación de tecnología y la reorganización económica regional. Desde aproximadamente 1885, la vitivinicultura mendocina inició

un proceso acelerado de crecimiento que permitió sentar las bases de la industria moderna (Universidad Nacional de Cuyo [UNCUYO], 2009).

A lo largo del siglo XX, la producción vitivinícola argentina estuvo orientada principalmente al mercado interno. Durante varias décadas, el vino formó parte del consumo cotidiano de la población, lo que impulsó una producción centrada en grandes volúmenes. No obstante, hacia fines del siglo XX y comienzos del siglo XXI, el sector inició un proceso de reconversión productiva, orientado a la mejora de la calidad, la diferenciación varietal, la incorporación de tecnología enológica y la apertura hacia mercados internacionales.

Dentro de este proceso, Mendoza adquirió un papel protagónico debido a su superficie cultivada, su infraestructura productiva, la presencia de bodegas tecnificadas y la calidad de sus variedades. La variedad Malbec, introducida desde Francia y adaptada exitosamente a las condiciones locales, se consolidó como la cepa emblemática del vino argentino. De acuerdo con el Instituto Nacional de Vitivinicultura, en 2024 el Malbec registró 47.064 ha cultivadas en Argentina, lo que representó el 23,5 % de la superficie total de vid del país y el 42,1 % de las variedades tintas aptas para elaboración de vinos y mostos (Instituto Nacional de Vitivinicultura [INV], 2025a).

En la actualidad, la vitivinicultura argentina se caracteriza por combinar tradición, innovación tecnológica, diversidad varietal y orientación comercial hacia distintos mercados. Este proceso de evolución permitió que el vino argentino se posicionara como un producto representativo del país, tanto por su importancia económica como por su valor cultural y territorial.

1.2 Estadísticas de superficie cultivada y principales variedades

La superficie implantada con vid en Argentina se distribuye en distintas provincias, aunque presenta una marcada concentración en la región de Cuyo. Según el Informe Anual de Superficie 2024 del Instituto Nacional de Vitivinicultura, al 31 de diciembre de 2024 Argentina registró 199.946 ha cultivadas con vid. Mendoza fue la principal provincia vitivinícola del país, con 142.785 ha, equivalentes al 71,4 % de la superficie nacional, seguida por San Juan, con 39.684 ha (INV, 2025b).

La concentración de la superficie vitícola en Mendoza se explica por la combinación de factores naturales, históricos y productivos. Entre ellos se destacan la disponibilidad de agua de deshielo para riego, los suelos aluviales, la amplitud térmica, la baja humedad relativa y una tradición vitivinícola consolidada. Estas condiciones permiten el desarrollo de uvas con características adecuadas para la elaboración de vinos de calidad.

En cuanto al destino productivo, la mayor parte de la superficie vitícola mendocina corresponde a variedades aptas para elaboración de vinos y mostos. Esto refuerza la importancia de la provincia como núcleo central de la industria vitivinícola argentina. Las variedades tintas tienen una participación destacada, especialmente Malbec, Bonarda, Cabernet Sauvignon y Syrah, mientras que entre las blancas se encuentran variedades como Chardonnay, Pedro Giménez, Torrontés Riojano y Sauvignon Blanc.

El Malbec constituye la principal variedad cultivada en Argentina y posee una fuerte concentración territorial en Mendoza. En 2024, Mendoza registró 39.856 ha de Malbec, lo que representó el 84,7 % de la superficie nacional implantada con esta variedad. Dentro de la provincia, los departamentos de Luján de Cuyo, San Carlos, Tunuyán, Tupungato y Maipú se destacan por su participación en la superficie

cultivada con esta cepa. En particular, los tres departamentos del Valle de Uco —San Carlos, Tunuyán y Tupungato— concentraron el 41,6 % del Malbec mendocino (INV, 2025a).

La diversidad varietal de Argentina constituye una fortaleza para el sector, ya que permite elaborar vinos con diferentes perfiles enológicos y responder a las demandas de consumidores y mercados diversos. Además, la expansión de regiones vitivinícolas no tradicionales ha contribuido a ampliar la identidad productiva del país, aunque Mendoza continúa siendo el eje principal de la producción nacional.

1.3 Estadísticas de litros elaborados de vino y su comercialización

Argentina ocupa un lugar relevante dentro del contexto vitivinícola internacional. De acuerdo con informes oficiales de la Secretaría de Bioeconomía, el país se encuentra entre los principales productores mundiales de vino y posee una industria reconocida por su diversidad regional, su potencial productivo y la calidad de sus vinos (Secretaría de Bioeconomía, 2024).

La producción vitivinícola argentina se destina tanto al mercado interno como al mercado externo. Históricamente, el consumo interno tuvo un peso central en el desarrollo de la industria, aunque en las últimas décadas se observa una transformación en los hábitos de consumo, con una disminución del volumen consumido por habitante y una mayor valoración de vinos diferenciados por calidad, variedad, origen y marca. Esta tendencia obligó al sector a adaptar sus estrategias productivas y comerciales.

El Instituto Nacional de Vitivinicultura publica informes anuales con datos estadísticos definitivos sobre el mercado interno de vinos, así como informes específicos sobre el mercado externo de vinos y mostos. Estas fuentes permiten

analizar la evolución del consumo, los despachos, las exportaciones, los destinos comerciales y el comportamiento general del sector (INV, 2025c; INV, 2025d).

En relación con el comercio exterior, Argentina exporta vinos a numerosos destinos, entre los que se destacan mercados como Estados Unidos, Reino Unido, Canadá, Brasil y países de Europa. La inserción internacional del vino argentino exige no solo mantener estándares de calidad enológica, sino también cumplir con requisitos de inocuidad, trazabilidad, etiquetado y límites máximos de residuos de plaguicidas. En este sentido, los aspectos vinculados con la seguridad alimentaria adquieren una importancia creciente para sostener la competitividad de la vitivinicultura nacional.

La comercialización de vinos argentinos se apoya en diferentes modalidades, como vinos fraccionados, vinos a granel y mostos. El posicionamiento de los vinos varietales, especialmente aquellos elaborados con Malbec, ha contribuido a consolidar la imagen del vino argentino en el exterior. Sin embargo, la competitividad internacional depende cada vez más de la capacidad del sector para responder a exigencias comerciales, sanitarias y ambientales establecidas por los países importadores.

1.4 Exigencias internacionales respecto a tolerancias en contenido de pesticidas

La calidad de las uvas y de los vinos no depende únicamente de variables agronómicas y enológicas, sino también del cumplimiento de requisitos vinculados con la inocuidad alimentaria. Entre estos requisitos se encuentran los límites máximos de residuos (LMR), que establecen la concentración máxima legalmente permitida de residuos de plaguicidas en un alimento cuando estos productos son aplicados

correctamente de acuerdo con las buenas prácticas agrícolas (Codex Alimentarius, 2023a).

En los mercados internacionales, los LMR constituyen un criterio fundamental para evaluar la conformidad de los productos agroalimentarios. Su incumplimiento puede generar restricciones comerciales, rechazos de partidas, pérdida de confianza por parte de los compradores y dificultades para acceder a mercados con regulaciones estrictas. Por esta razón, el control de residuos de plaguicidas en uvas destinadas a vinificación resulta una herramienta clave para garantizar la inocuidad, la trazabilidad y la competitividad del sector.

La Organización Internacional de la Viña y el Vino ha señalado que no existe una armonización internacional única en materia de LMR, debido a que cada país o bloque comercial aplica sus propias estrategias regulatorias. Por ello, la consulta de los valores vigentes debe realizarse en las fuentes oficiales correspondientes a cada mercado de destino, tales como SENASA para Argentina, la base de datos de la Unión Europea, Codex Alimentarius, Estados Unidos, Canadá, Brasil, Reino Unido y otros países importadores (Organización Internacional de la Viña y el Vino [OIV], 2025).

En Argentina, los requisitos relacionados con residuos de plaguicidas se encuentran regulados por el Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agroalimentaria. La Resolución SENASA N.º 934/2010 establece tolerancias o límites máximos de residuos de plaguicidas en productos y subproductos agropecuarios, constituyendo una referencia normativa nacional para evaluar la conformidad de los alimentos de origen vegetal (SENASA, 2010).

A nivel internacional, el Codex Alimentarius dispone de una base de datos de límites máximos de residuos de plaguicidas adoptados por la Comisión del Codex Alimentarius, mientras que la Unión Europea cuenta con la EU Pesticides Database,

que permite consultar información sobre sustancias activas y LMR en productos alimenticios. Estas herramientas son esenciales para el sector exportador, ya que permiten verificar si los residuos presentes en una materia prima o producto final cumplen con los requisitos del mercado de destino.

En el caso de la vitivinicultura mendocina, estas exigencias adquieren especial importancia debido al peso de la provincia en la producción nacional y a la orientación exportadora de una parte significativa del sector. El monitoreo de residuos en uvas de vinificación permite anticipar posibles incumplimientos, ajustar prácticas agrícolas, mejorar la trazabilidad y fortalecer la seguridad alimentaria. Por lo tanto, el cumplimiento de los LMR debe ser considerado no solo como una exigencia normativa, sino también como una condición estratégica para sostener la calidad y competitividad del vino argentino.

Capítulo II: Pesticidas en la Vitivinicultura

2.1 Uso de plaguicidas en el manejo fitosanitario de la vid

La producción vitivinícola requiere un manejo fitosanitario adecuado para prevenir y controlar plagas y enfermedades que pueden afectar el rendimiento del cultivo, la sanidad de la uva y la calidad de la materia prima destinada a vinificación. En este contexto, los plaguicidas o productos fitosanitarios constituyen herramientas utilizadas para prevenir, controlar o reducir el impacto de organismos perjudiciales, siempre que su aplicación se realice conforme a criterios técnicos, dosis autorizadas, momentos adecuados de aplicación y períodos de carencia (Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO], 2020; Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agroalimentaria [SENASA], 2023).

El uso de productos fitosanitarios debe integrarse dentro de un sistema de manejo responsable, orientado a proteger la sanidad del cultivo sin comprometer la inocuidad de los alimentos ni la sostenibilidad del agroecosistema. Cuando las aplicaciones no se realizan de manera adecuada, existe la posibilidad de que permanezcan residuos en la uva al momento de la cosecha. Por ello, el análisis de residuos de plaguicidas permite verificar si las concentraciones presentes en el alimento se encuentran dentro de los límites máximos de residuos establecidos por las normativas vigentes (Codex Alimentarius, 2023a; SENASA, 2010).

En vitivinicultura, este control adquiere especial importancia debido a que la uva constituye la materia prima inicial para la elaboración del vino. Si bien durante la vinificación pueden producirse modificaciones en la concentración de determinados compuestos, la calidad e inocuidad de la uva cosechada continúa siendo un factor determinante para asegurar la seguridad del producto final y el cumplimiento de los requisitos exigidos por los mercados de destino.

Históricamente, algunos grupos de plaguicidas, como los organoclorados, tuvieron un uso importante en la agricultura debido a su eficacia y persistencia. Sin embargo, muchos de ellos fueron restringidos o prohibidos por su elevada estabilidad ambiental, su capacidad de bioacumulación y sus efectos adversos sobre la salud humana y el ambiente. A partir de estas restricciones, se promovió el uso de otros grupos químicos con diferentes características, entre ellos organofosforados, carbamatos, benzimidazoles, tiofanatos y otros fungicidas sistémicos.

El presente trabajo no se centra en plaguicidas organoclorados, sino en principios activos de interés para el control de plagas en uvas de vinificación tales como: dimetoato, ometoato, benomilo-carbendazima y tiofanato-metilo. Estos compuestos pertenecen a grupos químicos diferentes y presentan distintos mecanismos de acción. Dimetoato y ometoato se vinculan con los insecticidas organofosforados, mientras que benomilo, carbendazima y tiofanato-metilo se relacionan principalmente con fungicidas sistémicos del grupo de los benzimidazoles y tiofanatos (EPA, 2021; Health Canada, 2022).

2.1.1 Persistencia ambiental, degradación y presencia de residuos

La persistencia ambiental de un plaguicida se refiere a su capacidad para permanecer en el ambiente antes de degradarse por procesos físicos, químicos o biológicos. La velocidad de degradación depende de las características del principio activo, de las condiciones ambientales, de la temperatura, la radiación solar, la humedad, el tipo de suelo, el pH y la actividad microbiológica.

Los compuestos con alta persistencia pueden mantenerse durante períodos prolongados en el suelo, el agua o los sedimentos, aumentando la probabilidad de exposición de organismos vivos. A su vez, algunos plaguicidas presentan

características que favorecen su acumulación o transferencia en el ambiente. Este fenómeno fue especialmente relevante en el caso de los plaguicidas organoclorados, muchos de los cuales fueron restringidos por su persistencia, bioacumulación y toxicidad.

Si bien los principios activos analizados en este trabajo no pertenecen al grupo de los organoclorados, resulta importante mencionar este antecedente histórico porque permite comprender la evolución de las políticas de control de plaguicidas y la creciente preocupación por los residuos en alimentos. En la actualidad, la evaluación de residuos no se limita a los compuestos altamente persistentes, sino que también incluye sustancias de menor persistencia ambiental, pero con relevancia toxicológica, regulatoria o comercial.

En el caso de los compuestos estudiados, la degradación y transformación metabólica adquieren especial importancia. El dimetoato puede transformarse en ometoato, metabolito que también presenta actividad tóxica asociada a la inhibición de la colinesterasa. Por otra parte, el benomilo y el tiofanato-metilo pueden degradarse o transformarse en carbendazima, metabolito relevante desde el punto de vista analítico y regulatorio (Health Canada, 2022; United States Environmental Protection Agency [EPA], 2021).

Por este motivo, la presencia de residuos en uvas de vinificación debe interpretarse considerando no solo la detección del principio activo original, sino también la posible aparición de metabolitos. Esta situación resulta clave para la comparación con los límites máximos de residuos, ya que algunas normativas expresan los residuos de ciertos compuestos como suma de sustancias relacionadas o como metabolito equivalente.

2.1.2 Riesgos para la salud humana y el medio ambiente

El uso de plaguicidas en la agricultura permite reducir pérdidas productivas ocasionadas por plagas y enfermedades; sin embargo, su aplicación inadecuada puede generar riesgos para la salud humana, el ambiente y la inocuidad de los alimentos. Estos riesgos dependen de diversos factores, entre ellos la toxicidad del principio activo, la dosis aplicada, la frecuencia de uso, el momento de aplicación, las condiciones ambientales, el período transcurrido entre la aplicación y la cosecha, y la capacidad de degradación del compuesto.

Desde el punto de vista de la salud humana, la exposición a residuos de plaguicidas puede producir efectos agudos o crónicos, según el tipo de sustancia, la concentración y la vía de exposición. En el caso de los insecticidas organofosforados, como el dimetoato y su metabolito ometoato, el principal mecanismo toxicológico se asocia con la inhibición de la acetilcolinesterasa, enzima fundamental para el funcionamiento normal del sistema nervioso. Por esta razón, su presencia en alimentos debe ser controlada y comparada con los límites máximos de residuos establecidos por las normativas vigentes (Health Canada, 2022).

En el caso de fungicidas como benomilo, carbendazima y tiofanato-metilo, el interés toxicológico y regulatorio se relaciona con su posible persistencia como residuos, su transformación metabólica y las restricciones establecidas por distintos mercados. La carbendazima adquiere especial relevancia porque puede originarse a partir de la degradación de otros compuestos. La EPA señala que el benomilo puede hidrolizarse rápidamente a carbendazima o MBC, mientras que evaluaciones regulatorias describen que el tiofanato-metilo puede degradarse a MBC en superficies foliares (EPA, 2021).

Desde el punto de vista ambiental, el uso inadecuado de plaguicidas puede

afectar organismos no objetivo, alterar componentes del agroecosistema y generar riesgos de contaminación en suelo o agua. Estos efectos pueden reducirse mediante la aplicación de buenas prácticas agrícolas, el respeto de los períodos de carencia, la correcta dosificación, el monitoreo de plagas y la adopción de estrategias de manejo integrado (FAO, s.f.).

Por lo tanto, la evaluación de residuos de plaguicidas en uvas de vinificación no solo permite verificar el cumplimiento de los límites máximos de residuos, sino también aportar información útil para mejorar las prácticas de manejo fitosanitario, proteger la salud de los consumidores y contribuir a una vitivinicultura más segura y sostenible.

2.1.3 Importancia de los límites máximos de residuos en vitivinicultura

Los límites máximos de residuos (LMR) constituyen valores regulatorios que indican la concentración máxima permitida de un residuo de plaguicida en un alimento. Estos límites se establecen a partir de evaluaciones toxicológicas, estudios de residuos y condiciones autorizadas de uso. Su finalidad es proteger la salud de los consumidores y facilitar el comercio de alimentos bajo criterios objetivos de inocuidad (Codex Alimentarius, 2023a).

En el caso de la uva de vinificación, el cumplimiento de los LMR resulta relevante tanto para el mercado interno como para la exportación. Los distintos países o bloques comerciales pueden establecer valores diferentes para un mismo principio activo, por lo que una muestra puede cumplir con la normativa de un destino y no cumplir con la de otro. Esta situación obliga a productores, bodegas y laboratorios de control a consultar fuentes oficiales actualizadas y a mantener sistemas de monitoreo que permitan prevenir incumplimientos.

La Organización Internacional de la Viña y el Vino señala que no existe una armonización internacional única de los LMR, debido a que cada país o bloque comercial aplica sus propias estrategias de seguridad alimentaria. Por ello, recomienda consultar las bases oficiales correspondientes a cada mercado de destino, tales como SENASA para Argentina, la base de datos de la Unión Europea, Codex Alimentarius, Estados Unidos, Canadá, Brasil, Reino Unido y otros países importadores (Organización Internacional de la Viña y el Vino [OIV], 2025).

El análisis de residuos en uvas permite evaluar si las prácticas fitosanitarias aplicadas en el viñedo fueron compatibles con los requisitos de inocuidad exigidos. Además, contribuye a detectar posibles desviaciones, tales como aplicaciones cercanas a la cosecha, errores en la dosificación, uso de productos no autorizados, contaminación cruzada o incumplimiento de períodos de carencia. No obstante, estas posibles causas deben interpretarse como hipótesis cuando no se dispone de registros de aplicación que permitan confirmarlas.

2.2 Principios activos seleccionados para el estudio: descripción, características y usos

Los principios activos seleccionados para este estudio fueron dimetoato, ometoato, benomilo-carbendazima y tiofanato-metilo. Su inclusión responde a su relevancia en el control fitosanitario, a su presencia potencial como residuos en uvas de vinificación y a su regulación en distintos mercados nacionales e internacionales.

Estos compuestos pertenecen a grupos químicos diferentes y presentan distintos mecanismos de acción. Dimetoato y ometoato se asocian al grupo de los insecticidas organofosforados, cuyo efecto tóxico principal se vincula con la inhibición de la acetilcolinesterasa. En cambio, benomilo, carbendazima y tiofanato-metilo se

relacionan con fungicidas sistémicos capaces de interferir en procesos de división celular de los hongos, principalmente a través de la alteración de los microtúbulos.

Benomilo y Carbendazima

El **benomilo**, de fórmula molecular $C_{14}H_{18}N_4O_3$, es un fungicida sistémico perteneciente al grupo de los benzimidazoles. Fue utilizado para el control de enfermedades fúngicas en diversos cultivos debido a su capacidad de interferir en la división celular de los hongos. En condiciones ambientales y fisiológicas, el benomilo puede degradarse o transformarse rápidamente en carbendazima, compuesto que conserva actividad fungicida (EPA, 2021).

La **carbendazima** ($C_9H_9N_3O_2$), también conocida como metil-2-benzimidazol carbamato, es un metabolito relevante desde el punto de vista analítico y regulatorio. Debido a la relación química y metabólica entre benomilo y carbendazima, distintas normativas expresan los residuos de estos compuestos en forma conjunta o como carbendazima equivalente. Por esta razón, al interpretar los resultados del presente estudio es necesario aclarar si el valor informado corresponde a carbendazima individual o a la suma de benomilo y carbendazima expresada como carbendazima.

Estos compuestos se asocian al control de enfermedades fúngicas que pueden afectar la calidad de la uva, entre ellas la botritis, enfermedad causada por el hongo *Botrytis cinerea*.

La detección de carbendazima en una muestra puede responder a distintos escenarios: aplicación directa del compuesto, degradación de benomilo, transformación de tiofanato-metilo o presencia residual asociada al manejo fitosanitario del viñedo. Por ello, la discusión de resultados debe ser prudente y evitar atribuir el origen del residuo a una causa específica si no se cuenta con registros de

aplicación que lo respalden.

Figura 1
Estructura química del Benomilo

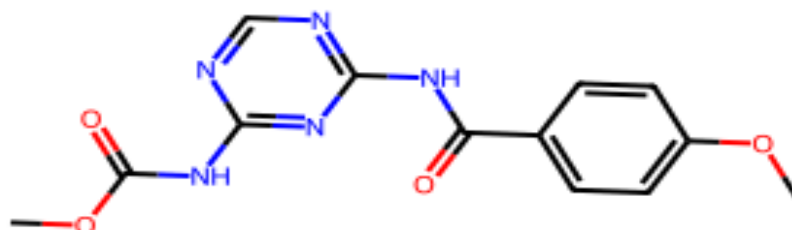
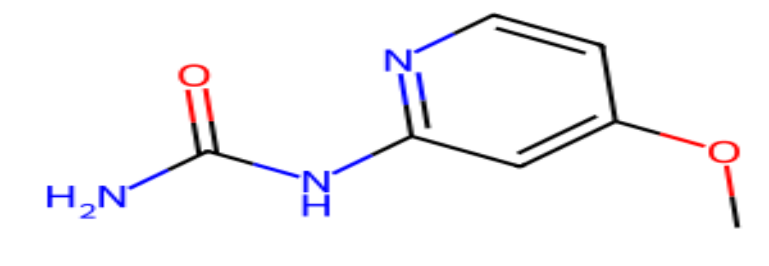


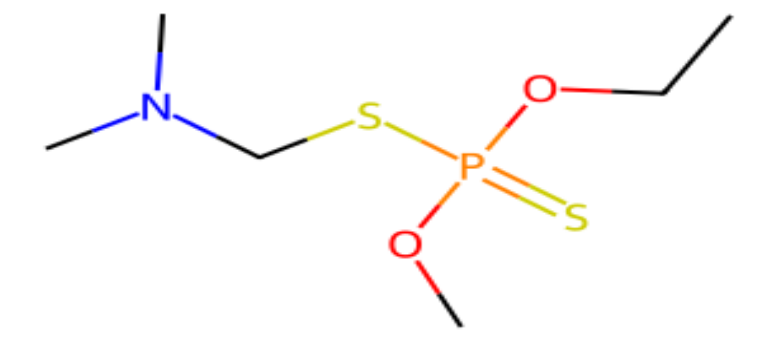
Figura 2
Estructura química de la Carbendazima



Dimetoato y Ometoato

El **dimetoato** ($C_5H_{12}NO_3PS_2$) es un insecticida organofosforado de acción sistémica utilizado para el control de insectos fitófagos. Su acción se produce principalmente por contacto e ingestión, y se caracteriza por su capacidad de ser absorbido por los tejidos vegetales y distribuirse dentro de la planta. En términos toxicológicos, los organofosforados se caracterizan por inhibir la actividad de la acetilcolinesterasa, enzima responsable de degradar la acetilcolina en las sinapsis nerviosas. La inhibición de esta enzima genera acumulación de acetilcolina y alteraciones en la transmisión nerviosa (Health Canada, 2022).

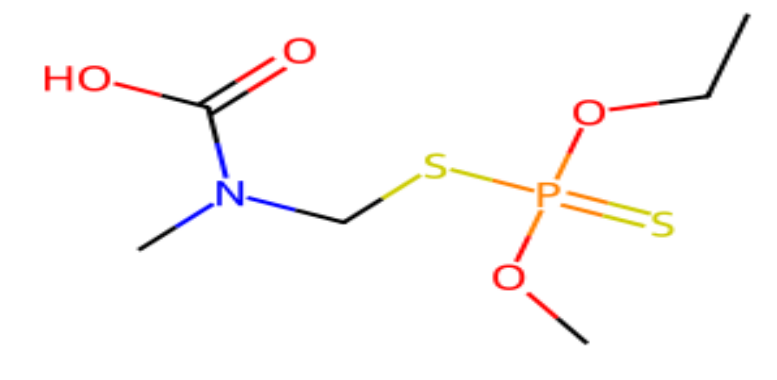
Figura 3
Estructura química del Dimetoato



El **ometoato** ($\text{C}_5\text{H}_{12}\text{NO}_4\text{PS}$) es un metabolito oxidativo del dimetoato y presenta relevancia toxicológica porque también actúa como inhibidor de la colinesterasa (Health Canada, 2022; JMPR, 1998). Su presencia en muestras vegetales puede estar asociada a la degradación o transformación del dimetoato, aunque también debe evaluarse la posibilidad de otras fuentes según el historial de uso de productos fitosanitarios. Por este motivo, en la interpretación de resultados es importante analizar conjuntamente dimetoato y ometoato, especialmente cuando ambos aparecen en una misma muestra.

En uvas de vinificación, la detección de dimetoato u ometoato debe interpretarse considerando la concentración encontrada, el límite de cuantificación del método analítico, el período de carencia informado y los LMR establecidos por cada normativa. La presencia de ometoato por encima de determinados límites puede representar un punto crítico para la comercialización, especialmente en mercados con regulaciones más restrictivas.

Figura 4
Estructura química del Ometoato



Tiofanato-metilo

El **tiofanato-metilo** ($C_{12}H_{14}N_4O_4S_2$) es un fungicida sistémico relacionado con el grupo de los tiofanatos y estructuralmente vinculado con los benzimidazoles. En la planta y en el ambiente puede transformarse en carbendazima, motivo por el cual su análisis regulatorio suele relacionarse con este metabolito. Su acción fungicida se basa en la interferencia de procesos de división celular de los hongos, particularmente mediante la alteración de la formación de microtúbulos (EPA, 2021).

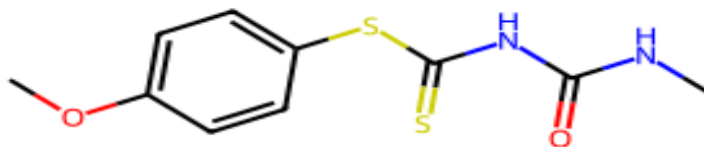
En vitivinicultura, el tiofanato-metilo puede emplearse para el control de enfermedades fúngicas, siempre que su uso se encuentre autorizado y se respeten las indicaciones técnicas correspondientes. Entre las enfermedades relevantes de la vid se encuentra la botritis, así como otras patologías fúngicas que afectan hojas, brotes o racimos. Sin embargo, su empleo debe evaluarse de acuerdo con la normativa vigente de cada país y con los requisitos de los mercados de destino.

La no detección de tiofanato-metilo en las muestras analizadas puede interpretarse como un resultado favorable, aunque debe expresarse con precisión metodológica. En términos analíticos, corresponde indicar que el compuesto no fue detectado por encima del límite de detección o del límite de cuantificación establecido para el método empleado. Esta aclaración es importante porque “no detectado” no significa necesariamente ausencia absoluta del compuesto, sino ausencia por encima

de la capacidad de detección o cuantificación del método aplicado.

Figura 5

Estructura química del Tiofanato-metilo



2.3 Otras alternativas al empleo de pesticidas convencionales

La preocupación creciente por la inocuidad alimentaria, la sostenibilidad ambiental y la competitividad de los productos agroindustriales ha impulsado el desarrollo de estrategias destinadas a reducir la dependencia de plaguicidas convencionales. Entre estas estrategias se destaca el Manejo Integrado de Plagas (MIP), que combina herramientas biológicas, culturales, físicas, genéticas y químicas con el objetivo de mantener las poblaciones de plagas por debajo de niveles de daño económico y reducir los riesgos para la salud humana y el ambiente (FAO, s.f.).

El MIP no implica eliminar completamente el uso de productos fitosanitarios, sino utilizarlos de manera racional y justificada, priorizando el monitoreo del cultivo, la identificación correcta de plagas y enfermedades, la conservación de enemigos naturales, la elección de productos de menor impacto y el respeto de las condiciones de aplicación. En vitivinicultura, este enfoque resulta especialmente relevante porque permite compatibilizar la protección sanitaria del cultivo con la reducción de residuos en la uva.

Otra alternativa es la producción orgánica, que restringe el uso de plaguicidas sintéticos y promueve prácticas orientadas a conservar la fertilidad del suelo, la biodiversidad y el equilibrio del agroecosistema. La producción orgánica puede

constituir una estrategia de diferenciación comercial, aunque requiere certificación, seguimiento técnico y adaptación del manejo productivo.

También se han desarrollado herramientas complementarias, como el uso de biopesticidas, microorganismos antagonistas, feromonas para confusión sexual, monitoreo mediante trampas, selección de variedades o portainjertos adaptados, manejo de canopia para mejorar la aireación del racimo y prácticas culturales destinadas a reducir la presión de enfermedades. Estas alternativas pueden contribuir a disminuir la frecuencia o intensidad de aplicación de plaguicidas convencionales.

En síntesis, la vitivinicultura actual enfrenta el desafío de sostener la productividad y la calidad de la uva, al mismo tiempo que responde a exigencias crecientes de inocuidad, trazabilidad y sostenibilidad. El análisis de residuos de plaguicidas constituye una herramienta fundamental para evaluar el impacto del manejo fitosanitario y para orientar decisiones que permitan mejorar la seguridad alimentaria y la competitividad del sector.

Capítulo III: Regulaciones respecto a pesticidas en alimentos

3.1 Legislación y regulación internacional sobre residuos de pesticidas seleccionados

La regulación de los residuos de plaguicidas en alimentos constituye una herramienta fundamental para proteger la salud de los consumidores, garantizar la inocuidad alimentaria y facilitar el comercio nacional e internacional de productos agroalimentarios. En el caso de las uvas destinadas a vinificación, este control adquiere especial importancia debido a que la materia prima puede destinarse a la elaboración de productos comercializados en mercados con diferentes exigencias regulatorias.

Los límites máximos de residuos (LMR) establecen la concentración máxima legalmente permitida de un residuo de plaguicida en un alimento. Estos valores se fijan considerando evaluaciones toxicológicas, datos de residuos obtenidos bajo buenas prácticas agrícolas, patrones de consumo y criterios de seguridad alimentaria. Por lo tanto, la comparación de los resultados analíticos con los LMR correspondientes permite evaluar si una muestra cumple o no con la normativa aplicable (Codex Alimentarius, 2023a).

A nivel internacional, no existe una única normativa armonizada para todos los países. Cada país o bloque comercial puede establecer sus propios LMR, modificar los valores según nuevas evaluaciones científicas o aplicar criterios particulares para determinados productos y principios activos. La Organización Internacional de la Viña y el Vino señala que la armonización internacional de los LMR resulta compleja debido a que cada país aplica sus propias estrategias de seguridad alimentaria. Por este motivo, recomienda consultar las bases oficiales de cada mercado de destino para verificar los valores vigentes (Organización Internacional de la Viña y el Vino [OIV],

2025).

En este contexto, el análisis de residuos de plaguicidas en uvas de vinificación debe considerar tanto la normativa nacional como las exigencias de los principales destinos comerciales. Una misma concentración de residuo puede resultar conforme para un mercado y no conforme para otro, especialmente cuando existen diferencias entre los LMR establecidos por Argentina, la Unión Europea, el Codex Alimentarius, Estados Unidos, Canadá, Brasil, Reino Unido u otros países importadores.

3.1.1 Normativa en Argentina (SENASA)

En Argentina, el organismo responsable de regular los aspectos vinculados con la sanidad, calidad e inocuidad agroalimentaria es el Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agroalimentaria (SENASA). En materia de residuos de plaguicidas, la Resolución SENASA N.º 934/2010 establece los requisitos que deben cumplir los productos y subproductos agropecuarios destinados al consumo interno. Esta norma aprueba el Anexo I, en el cual se establecen las tolerancias o límites máximos de residuos de plaguicidas en productos y subproductos agropecuarios (Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agroalimentaria [SENASA], 2010).

De acuerdo con esta normativa, los productos y subproductos agropecuarios que se importen o produzcan localmente para consumo interno deben cumplir con los LMR nacionales establecidos en el Anexo I de la Resolución SENASA N.º 934/2010. En consecuencia, para evaluar la conformidad de uvas de vinificación producidas en Mendoza, resulta necesario consultar los valores vigentes correspondientes al producto “uva” y a cada principio activo analizado.

Para el caso de Argentina, la consulta se realizó a partir de la Resolución SENASA N.º 934/2010 y del listado actualizado de límites máximos de residuos

publicado por el Registro Nacional de Terapéutica Vegetal, cuya versión disponible corresponde a marzo de 2026. De acuerdo con estas fuentes, para uva se consideró un LMR de 0,01 mg/kg para dimetoato y ometoato. Para benomilo-carbendazima, el valor de referencia nacional considerado fue de 3,00 mg/kg, expresado como carbendazima. En el caso de tiofanato-metilo, no se identificó un LMR específico para uva de vinificación en las fuentes argentinas consultadas; por lo tanto, su interpretación queda sujeta al criterio general previsto por la Resolución SENASA N.º 934/2010 para productos o principios activos no contemplados específicamente, es decir, el valor por defecto de 0,01 mg/kg correspondiente al límite de detección del método de análisis (Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agroalimentaria [SENASA], 2010; SENASA, 2026).

La consulta de la normativa argentina debe complementarse con la revisión de los registros de productos fitosanitarios autorizados, sus condiciones de uso, dosis, cultivos habilitados y períodos de carencia. Estos elementos permiten interpretar los resultados analíticos no solo desde el punto de vista del cumplimiento del LMR, sino también desde el manejo agronómico aplicado en el viñedo.

3.1.2 Normativa en la Unión Europea, Estados Unidos y Codex Alimentarius

Los principales mercados internacionales cuentan con sistemas regulatorios propios para establecer y controlar los LMR de plaguicidas en alimentos. Entre ellos, la Unión Europea, Estados Unidos y el Codex Alimentarius constituyen referencias relevantes para la evaluación de residuos en productos agroalimentarios destinados a exportación.

En la Unión Europea, los LMR en alimentos de origen vegetal y animal se

regulan principalmente mediante el Reglamento (CE) N.º 396/2005, que establece un marco común para la fijación, control y revisión de límites máximos de residuos en productos alimenticios. La consulta de los valores vigentes se realiza a través de la EU Pesticides Database, herramienta oficial que permite buscar información por producto y principio activo. En el caso de las uvas, la búsqueda debe realizarse bajo la categoría correspondiente al producto “grapes”, verificando cada sustancia activa de manera individual (European Commission, s.f.; Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, 2005). Para los principios activos considerados en este estudio, la Unión Europea establece en uva un LMR de 0,010 mg/kg para dimetoato y ometoato, valor que corresponde al límite de determinación por defecto tras la no renovación de la aprobación del dimetoato como sustancia activa en la UE (Reglamento de Ejecución (UE) 2019/1090; Reglamento (UE) 2021/155). Para benomilo-carbendazima, expresada como la suma de benomilo y carbendazima como carbendazima, el valor de 0,500 mg/kg corresponde a una tolerancia de importación basada en los antiguos límites del Codex Alimentarius, dado que ninguna de las dos sustancias se encuentra aprobada en la Unión Europea (carbendazima, desde 2014). Sin embargo, este valor se encuentra en un proceso activo de revisión a la baja: en septiembre de 2024 el Parlamento Europeo rechazó mantener tolerancias de importación superiores al límite de determinación para benomilo, carbendazima y tiofanato-metilo, y tras la revocación de los CXL de Codex en noviembre de 2025 (ver 3.1.2), la Comisión Europea tramita un reglamento —con publicación prevista para 2026— que reduciría el LMR a 0,01 mg/kg en todos los productos. Por lo tanto, el valor de 0,500 mg/kg debe interpretarse como un criterio en transición hacia uno considerablemente más restrictivo (Parlamento Europeo, 2024; European Food Safety Authority [EFSA], 2021). En el caso de tiofanato-metilo, la interpretación debe

realizarse mediante la consulta específica de la sustancia “thiophanate-methyl” en la EU Pesticides Database; no obstante, debido a que esta sustancia no se encuentra aprobada actualmente en la Unión Europea y sus LMR se encuentran sujetos a revisión, debe considerarse un principio activo de criterio regulatorio restrictivo para este mercado (European Commission, s.f.; European Food Safety Authority [EFSA], 2024).

En Estados Unidos, la Environmental Protection Agency (EPA) establece las tolerancias para residuos de plaguicidas en alimentos, publicadas en el Código de Regulaciones Federales, particularmente en el Título 40, Parte 180. La Food and Drug Administration (FDA) y el United States Department of Agriculture (USDA) intervienen en actividades de control, monitoreo o información vinculada con residuos en alimentos. Para evaluar una muestra destinada a este mercado, debe verificarse si existe una tolerancia específica para la combinación principio activo-producto. Cuando no existe una tolerancia establecida para un determinado plaguicida en un producto específico, la presencia de residuos puede constituir una situación regulatoria restrictiva para ese destino (United States Environmental Protection Agency [EPA], s.f.; United States Department of Agriculture Foreign Agricultural Service [USDA-FAS], s.f.). En el caso de dimetoato, la normativa estadounidense establece tolerancias para la suma de dimetoato y su análogo oxigenado, ometoato; sin embargo, no se identificó una tolerancia específica para uva dentro de los productos listados, por lo que estos residuos fueron considerados sin LMR específico aplicable para este destino. Para benomilo, la EPA revocó las tolerancias correspondientes debido a que el ingrediente activo dejó de estar registrado para usos alimentarios. En cambio, para tiofanato-metilo, el 40 CFR § 180.371 establece una tolerancia de 5,00 ppm en uva, considerando la suma de tiofanato-metilo y su

metabolito MBC, calculados como equivalente estequiométrico de tiofanato-metilo (EPA, s.f.-a; EPA, s.f.-b; Federal Register, 2002).

El Codex Alimentarius, desarrollado por la Food and Agriculture Organization of the United Nations y la World Health Organization, establece normas internacionales orientadas a proteger la salud de los consumidores y promover prácticas equitativas en el comercio de alimentos. En materia de residuos de plaguicidas, dispone de una base de datos oficial que contiene los límites máximos de residuos adoptados por la Comisión del Codex Alimentarius para diferentes alimentos y principios activos (Codex Alimentarius, 2023a). Para el caso de uvas, el documento de la OIV indica que la consulta en Codex debe realizarse utilizando la categoría “Grapes: FB 0269”. Esta identificación permite ubicar el producto correcto dentro de la base de datos y evitar errores al comparar los resultados analíticos con valores correspondientes a otros productos derivados, como pasas, uvas secas o jugo de uva (OIV, 2025). En la consulta actual, no se identificaron CXL vigentes para dimetoato ni ometoato en uva. Asimismo, los CXL históricos para la suma de carbendazima, benomilo y tiofanato-metilo expresados como carbendazima fueron revocados por la Comisión del Codex Alimentarius en noviembre de 2025, por lo que actualmente no corresponde utilizar el valor histórico de 3,00 mg/kg para uva como referencia vigente de Codex para este grupo de compuestos. En consecuencia, para los principios activos evaluados en este trabajo, Codex Alimentarius debe interpretarse como un marco sin LMR específico vigente para uva en dimetoato, ometoato y benomilo-carbendazima, y sin CXL aplicable a uva para tiofanato-metilo (Codex Alimentarius, 2023a; OIV, 2025).

3.1.3 Otros destinos de interés: Chile, Brasil, Reino Unido y Canadá

Además de la Unión Europea, Estados Unidos y Codex Alimentarius, existen otros destinos comerciales relevantes para la vitivinicultura argentina que presentan criterios propios para la regulación de residuos de plaguicidas. Entre ellos se destacan Chile, Brasil, Reino Unido y Canadá, cuyos marcos regulatorios deben considerarse al momento de interpretar la aptitud comercial de uvas o productos derivados de la vid destinados a exportación.

En Chile, los límites máximos de residuos de plaguicidas en alimentos se encuentran regulados por la Norma Técnica N.º 209, aprobada mediante la Resolución Exenta N.º 892/2020 del Ministerio de Salud, y sus modificaciones posteriores. Esta norma constituye la referencia para establecer los LMR aplicables a alimentos comercializados en el mercado chileno (Ministerio de Salud de Chile, 2020). Para uva, se consideraron como valores de referencia 0,010 mg/kg para dimetoato y ometoato, y 3,00 mg/kg para benomilo-carbendazima, expresada como carbendazima. En el caso de tiofanato-metilo, no se identificó un valor específico aplicable a uva dentro de las fuentes consultadas, por lo que su interpretación requiere verificación directa en la normativa vigente al momento de la evaluación.

En Brasil, la regulación de residuos de plaguicidas se consulta a través de las monografías de ingredientes activos publicadas por la Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA). Estas monografías contienen, entre otros datos, los cultivos autorizados y los límites máximos de residuos correspondientes para cada ingrediente activo (Agência Nacional de Vigilância Sanitária [ANVISA], s.f.). Para uva, se consideró un LMR de 0,700 mg/kg para el grupo asociado a tiofanato-metílico/carbendazim, expresado como carbendazim. En cambio, para dimetoato y ometoato no se identificó un LMR específico aplicable a uva en las fuentes

consultadas, por lo que su detección debe interpretarse como una situación regulatoria restrictiva para este destino. Asimismo, debe tenerse en cuenta que ANVISA informó la prohibición del carbendazim como ingrediente activo de agrotóxico en Brasil, con finalización del período de discontinuación en noviembre de 2024, por lo que este principio activo debe analizarse con especial precaución regulatoria para dicho mercado (ANVISA, 2025).

En Reino Unido, los LMR aplicables se consultan mediante el GB MRL Statutory Register, administrado por el Health and Safety Executive (HSE). Esta base permite buscar los límites máximos de residuos por sustancia activa y por producto, constituyendo la referencia oficial para productos comercializados en Gran Bretaña (Health and Safety Executive [HSE], s.f.). En las fuentes consultadas no se identificó un LMR específico para uva correspondiente a dimetoato, ometoato ni benomilo-carbendazima. Por lo tanto, la presencia detectable de estos residuos debe interpretarse como una situación restrictiva para este destino, salvo que una consulta directa actualizada en el registro vigente indique un valor específico aplicable. Para tiofanato-metilo, la consulta también debe realizarse de manera específica en el registro oficial, debido a que su criterio puede depender de la definición de residuo adoptada para la sustancia activa.

En Canadá, Health Canada establece los LMR como límites legales y exigibles para combinaciones específicas de pesticida y alimento. La autoridad sanitaria canadiense define los MRL como la mayor cantidad de residuo de plaguicida que puede permanecer en un alimento cuando el producto se utiliza de acuerdo con las instrucciones de la etiqueta, y aclara que estos límites son específicos para cada combinación pesticida-cultivo (Health Canada, 2024). Para dimetoato y ometoato en uva, se consideró como referencia un valor de 0,100 mg/kg. Para el grupo benomilo,

carbendazima y tiofanato-metilo, Health Canada utiliza una definición común de residuo expresada como carbendazima, y establece que, cuando no existe un LMR específico, aplica un valor general por defecto de 0,1 ppm. En este marco, los informes regulatorios utilizados como referencia consideran un valor de 5,00 mg/kg para benomilo-carbendazima en uva, mientras que la interpretación de tiofanato-metilo debe realizarse atendiendo a la definición común de residuo y al registro canadiense vigente (Health Canada, 2011; Health Canada, 2024).

3.2 Procedimientos y métodos de control de residuos de pesticidas

El control de residuos de plaguicidas en alimentos requiere procedimientos adecuados de muestreo, conservación, preparación de muestras, extracción de analitos, análisis instrumental e interpretación de resultados. Cada una de estas etapas influye en la confiabilidad del resultado final y debe realizarse de acuerdo con protocolos validados o metodologías reconocidas. En este sentido, el Codex Alimentarius establece criterios de desempeño para métodos de análisis destinados a la determinación de residuos de plaguicidas en alimentos y piensos, incluyendo parámetros como especificidad, exactitud, precisión, límite de detección, límite de cuantificación y recuperación (Codex Alimentarius Commission, 2017).

El muestreo constituye una etapa crítica, ya que la muestra analizada debe representar de manera adecuada el lote, viñedo o zona de producción evaluada. En el caso de uvas de vinificación, deben considerarse aspectos como ubicación del viñedo, variedad, sistema de manejo, momento de cosecha, estado sanitario del racimo, trazabilidad de la muestra y condiciones de transporte hasta el laboratorio. La representatividad de la muestra es fundamental, ya que un resultado analítico confiable depende no solo de la técnica instrumental empleada, sino también de la correcta obtención y conservación del material analizado.

Luego de la recolección, las muestras deben conservarse en condiciones que eviten la degradación de los compuestos de interés o la contaminación cruzada. El acondicionamiento posterior incluye operaciones como homogeneización, extracción y preparación del extracto para el análisis cromatográfico. Estas etapas deben describirse con precisión en el capítulo metodológico, ya que permiten comprender la reproducibilidad y confiabilidad de los resultados obtenidos. En los laboratorios de control de residuos, las metodologías analíticas suelen validarse mediante criterios de desempeño que permiten asegurar que el método es adecuado para el propósito previsto (European Commission, 2021).

Las técnicas analíticas más utilizadas para el control de residuos de plaguicidas incluyen la cromatografía de gases y la cromatografía líquida, frecuentemente acopladas a detectores específicos o espectrometría de masas. La elección de la técnica depende de las características fisicoquímicas de los compuestos analizados, tales como volatilidad, polaridad, estabilidad térmica y concentración esperada. Para compuestos volátiles o semivolátiles puede emplearse cromatografía de gases, mientras que, para compuestos más polares, termolábiles o de menor volatilidad resulta frecuente el uso de cromatografía líquida acoplada a detectores selectivos o espectrometría de masas.

Además del análisis instrumental, resulta necesario considerar parámetros de validación o desempeño del método, como límite de detección, límite de cuantificación, linealidad, precisión, exactitud, recuperación e incertidumbre de medición. La guía SANTE 11312/2021 de la Comisión Europea establece procedimientos de control de calidad analítica y validación de métodos para el análisis de residuos de plaguicidas en alimentos y piensos, y se utiliza como referencia para laboratorios que generan datos destinados al control de cumplimiento de LMR

(European Commission, 2021).

Por lo tanto, la determinación de residuos de plaguicidas en uvas de vinificación debe apoyarse en un procedimiento integral que incluya muestreo representativo, conservación adecuada, preparación controlada de la muestra, análisis cromatográfico y validación del método. Estos elementos permiten interpretar los resultados con mayor solidez y compararlos de manera confiable con los límites máximos de residuos establecidos por las normativas correspondientes.

3.3 Importancia del cumplimiento de las normativas para la exportación de vinos

El cumplimiento de las normativas sobre residuos de plaguicidas es un requisito esencial para la comercialización de productos vitivinícolas en mercados nacionales e internacionales. En el caso de los productos destinados a exportación, la materia prima debe cumplir con los estándares del mercado de destino, ya que los países importadores pueden realizar controles oficiales y aplicar medidas restrictivas cuando se detectan residuos por encima de los límites permitidos.

Para la vitivinicultura mendocina, esta situación resulta especialmente relevante debido al peso de la provincia en la producción nacional de uvas y vinos. La presencia de residuos por encima de los LMR en uvas destinadas a vinificación puede generar consecuencias comerciales, tales como observaciones regulatorias, rechazo de partidas, exigencia de controles adicionales o pérdida de confianza por parte de compradores e importadores.

No obstante, la interpretación de un incumplimiento debe realizarse de manera precisa. Una muestra que supera el LMR de un mercado determinado no necesariamente incumple todas las normativas existentes. Por ello, es necesario especificar el destino o marco normativo utilizado para la comparación. Esta

aclaración resulta fundamental para evitar conclusiones generales no respaldadas y para orientar adecuadamente las recomendaciones del estudio.

El control de residuos también contribuye a fortalecer la trazabilidad del sistema productivo. Cuando los resultados se relacionan con información de campo, como zona de producción, viñedo, variedad, sistema de manejo, fecha de aplicación y período de carencia, es posible identificar puntos críticos y proponer acciones correctivas. Entre estas acciones se encuentran la capacitación del personal, la revisión de programas fitosanitarios, la selección de principios activos compatibles con los mercados de destino y el fortalecimiento de los sistemas de monitoreo.

En síntesis, las regulaciones sobre residuos de plaguicidas constituyen un componente central de la seguridad alimentaria y de la competitividad vitivinícola. Para este trabajo, la comparación de los residuos detectados con los LMR nacionales e internacionales permitirá evaluar el grado de conformidad de las muestras analizadas y discutir sus posibles implicancias para la producción de uvas de vinificación en Mendoza.

Capítulo IV: Técnicas Analíticas Aplicadas

4.1 Técnicas de Análisis de Residuos de Plaguicidas

El análisis de residuos de plaguicidas en productos agroalimentarios constituye una herramienta fundamental para verificar el cumplimiento de los límites máximos de residuos (LMR) establecidos por las normativas nacionales e internacionales. En el caso de las uvas destinadas a vinificación, estas determinaciones permiten evaluar si la materia prima cumple con los criterios de inocuidad exigidos y si las concentraciones detectadas se encuentran dentro de los valores permitidos para los mercados de destino.

La determinación de residuos de plaguicidas requiere métodos analíticos sensibles, selectivos y reproducibles, capaces de detectar compuestos presentes en bajas concentraciones. Para ello, se emplean técnicas cromatográficas que permiten separar, identificar y cuantificar los analitos presentes en la muestra. Entre las técnicas más utilizadas se encuentran la cromatografía de gases (GC) y la cromatografía líquida de alta resolución o alta performance (HPLC), frecuentemente acopladas a detectores específicos o a espectrometría de masas.

La selección de la técnica analítica depende de las características fisicoquímicas de los compuestos evaluados, como volatilidad, polaridad, estabilidad térmica, peso molecular y concentración esperada. Los compuestos más volátiles o semivolátiles suelen analizarse mediante cromatografía de gases, mientras que los compuestos más polares, termolábiles o de menor volatilidad suelen requerir cromatografía líquida. En ambos casos, el objetivo es obtener resultados confiables que puedan compararse con los LMR establecidos por las normativas correspondientes.

Además de la etapa instrumental, el análisis de residuos comprende otras

fases críticas, como la toma de muestra, conservación, homogeneización, extracción, limpieza del extracto, calibración del equipo e interpretación de los resultados. Cada una de estas etapas puede influir en la exactitud del resultado final, por lo que debe realizarse siguiendo protocolos validados o metodologías reconocidas. En el análisis multiresiduo de plaguicidas, uno de los enfoques ampliamente utilizados es el método QuEChERS, que consiste en una extracción con acetonitrilo y una etapa de partición o limpieza destinada a obtener extractos aptos para análisis cromatográfico (Association of Official Analytical Collaboration [AOAC International], 2007).

4.1.1 Cromatografía de Gases (GC)

La cromatografía de gases (GC) es una técnica de separación en la cual la fase móvil es un gas y la separación se lleva a cabo dentro de una columna cromatográfica. De acuerdo con la International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC), la cromatografía es un método físico de separación en el que los componentes de una mezcla se distribuyen entre una fase estacionaria y una fase móvil que se desplaza en una dirección determinada (International Union of Pure and Applied Chemistry [IUPAC], s.f.-a). En el caso específico de la cromatografía de gases, la fase móvil corresponde a un gas, también denominado gas portador (IUPAC, s.f.-b).

En esta técnica, la muestra se introduce en el sistema cromatográfico, se volatiliza y es transportada por el gas portador a través de una columna que contiene una fase estacionaria. Durante el recorrido por la columna, los compuestos se separan según sus propiedades fisicoquímicas, principalmente volatilidad, afinidad por la fase estacionaria y tiempo de retención. Como cada compuesto interactúa de manera diferente con la columna, abandona el sistema en tiempos distintos, generando señales que pueden ser registradas por un detector.

En el análisis de residuos de plaguicidas, la cromatografía de gases resulta útil para compuestos volátiles o semivolátiles, siempre que sean térmicamente estables en las condiciones de análisis. Puede acoplarse a distintos detectores, como el detector de captura de electrones (ECD) o la espectrometría de masas (MS). El detector ECD presenta elevada sensibilidad para compuestos con afinidad electrónica, mientras que el acoplamiento GC-MS aporta mayor especificidad, ya que permite confirmar la identidad de los analitos mediante información relacionada con su masa y patrones de fragmentación.

La aplicación de GC en estudios de residuos permite detectar y cuantificar plaguicidas compatibles con esta técnica, siempre que el método haya demostrado sensibilidad, selectividad y reproducibilidad adecuadas. En aquellos casos en que los compuestos presentan baja volatilidad, inestabilidad térmica o mayor polaridad, puede resultar más apropiado utilizar cromatografía líquida o aplicar procedimientos de derivatización, según las características del analito y del método validado por el laboratorio.

4.1.2 Cromatografía Líquida de Alta Resolución (HPLC)

La cromatografía líquida es una técnica de separación en la cual la fase móvil es un líquido. Según la IUPAC, la cromatografía líquida puede realizarse en columna o en plano, y cuando emplea partículas pequeñas y presiones de entrada relativamente elevadas se denomina cromatografía líquida de alta performance o alta resolución (HPLC) (IUPAC, s.f.-c).

En la HPLC, la muestra es introducida en una corriente de fase móvil líquida que atraviesa una columna rellena con una fase estacionaria. Los compuestos presentes en la muestra se separan según su interacción diferencial con la fase móvil

y la fase estacionaria. Aquellos analitos que presentan mayor afinidad por la fase estacionaria permanecen más tiempo retenidos, mientras que los que interactúan preferentemente con la fase móvil eluyen antes. Esta diferencia en los tiempos de retención permite separar los componentes de la mezcla.

La HPLC resulta especialmente útil para analizar compuestos de baja volatilidad, mayor polaridad o limitada estabilidad térmica, que no son adecuados para cromatografía de gases. En el análisis de residuos de plaguicidas, esta técnica puede acoplarse a detectores ultravioleta-visible, detectores de arreglo de diodos (DAD) o espectrometría de masas. El acoplamiento con espectrometría de masas, especialmente LC-MS/MS, permite aumentar la sensibilidad y especificidad del análisis, lo cual resulta relevante para detectar residuos en concentraciones bajas.

En el presente estudio, la selección de la técnica cromatográfica dependió de las características fisicoquímicas de cada principio activo y del método aplicado por el laboratorio. En el presente estudio, los cuatro principios activos evaluados: dimetoato, ometoato, benomilo-carbendazima y tiofanato-metilo, fueron analizados mediante cromatografía líquida acoplada a espectrometría de masas (HPLC-MS/MS), técnica seleccionada por el laboratorio actuante debido a la polaridad y limitada volatilidad de estos compuestos, que los hace poco compatibles con una determinación directa por cromatografía de gases. El equipamiento de GC-ECD disponible en el laboratorio no fue aplicado a los principios activos específicos de este estudio.

4.2 Validación de Métodos Analíticos

La validación de un método analítico es el proceso mediante el cual se demuestra que una metodología es adecuada para el propósito previsto. En el análisis

de residuos de plaguicidas, la validación permite asegurar que los resultados obtenidos sean confiables, reproducibles y aptos para ser comparados con los LMR establecidos por las normativas vigentes.

Entre los principales parámetros de validación se encuentran la selectividad, linealidad, exactitud, precisión, límite de detección (LOD), límite de cuantificación (LOQ), recuperación, repetibilidad, reproducibilidad e incertidumbre de medición. Estos parámetros permiten evaluar el desempeño del método y determinar si la técnica utilizada es adecuada para detectar y cuantificar los analitos en la matriz estudiada.

La exactitud expresa la proximidad entre el resultado obtenido y un valor de referencia aceptado. En los estudios de residuos, suele evaluarse mediante ensayos de recuperación, en los que una muestra es fortificada con cantidades conocidas del analito y luego analizada para determinar qué proporción se recupera durante el proceso analítico. La precisión, por su parte, expresa el grado de concordancia entre resultados independientes obtenidos bajo condiciones definidas, y puede evaluarse mediante la desviación estándar relativa (RSD) en ensayos repetidos.

La linealidad permite verificar que la respuesta instrumental sea proporcional a la concentración del analito dentro de un rango de trabajo determinado. Para ello se utilizan curvas de calibración, elaboradas a partir de estándares de concentración conocida. El límite de detección (LOD) corresponde a la menor concentración que puede ser detectada por el método, aunque no necesariamente cuantificada con exactitud. El límite de cuantificación (LOQ) corresponde a la menor concentración que puede cuantificarse con un nivel aceptable de precisión y exactitud.

La guía SANTE/12682/2019 establece criterios de control de calidad analítica y validación de métodos para el análisis de residuos de plaguicidas en alimentos y

piensos. Entre otros aspectos, contempla requisitos vinculados con recuperación, precisión, calibración, confirmación de identidad, controles de calidad y expresión de resultados. Por su parte, Codex Alimentarius establece criterios de desempeño para métodos de análisis aplicados a residuos de plaguicidas, incluyendo parámetros como especificidad, exactitud, precisión, límite de detección, límite de cuantificación y recuperación (Codex Alimentarius Commission, 2017; European Commission, 2021).

Los análisis fueron efectuados por un laboratorio privado externo, contratado por el establecimiento productor propietario de los viñedos evaluados, cuya identidad se mantiene bajo reserva de confidencialidad (ver Capítulo V, sección 5.5). Por lo tanto, el presente trabajo no incluyó el desarrollo ni la validación de un método analítico propio, sino la interpretación de resultados emitidos por dicho laboratorio. Los parámetros específicos de desempeño analítico: límite de detección, límite de cuantificación, recuperación, repetibilidad, incertidumbre, curvas de calibración y controles de calidad, no fueron provistos por el laboratorio, y no fue posible confirmar que este cuente con acreditación formal bajo la norma ISO/IEC 17025 u otra norma equivalente. Esta ausencia de verificación independiente constituye una limitación metodológica relevante del estudio, que se retoma en el Capítulo VII. En consecuencia, los resultados fueron utilizados tal como fueron informados por el laboratorio, sin aplicar correcciones adicionales por recuperación o incertidumbre.

4.3 Importancia de las Técnicas Analíticas en la Seguridad Alimentaria

Las técnicas analíticas aplicadas al control de residuos de plaguicidas cumplen un rol central en la seguridad alimentaria, ya que permiten verificar si los alimentos cumplen con los requisitos establecidos por las normativas nacionales e internacionales. En el caso de la vitivinicultura, el análisis de residuos en uvas permite evaluar la calidad e inocuidad de la materia prima y anticipar posibles problemas de

cumplimiento antes de la elaboración o comercialización del producto final.

El uso de técnicas cromatográficas sensibles y métodos validados contribuye a detectar residuos incluso en concentraciones bajas. Esta información resulta útil para interpretar el cumplimiento de los LMR, identificar posibles puntos críticos en el manejo fitosanitario y orientar acciones correctivas cuando se detectan concentraciones cercanas o superiores a los límites permitidos.

Además, la calidad de los datos analíticos resulta fundamental para la toma de decisiones. Un resultado de laboratorio no solo depende del equipo utilizado, sino también de la representatividad de la muestra, la correcta preparación, la calibración, la validación del método y los controles de calidad aplicados. Por ello, la interpretación de los resultados debe considerar tanto la concentración detectada como la confiabilidad del procedimiento analítico.

En síntesis, la cromatografía de gases, la cromatografía líquida y la validación de métodos analíticos constituyen herramientas esenciales para el control de residuos de plaguicidas en uvas de vinificación. Su aplicación permite generar información objetiva para evaluar el cumplimiento normativo, fortalecer la trazabilidad, proteger la salud de los consumidores y sostener la competitividad de los productos vitivinícolas en mercados cada vez más exigentes.

Capítulo V: Materiales y Métodos

5.1 Tipo de Investigación: Aplicada y Cuantitativa

Este estudio se clasifica como una investigación aplicada, dado que se centra en resolver un problema concreto: la posible presencia de residuos de pesticidas en uvas de vinificación provenientes de diferentes zonas de Mendoza, y como cuantitativa, ya que se basa en la obtención de datos numéricos mediante técnicas cromatográficas validadas.

El enfoque cuantitativo de esta investigación es crucial para asegurar la objetividad y reproducibilidad de los resultados, lo cual es especialmente importante cuando se trata de evaluar la seguridad alimentaria y la calidad de productos destinados al consumo humano.

5.2 Diseño Experimental

El diseño experimental se estructuró como un muestreo estratificado por zona vitivinícola, considerando tres regiones diferenciadas de Mendoza: Valle de Uco, Luján de Cuyo y Maipú. Estas zonas productoras son reconocidas por su relevancia en la producción de vinos de alta calidad, y fueron seleccionadas porque representan la diversidad de condiciones agroecológicas de Mendoza; es decir, tienen diferencias en la altitud, el tipo de suelo y el clima que pueden influir en la presencia y concentración de residuos de pesticidas. Por ello, dentro de cada zona, se seleccionaron viñedos representativos de diferentes altitudes, sistemas de manejo de plagas y variedades de uva cultivadas.

Las muestras recolectadas fueron analizadas en el laboratorio para determinar la presencia de los principios activos seleccionados y evaluar el cumplimiento de los límites máximos de residuos (LMR) establecidos por normativas internacionales.

5.2.1 Selección de viñedos

Los viñedos considerados para el estudio presentan características diversas que permiten obtener una muestra representativa de la producción vitivinícola de Mendoza. Se seleccionaron 3 viñedos en Valle de Uco, 2 en Luján de Cuyo y 3 en Maipú. La selección respondió a criterios de:

- variedad cultivada,
- sistema de manejo fitosanitario (convencional u orgánico),
- accesibilidad,
- representatividad productiva.

En el Valle de Uco, los viñedos se encuentran a altitudes que van de los 900 a 1.500 metros sobre el nivel del mar, lo cual favorece una alta concentración de compuestos aromáticos en las uvas. Esta zona es conocida por la producción de vinos de alta gama, especialmente de la variedad Malbec, que se destaca por su color intenso y sus aromas frutales.

En Luján de Cuyo, los viñedos se ubican a una altitud media de 900 metros, en suelos aluviales que proporcionan buen drenaje y fertilidad. Esta región es una de las más tradicionales en la producción de vinos en Argentina, y se especializa en variedades tintas como Malbec, Cabernet Sauvignon y Bonarda. Maipú, en cambio, se encuentra a una altitud menor y tiene suelos más arenosos, lo que influye en el perfil de los vinos de la zona.

5.2.2 Variables del estudio

A partir del diseño experimental descrito, se identifican las variables del estudio. Las variables independientes corresponden a la zona vitivinícola de procedencia y al sistema de manejo del viñedo; las variables dependientes son las concentraciones de residuos de cada principio activo determinadas analíticamente; y

las variables derivadas surgen de la comparación de dichas concentraciones con la normativa vigente. La Tabla 1 sintetiza su tipo, definición operacional y escala de medición.

Tabla 1

Variables del estudio: tipo y definición operacional

Variable	Tipo	Definición operacional	Escala / valores posibles
Zona vitivinícola	Independiente	Procedencia de la muestra	Valle de Uco, Luján de Cuyo, Maipú
Sistema de manejo	Independiente	Tipo de manejo del viñedo	Orgánico / Convencional
Concentración de dimetoato	Dependiente	Residuo detectado en la muestra (HPLC-MS/MS)	ppm (mg/kg)
Concentración de ometoato	Dependiente	Residuo detectado en la muestra (HPLC-MS/MS)	ppm (mg/kg)
Concentración de benomilo-carbendazima	Dependiente	Residuo detectado en la muestra (HPLC-MS/MS)	ppm (mg/kg)
Concentración de tiofanato-metilo	Dependiente	Residuo detectado en la muestra (HPLC-MS/MS)	ppm (mg/kg)
Cumplimiento de LMR	Derivada	Comparación con la normativa vigente	Cumple / No cumple
Presencia de residuos	Derivada	Detección analítica	Sí / No
Frecuencia de detección	Derivada	Proporción de muestras positivas	%

Nota. Elaboración propia.

5.3 Protocolo de Muestreo

El muestreo se realizó mediante un muestreo estratificado aleatorio dentro de cada viñedo. El procedimiento fue:

1. En cada viñedo se delimitaron 5 parcelas independientes (réplicas biológicas).
2. En cada parcela se seleccionaron 10 plantas, registrando su ubicación por georreferenciación o cuartel y número de hilera.
3. De cada planta se recolectaron 3 racimos representativos de diferentes partes al momento de madurez tecnológica, es decir, cuando el contenido de azúcar (°Brix) era el adecuado para la vinificación según la variedad analizada.
4. Cada muestra se recolectó manualmente, cortando cada racimo con tijeras de

poda y colocándolos en bolsas estériles identificadas con información sobre la ubicación, la variedad de uva, la fecha de recolección, y las condiciones de manejo del viñedo.

Así, de cada viñedo se generaron 5 muestras compuestas (5 réplicas biológicas).

La toma de muestra antes descrita se llevó a cabo siguiendo un protocolo estandarizado que incluye la selección aleatoria de racimos y el uso de materiales esterilizados para prevenir la contaminación cruzada (referencias del método). Así se garantiza la representatividad, trazabilidad e integridad de las muestras, y sobre todo la fiabilidad de los resultados.

5.4 Transporte, Acondicionamiento y Almacenamiento de Muestras

Una vez recolectadas, las bolsas identificadas con las muestras de uvas fueron transportadas al laboratorio en condiciones controladas para evitar cualquier degradación de los compuestos presentes. Las muestras se mantuvieron a una temperatura baja (4°C) durante el transporte para minimizar la degradación de los pesticidas y asegurar su estabilidad.

En el laboratorio, se realizó:

- inspección visual,
- homogeneización de la muestra mediante mixer/molino, procedimiento llevado a cabo por el laboratorio contratado como parte de su proceso interno de preparación de muestras. El detalle técnico específico de dicho procedimiento (marca, modelo y protocolo de homogeneización) no fue divulgado por la empresa prestadora, dado el carácter confidencial de su método analítico interno,
- almacenamiento a -20°C hasta el momento del análisis.

Este proceso de acondicionamiento y almacenamiento es esencial para

garantizar la calidad y la reproducibilidad de los resultados analíticos.

5.5 Equipamiento y Laboratorio

El análisis de residuos de pesticidas se realizó en un laboratorio privado, contratado por el establecimiento productor propietario de los viñedos evaluados, cuya identidad se mantiene bajo reserva de confidencialidad en el presente trabajo. No fue posible confirmar que dicho laboratorio cuente con acreditación formal bajo la norma ISO/IEC 17025 u otra norma de acreditación equivalente, lo cual constituye una limitación metodológica del estudio detallada en el Cap. VII, 7.5 (Limitaciones del estudio). Tampoco fueron informados por el laboratorio actuante la marca y el modelo específicos del equipamiento utilizado:

- Cromatógrafo de gases equipado con un detector de captura de electrones (GC-ECD): marca, modelo y especificaciones de columna no divulgados por el laboratorio.
- Cromatógrafo líquido de alta resolución acoplado a un detector de diodos y un espectrómetro de masas (HPLC-DAD/MS): marca, modelo y especificaciones de columna no divulgados por el laboratorio.
- Software de procesamiento: no divulgado por el laboratorio.

El análisis de residuos de pesticidas se realizó utilizando las técnicas cromatográficas mencionadas, ya que estas técnicas permitieron la detección, identificación y cuantificación de los residuos de pesticidas presentes en las muestras de uva, incluso en concentraciones muy bajas, lo cual es esencial para garantizar el cumplimiento de los límites máximos de residuos establecidos por normativas internacionales.

El cromatógrafo de gases equipado con detector de captura de electrones (GC-ECD) fue empleado para la detección de residuos de pesticidas que presentan una

alta afinidad electrónica, mientras que el HPLC-MS se utilizó para la detección de los principios activos objeto de este estudio: benomilo, carbendazima, dimetoato, ometoato y tiofanato-metilo. Estos compuestos, debido a su baja volatilidad o mayor polaridad, requieren técnicas como la cromatografía líquida acoplada a espectrometría de masas para su adecuada identificación y cuantificación.

5.5.1 Condiciones cromatográficas

El laboratorio contratado, de carácter privado, no proporcionó el detalle específico de los parámetros instrumentales empleados en el análisis de las muestras, por tratarse de información propietaria de su sistema de calidad. En consecuencia, se presentan a continuación las condiciones cromatográficas de referencia reportadas en metodologías validadas y publicadas para matrices de uva bajo criterios equivalentes (SANTE/12682/2019 e ISO/IEC 17025), a modo de marco técnico orientativo y no como parámetros exactos utilizados por el laboratorio actuante.

GC-ECD (valores de referencia para columnas capilares tipo 5%-fenil-metilpolisiloxano, según métodos publicados para organofosforados en matrices frutihortícolas):

- Temperatura inicial: 80–100 °C; rampa: 10–15 °C/min; temperatura final: 260–280 °C.
- Volumen de inyección: 1–2 µL, modo splitless.
- Gas portador: He o N₂, 1–1,5 mL/min.

HPLC-MS/MS (según Banerjee et al., 2007, para matriz de uva):

- Fase móvil A: agua + 0,1 % ácido fórmico; fase B: acetonitrilo.
- Gradiente de elución de tipo lineal, con incremento progresivo de fase orgánica sobre un tiempo de corrida de 20–30 min.

- Flujo: 0,3–0,4 mL/min (columnas C18 de uso estándar en LC-MS/MS).

5.5.2 Validación analítica

Los ensayos fueron realizados por el laboratorio privado contratado (identidad bajo reserva de confidencialidad, ver 5.5), cuyo sistema de calidad declara aplicar los criterios de la guía **SANTE/12682/2019** para la validación de métodos de residuos de plaguicidas. Los parámetros específicos de desempeño (linealidad, LOD/LOQ, recuperación y repetibilidad obtenidos para esta corrida analítica) no fueron provistos por el laboratorio, y no fue posible confirmar la acreditación formal del mismo bajo ISO/IEC 17025 u otra norma equivalente. El presente trabajo no desarrolló ni validó un método propio, sino que utilizó los resultados informados por dicho laboratorio tal como fueron entregados, sin aplicar correcciones adicionales por recuperación o incertidumbre.

5.6 Análisis de Residuos de Pesticidas (GC y HPLC)

Los datos obtenidos del análisis cromatográfico fueron procesados con el software provisto por el laboratorio contratado; su nombre y versión específicos no fueron divulgados, en línea con la reserva de información técnica ya señalada en 5.5. El software permitió la integración de los picos cromatográficos y la cuantificación de los residuos presentes en las muestras.

Para cada muestra, se realizaron al menos tres inyecciones (réplicas analíticas), y los resultados se expresaron como la media $\pm$ la desviación estándar de las concentraciones obtenidas.

Los resultados se compararon con las tablas de referencia de LMR establecidos por normativas nacionales (SENASA) e internacionales, incluyendo el *Codex Alimentarius*, la normativa de la Unión Europea (Reglamento (CE) N.º 396/2005) y los estándares establecidos por la Environmental Protection Agency de

los Estados Unidos (40 CFR Parte 180), organismo competente para fijar tolerancias de residuos según se detalla en el Cap. III, 3.1.2.

Este análisis permitió evaluar el cumplimiento de los estándares de seguridad alimentaria vigentes en los principales mercados internacionales, y determinar si era necesario implementar medidas correctivas en los viñedos estudiados.

5.7 Análisis Estadístico

El diseño estadístico principal se estructuró en torno a un **factor Zona vitivinícola (3 niveles)**, dado que fue la única variable con réplicas independientes a nivel de viñedo en las tres zonas. Se evaluaron los supuestos de normalidad (Shapiro–Wilk) y homogeneidad de varianzas (Levene) para las concentraciones de cada principio activo; cuando se cumplieron, se aplicó **ANOVA de una vía** seguido de la prueba post-hoc de **Tukey ($\alpha = 0.05$)**; en caso contrario, se utilizó la alternativa no paramétrica de **Kruskal–Wallis**.

Dado que el sistema de manejo orgánico estuvo representado por un único viñedo (5 réplicas biológicas), anidado dentro de la zona Valle de Uco, la comparación entre manejo orgánico y convencional se presenta con carácter descriptivo y exploratorio, sin inferencia estadística formal de tipo factorial, dado que no constituye una réplica verdadera del tratamiento a nivel de unidad experimental (pseudorreplicación). Esta limitación se explicita como parte de las limitaciones metodológicas del estudio.

Los valores no detectados (por debajo del límite de detección, 0,001 ppm) se imputaron como **LOD/2** para su inclusión en los análisis estadísticos, siguiendo el criterio establecido por la guía SANTE/12682/2019.

Tabla 2 *Plan de trabajo*

Período	Objetivo principal	Actividades específicas	Productos esperados	Observaciones metodológicas
ene-24	Planificar y delimitar el estudio	- Revisión bibliográfica y actualización del marco teórico. - Definición de objetivos, hipótesis y variables de estudio. - Selección de fincas y criterios de representatividad (zona, variedad, manejo, etc.). - Diseño del protocolo de muestreo y análisis.	Protocolo metodológico aprobado por el tutor y factible de ejecutar.	Asegurar la coherencia entre los objetivos y las variables seleccionadas. Georreferenciar las fincas elegidas.
feb-24	Ajustar el diseño y preparar el trabajo de campo	- Contacto con productores y coordinación logística. - Revisión de equipamiento, materiales y condiciones de conservación de muestras. - Capacitación o prueba piloto del muestreo (si aplica). - Ejecución del muestreo según protocolo. - Registro de datos de campo (condiciones climáticas, fenología, manejo del viñedo, etc.).	Plan de campo operativo y validado.	Se recomienda realizar una prueba piloto para detectar posibles desvíos en el muestreo.
Marzo – Abril 2024	Recolectar material vegetal representativo	- Codificación, conservación y transporte adecuado de las muestras. - Preparación y acondicionamiento de muestras. - Determinación de residuos de plaguicidas mediante técnicas cromatográficas. - Calibración de equipos y controles de calidad. - Carga y validación de datos analíticos.	Muestras correctamente recolectadas y registradas. Base de datos de campo consolidada.	Mantener trazabilidad completa de cada muestra. Utilizar planillas digitales o apps para registro en campo.
Mayo – Junio 2024	Desarrollar los análisis de laboratorio	- Tratamiento estadístico y gráfico de los datos. - Análisis comparativo entre fincas y variables. - Elaboración de interpretaciones preliminares. - Revisión y discusión con el tutor.	Resultados analíticos preliminares y base de datos validada.	Incluir controles internos y replicados. Documentar todo el procedimiento analítico.
Julio – Agosto 2024	Procesar e interpretar los resultados		Informe parcial de resultados con interpretación inicial.	Emplear herramientas estadísticas apropiadas y justificar el enfoque de análisis (ANOVA, PCA, etc.).

sep-24	Redactar capítulos de resultados y discusión	- Redacción formal de los capítulos "Resultados" y "Discusión". - Contrastación con antecedentes bibliográficos. - Incorporación de figuras y tablas finales. - Elaboración de capítulos "Introducción", "Materiales y Métodos" y "Conclusiones preliminares". - Ajustes de formato y citación según normas institucionales.	Capítulos de resultados y discusión revisados y coherentes.	Aplicar un enfoque crítico y analítico, no meramente descriptivo.
oct-24	Redactar la introducción y metodología final	- Revisión del tutor y ajustes de redacción. - Incorporación de observaciones y correcciones. - Verificación de referencias y anexos. - Presentación final al comité evaluador o dirección académica. - Elaboración del resumen ejecutivo.- Preparación de defensa oral (si aplica).	Documento completo en primera versión.	Mantener consistencia terminológica y claridad en la secuencia metodológica.
nov-24	Revisión integral y corrección del manuscrito		Versión final corregida del trabajo de tesis.	Revisar coherencia interna (objetivos– resultados– conclusiones).
dic-24	Presentación y cierre del trabajo		Tesis final presentada y lista para evaluación.	Archivar todos los datos y respaldos en formato digital.

Nota. Elaboración propia.

Capítulo VI: Resultados y Discusión

6.1 Presentación de los datos obtenidos

En este estudio se analizaron n=40 muestras de uvas de vinificación provenientes de distintos viñedos de la provincia de Mendoza para evaluar la presencia de residuos de pesticidas seleccionados.

Tabla 3. *Distribución de viñedos, réplicas y manejo por zona vitivinícola*

Zona	Viñedo	Manejo	Réplicas biológicas	Total muestras por zona
Valle de Uco	1	Orgánico	5	15
Valle de Uco	2, 3	Convencional	5 c/u	
Luján de Cuyo	1, 2	Convencional	5 c/u	10
Maipú	1, 2, 3	Convencional	5 c/u	15
Total	8 viñedos	1 orgánico / 7 convencional	—	40

Nota. Elaboración propia.

Se cuantificaron los principios activos Dimetoato, Ometoato, Benomilo-Carbendazima y Tiofanato-metilo mediante cromatografía líquida acoplada a espectrometría de masas (HPLC-MS/MS). Los resultados se presentan agrupados por principio activo y nivel de concentración, comparándolos con los límites máximos de residuos (LMR) establecidos por normativas nacionales e internacionales.

De las 40 muestras analizadas, 10 muestras, es decir solo un 25%, presentaron residuos detectables de al menos uno de los pesticidas estudiados (ver Tabla 5).

6.1.1 Concentraciones de pesticidas en las muestras analizadas

En los análisis de residuos de pesticidas realizados sobre las 40 muestras de

uva vinificada (Tabla 3), se detectaron concentraciones variables de los principios activos estudiados.

En el caso del Dimetoato, se registraron niveles detectables en las muestras 4, 17, 22, 28, 30, 32, 36, 37 y 38 (ver Tabla 5). Las concentraciones encontradas oscilaron entre 0,001 ppm y 0,005 ppm, lo que indica que todas estuvieron por encima del límite de cuantificación (LC = 0,001 ppm).

Respecto al Ometoato, se detectaron residuos en las muestras 4, 17, 20, 28, 30, 32, 36, 37 y 38 (no se detectó en la muestra 22, que sí presentó Dimetoato). Las concentraciones observadas variaron entre 0,001 ppm y 0,016 ppm.

En cuanto a Benomilo y su metabolito activo Carbendazima, ambos fueron identificados únicamente en la muestra 20 en consonancia a aplicaciones de plaguicidas constituidos con dicho principio. La concentración de Carbendazima fue de 0,002 ppm, lo que implica una detección por encima del LC. Esta concentración sugiere un uso moderado o una posible degradación parcial del compuesto previo al muestreo.

Por otro lado, el Tiofanato-metilo no fue detectado en ninguna de las muestras analizadas en concentraciones superiores al límite de detección, lo cual es un indicador favorable de buenas prácticas agrícolas respecto al uso de este principio activo en los viñedos evaluados.

Estos resultados reflejan la importancia de contar con técnicas analíticas de alta sensibilidad que permitan detectar residuos incluso por debajo de los límites máximos de residuos (LMR), lo cual contribuye a la evaluación detallada del cumplimiento de las normas de seguridad alimentaria.

Cabe mencionar que, aunque no se pudo confirmar con certeza si en todos los casos se respetaron estrictamente los períodos de carencia exigidos para los

principios activos analizados, sí se informó que la recolección de las muestras se realizó conforme a las fechas establecidas para cada período de carencia. A modo de referencia, los períodos de carencia registrados para estos compuestos en el cultivo de vid son de 21 días para Dimetoato, aproximadamente 30 días para Ometoato, entre 21 y 30 días para Benomilo, 14 a 21 días para Carbendazima, y entre 14 y 21 días para Tiofanato-metilo. Sin embargo, es posible que factores como aplicaciones no declaradas, desincronización en los registros, o contaminación cruzada hayan influido en la presencia de residuos por encima del límite de cuantificación.

Tabla 4 *Períodos de carencia para principios activos en vid.*

Principio activo	Tipo de pesticida	Período de carencia (días)	Fuente
Dimetoato	Insecticida	21 días	SENASA (2026); EU Pesticides Database
Ometoato	Insecticida	30 días*	SENASA (2026)
Benomilo	Fungicida	21–30 días	<i>Codex Alimentarius</i> (2023a)
Carbendazima	Fungicida	14–21 días	SENASA (2023); <i>Codex Alimentarius</i> (2023a)
Tiofanato-metilo	Fungicida	14–21 días	SENASA (2023); EU Pesticides Database

Nota. Elaboración propia a partir de datos de SENASA (2026) y *Codex Alimentarius* (2023a). Períodos expresados en días.

6.1.2 Comparación con los límites máximos de residuos (LMR)

Los resultados se compararon con los LMR establecidos por los mercados evaluados tales como la Unión Europea, Estados Unidos, Chile, Brasil, Argentina, Reino Unido, *Codex* y Canadá el *Codex Alimentarius*. En general, la mayoría de las muestras analizadas cumplieron con los LMR, excepto las muestras 28 y 30, que presentaron concentraciones de Ometoato superiores a los límites permitidos para algunos mercados, como la Unión Europea, Argentina y Chile.

En las muestras 28 y 30, se detectaron niveles de Ometoato de 0,016 ppm y

0,012 ppm respectivamente, que superan los LMR para destino extranjero, limitando la capacidad de exportación a esos mercados. Esto subraya la necesidad de mejorar el manejo de plagas en algunos viñedos para cumplir con los estándares internacionales.

Tabla 5 *Concentración de residuos por muestra positiva y principio activo, comparado con límites máximos de residuos (LMR)*

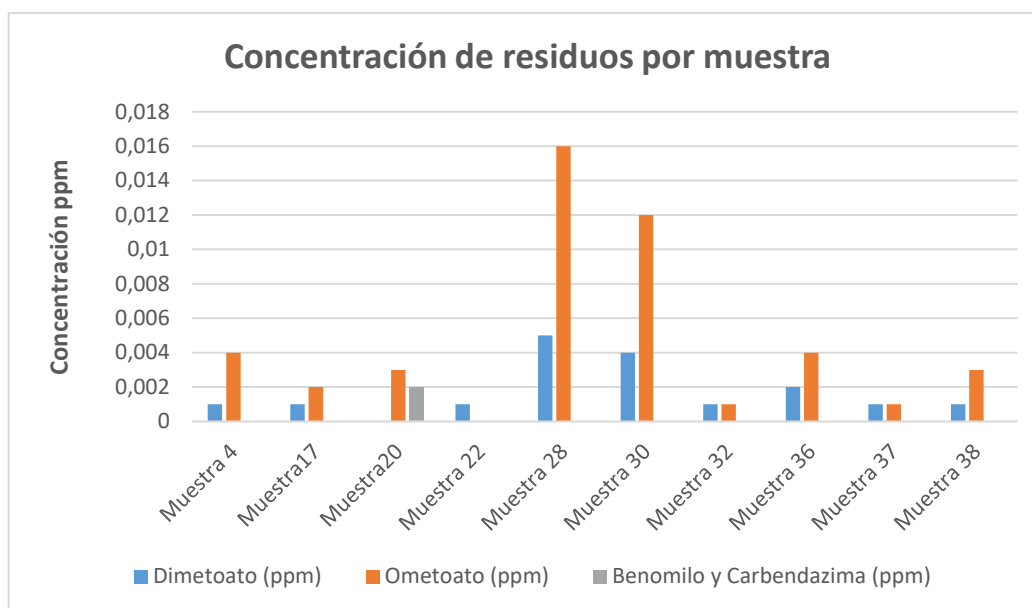
Muestra	Zona	Dimetoato (ppm)	Ometoato (ppm)	Benomilo-Carbendazima (ppm)	LMR UE	LMR Codex*
4	Valle de Uco	0.001	0.004	—	Sí	N/A*
17	Luján de Cuyo	0.001	0.002	—	Sí	N/A*
20	Luján de Cuyo	—	0.003	0.002	Sí	N/A*
22	Luján de Cuyo	0.001	—	—	Sí	N/A*
28	Maipú	0.005	0.016	—	No	N/A*
30	Maipú	0.004	0.012	—	No	N/A*
32	Maipú	0.001	0.001	—	Sí	N/A*
36	Maipú	0.002	0.004	—	Sí	N/A*
37	Maipú	0.001	0.001	—	Sí	N/A*
38	Maipú	0.001	0.003	—	Sí	N/A*

Nota. Límite de detección (LD): 0.001 ppm. Límite de cuantificación (LC): 0.001 ppm para todos los principios activos analizados; el laboratorio informó un valor único de LC para el conjunto de analitos, sin especificar si fue determinado de forma individual por principio activo, lo cual constituye una limitación asociada a la reserva de información técnica del laboratorio (ver Cap. V, 5.5). La columna “LMR UE” evalúa el cumplimiento contra los límites de la Unión Europea vigentes al momento de este trabajo: 0,010 mg/kg para la suma de dimetoato y ometoato, y 0,500 mg/kg para benomilo-carbendazima (en transición hacia 0,01 mg/kg; ver Cap. III, 3.1.2).

*La columna “LMR Codex” se informa como N/A porque, a la fecha de este trabajo, Codex Alimentarius no cuenta con un CXL vigente para dimetoato, ometoato ni benomilo-carbendazima en uva: no existen CXL para los dos primeros, y los CXL históricos del segundo grupo fueron revocados en noviembre de 2025 (ver Cap. III, 3.1.2). Para el detalle de cumplimiento contra los ocho mercados comparados (incluyendo Argentina/SENASA, Estados Unidos, Chile, Brasil,

Reino Unido y Canadá), ver Cap. VI, 6.1.2. Elaboración propia con datos del análisis de residuos

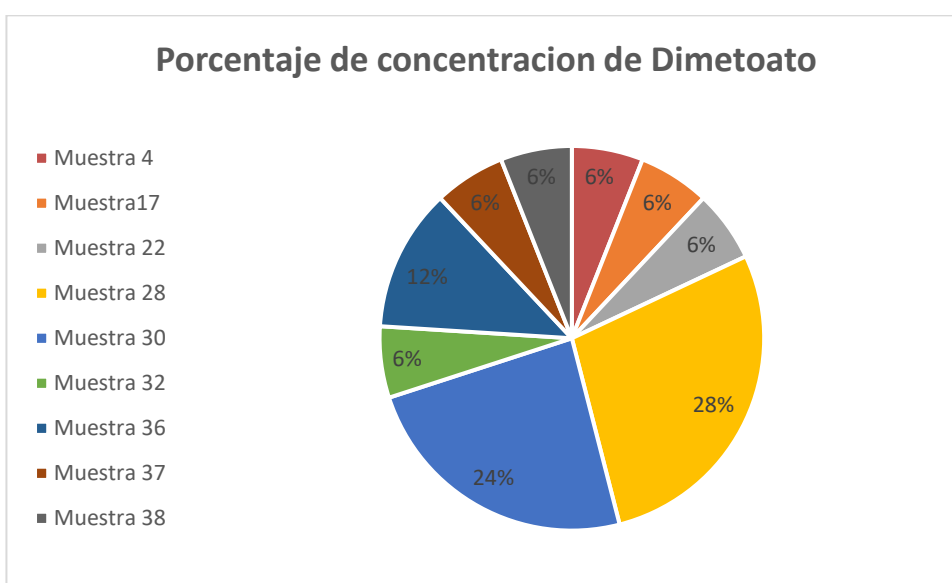
Figura 6 Concentración de Residuos por Muestra



Nota. Elaboración propia con datos del análisis de residuos

Nota. El laboratorio contratado informó únicamente el valor medio de las inyecciones analíticas por muestra, sin los valores individuales de réplica; por esa razón no fue posible calcular ni representar barras de error (desviación estándar) en este gráfico, lo cual constituye una limitación metodológica ya señalada en el Capítulo V (5.5).

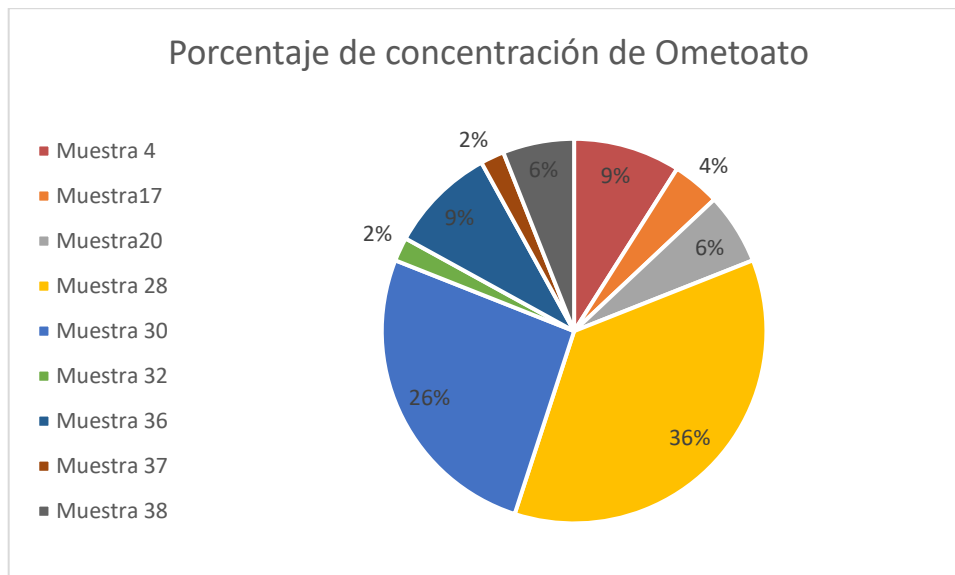
Figura 7 Porcentaje de concentración de Dimetoato en las Muestras



Nota. Elaboración propia con datos del análisis de residuos. *La escala de colores identifica la*

zona de origen de cada muestra: rojo = Valle de Uco, verde = Luján de Cuyo, celeste = Maipú, siguiendo el mapeo de zonas de la Tabla 5.

Figura 8 Porcentaje de Concentración de Ometoato en las Muestras



Nota. Elaboración propia con datos del análisis de residuos. *La escala de colores identifica la zona de origen de cada muestra: rojo = Valle de Uco, verde = Luján de Cuyo, celeste = Maipú, siguiendo el mapeo de zonas de la Tabla 5.*

6.2 Análisis e interpretación de los resultados

Los resultados muestran una considerable variación en la concentración de residuos de pesticidas entre las diferentes muestras y zonas. Cabe señalar que, dentro del Valle de Uco, la única muestra con residuos detectables (muestra 4) correspondió al viñedo de manejo orgánico, mientras que los viñedos convencionales de esa zona no presentaron detecciones. Por tratarse de un único viñedo orgánico ($n = 1$), este resultado no permite establecer una diferencia entre manejo orgánico y convencional y debe interpretarse con cautela (ver 6.3.2 y Cap. V, 5.7). Por lo tanto, si bien las prácticas sostenibles —como el manejo integrado de plagas (MIP) y la producción orgánica— constituyen estrategias recomendables para reducir la presencia de residuos, el diseño de este estudio no permite cuantificar su efecto, lo

que se retoma como línea de trabajo futura.

6.2.1 Evaluación del cumplimiento de las normativas

La evaluación del cumplimiento de las normativas internacionales sobre residuos de pesticidas es esencial para garantizar la seguridad alimentaria y la calidad del vino producido en Mendoza. La mayoría de las muestras cumplieron con los LMR establecidos, lo cual es alentador para la industria vitivinícola de la región. Sin embargo, los casos en los que se superaron los LMR, como en las muestras 28 y 30, destacan la necesidad de seguir mejorando las prácticas agrícolas para reducir el uso de pesticidas y cumplir con los requisitos de los mercados internacionales.

El cumplimiento de los LMR es crucial para acceder a mercados con regulaciones estrictas, como la Unión Europea, Estados Unidos, entre otros. Los resultados de este estudio proporcionan una base sólida para la implementación de medidas correctivas en los viñedos y para el desarrollo de estrategias que promuevan el uso responsable de pesticidas.

6.2.2 Identificación de patrones según zonas de producción

Las 40 muestras analizadas en este estudio provinieron de tres regiones vitivinícolas destacadas de la provincia de Mendoza: Valle de Uco, Maipú y Luján de Cuyo. A continuación, se describen las características de cada una de ellas y se detallan los resultados correspondientes.

Las muestras N° 1 a 15 fueron recolectadas en viñedos del Valle de Uco. La muestra N° 1 corresponde al viñedo con certificación orgánica (muestras 1 a 5); las muestras 6 a 15 corresponden a los dos viñedos de manejo convencional de la zona. De las 15 muestras de esta zona, solo la muestra 4 —perteneciente al viñedo orgánico— presentó residuos detectables (Dimetoato 0,001 ppm; Ometoato 0,004 ppm), ambos dentro de los LMR. La presencia de residuos en una muestra de un

viñedo certificado como orgánico no invalida la certificación, pero amerita una lectura cuidadosa: podría explicarse por deriva de aplicaciones en predios linderos de manejo convencional, contaminación cruzada durante el transporte o procesamiento, u otras causas no determinadas en este estudio; no se cuenta con evidencia suficiente para atribuir el resultado a una causa específica. Las 14 muestras restantes de la zona no presentaron residuos detectables.

Las muestras N° 26 a 40 fueron recolectadas en viñedos de Maipú, una zona donde las condiciones agroecológicas favorecen el desarrollo de plagas, lo que podría implicar una mayor presión para el uso de pesticidas convencionales. Esta zona concentró la mayor cantidad de muestras con residuos detectables (6 de 15): las muestras 32, 36, 37 y 38 dentro de los LMR, y las muestras 28 y 30 con concentraciones de Ometoato que superaron los LMR de varios mercados (0,016 ppm y 0,012 ppm respectivamente). Las nueve muestras restantes de la zona no presentaron residuos detectables.

Las muestras n.° 16 a 25 fueron obtenidas de viñedos ubicados en Luján de Cuyo. De estas, las muestras 17, 20 y 22 presentaron residuos detectables: la muestra 17 (Dimetoato 0,001 ppm; Ometoato 0,002 ppm), la muestra 20 (Ometoato 0,003 ppm; Benomilo-Carbendazima 0,002 ppm) y la muestra 22 (Dimetoato 0,001 ppm), todas dentro de los LMR correspondientes. Las siete muestras restantes de la zona no presentaron residuos detectables.

Considerando el conjunto de las 40 muestras, se observa una mayor proporción de detecciones en Maipú (6/15, 40 %) respecto de Luján de Cuyo (3/10, 30 %) y Valle de Uco (1/15, 7 %). Esta tendencia es consistente con la hipótesis de una mayor presión fitosanitaria en la zona de Maipú; sin embargo, la prueba de Kruskal-Wallis aplicada no encontró diferencias estadísticamente significativas entre

zonas (Dimetoato: $H = 5,27$, $p = 0,072$; Ometoato: $H = 4,62$, $p = 0,099$), probablemente debido al tamaño de muestra reducido y a la elevada proporción de valores no detectados. Por lo tanto, el patrón observado debe interpretarse como una tendencia descriptiva y no como una diferencia estadísticamente confirmada entre zonas.

Cabe aclarar que este estudio no registró el varietal específico de cada muestra dentro de cada viñedo, por lo que no es posible evaluar si las diferencias observadas en la concentración de residuos están asociadas a características varietales (por ejemplo, grosor de cáscara o duración del ciclo de cultivo) en lugar del manejo fitosanitario. Esta limitación se retoma en el Capítulo VII.

La correlación observada sugiere que las decisiones en el manejo fitosanitario inciden de forma directa en la presencia de residuos en el producto final. En este sentido, es importante considerar que cada principio activo estudiado posee dosis recomendadas específicas por el proveedor, así como períodos de carencia mínimos que deben respetarse para asegurar la inocuidad del producto

- **Dimetoato:** La dosis recomendada para vid es de 1 a 1,5 litros por hectárea, con un volumen de aplicación de entre 500 y 1000 litros de agua por hectárea. Debe aplicarse como máximo una vez por ciclo, con un período de carencia mínimo de 21 días (Summit Agro, 2023).
- **Ometoato:** Este compuesto no se aplica directamente, sino que es un metabolito del Dimetoato. Sin embargo, en productos donde se usa Ometoato como ingrediente activo, la dosis recomendada varía entre 0,5 a 1 litro por hectárea, con un período de carencia de 30 días (SENASA, 2023).
- **Benomilo:** Aunque su uso está restringido en muchos países, las dosis históricas recomendadas eran de 0,5 a 1 kg por hectárea, con aplicaciones preventivas y un período de carencia de 21 a 30 días.

- **Carbendazima:** Se recomienda aplicar entre 0,5 a 1 litro por hectárea en vid, con un intervalo de seguridad de 21 días, aunque su uso también ha sido restringido en algunos mercados.
- **Tiofanato-metilo:** La dosis sugerida para vid es de 1 a 1,5 kg por hectárea, con un período de carencia de 21 días.

Los casos en los que se superaron los LMR, como en las muestras 28 y 30, podrían deberse a una sobredosificación, a una aplicación inadecuadamente próxima a la cosecha o incluso a contaminación cruzada con otros cultivos cercanos. La falta de registros precisos en algunos viñedos limita una conclusión definitiva, pero resalta la necesidad de capacitar al personal en buenas prácticas agrícolas, seguir los prospectos técnicos y realizar auditorías de campo para evitar este tipo de desviaciones.

La información obtenida sugiere una posible asociación entre el origen de las muestras, las prácticas de manejo agrícola implementadas y la presencia de residuos de pesticidas en uvas de vinificación, aunque sin alcanzar significancia estadística en el conjunto de datos analizado (ver párrafo anterior). Esta observación continúa siendo relevante para orientar la trazabilidad y la seguridad alimentaria de los productos destinados a mercados locales e internacionales, y amerita profundizarse en estudios futuros con un tamaño de muestra mayor.

6.3 Discusión sobre los hallazgos

Los resultados de este estudio evidencian la necesidad de seguir promoviendo prácticas agrícolas sostenibles en la viticultura de Mendoza. La presencia de residuos de pesticidas en algunas muestras por encima de los LMR sugiere que aún hay áreas donde se debe mejorar el manejo de plagas para cumplir con los estándares internacionales de seguridad alimentaria.

6.3.1 Comparación con antecedentes científicos

Los hallazgos de este estudio pueden contextualizarse con antecedentes de monitoreo de residuos de plaguicidas en uva y vino. Un estudio reciente que analizó vinos de distintos orígenes sudamericanos, incluyendo Mendoza, mediante cromatografía líquida acoplada a espectrometría de masas en tándem, cuantificó carbendazima entre solo tres de trece plaguicidas evaluados, lo cual es coherente con la baja frecuencia de detección de compuestos del grupo benzimidazol observada en el presente trabajo (una única muestra positiva de 40) (Fernandes Pinheiro et al., 2025).

En cuanto a la interpretación de la carbendazima como metabolito, un estudio centroeuropeo que comparó viñedos de manejo orgánico y convencional detectó carbendazima en una muestra de vino atribuible a la degradación de tiofanato-metilo presente en la misma muestra, lo que respalda directamente el criterio adoptado en este trabajo de no atribuir la presencia de carbendazima a una única causa sin evidencia de aplicación directa (Schusterova et al., 2021).

Respecto de dimetoato y ometoato, un estudio de monitoreo en uva de mesa realizado en Túnez sobre 64 muestras recolectadas entre 2015 y 2017 encontró superaciones de los LMR de la Unión Europea en el 94 % de las muestras, con dimetoato y ometoato entre los principios activos asociados a superaciones de la dosis de referencia aguda (Bouagga et al., 2019). La frecuencia de detección considerablemente mayor a la observada en este trabajo (25 % del total de muestras) sugiere un menor uso de organofosforados o un mayor respeto de los períodos de carencia en los viñedos evaluados en Mendoza, aunque una comparación directa requeriría estandarizar el diseño de muestreo entre ambos estudios.

En cuanto a la magnitud de las concentraciones, evaluaciones de campo del

Joint FAO/WHO Meeting on Pesticide Residues en uva reportaron residuos de dimetoato de entre 0,11 y 1,2 mg/kg bajo condiciones de aplicación autorizadas (JMPR, 1998). Las concentraciones detectadas en el presente estudio (0,001–0,005 ppm) resultan entre uno y dos órdenes de magnitud inferiores a esos valores de referencia, lo cual es consistente con una aplicación distante de la cosecha o con un cumplimiento adecuado de los períodos de carencia en la mayoría de los viñedos evaluados.

6.3.2 Relación entre prácticas agrícolas y residuos detectados

La relación entre las prácticas agrícolas aplicadas en los distintos viñedos y la presencia de residuos de pesticidas en las muestras analizadas debe interpretarse con cautela, dado el tamaño de muestra por zona y la representación limitada del manejo orgánico en el diseño del estudio (un único viñedo, ver Cap. V, 5.7).

En el Valle de Uco, el único viñedo de manejo orgánico (muestras 1 a 5) presentó una muestra con residuos detectables en concentraciones bajas (muestra 4), mientras que las cuatro réplicas restantes no presentaron residuos. Dado que se trata de un único viñedo ($n = 1$), este resultado no permite generalizar sobre la eficacia del manejo orgánico frente al convencional en la zona; se presenta con carácter descriptivo, tal como se especificó en la sección de análisis estadístico (Cap. V, 5.7).

En Maipú, las muestras 28 y 30, las únicas que superaron los LMR en todo el estudio, provienen de esta zona, lo que es consistente con la mayor proporción de detecciones observada (6 de 15 muestras). Sin embargo, la prueba de Kruskal-Wallis no encontró diferencias estadísticamente significativas entre zonas ($p = 0,072$ para Dimetoato; $p = 0,099$ para Ometoato), por lo que esta observación debe tratarse como una tendencia y no como una diferencia confirmada. En Luján de Cuyo, tres de las diez muestras presentaron residuos detectables (17, 20 y 22), todos dentro de los

LMR correspondientes.

En conjunto, estos hallazgos sugieren una posible asociación entre la zona de producción y la presencia de residuos, coherente con la hipótesis de una mayor presión fitosanitaria en Maipú, pero esta asociación no alcanza significancia estadística en el presente estudio y debe confirmarse con un tamaño de muestra mayor y una representación más equilibrada de los distintos sistemas de manejo en futuras investigaciones.

6.3.3 Implicancias para la exportación de vinos

Las implicancias de estos resultados para la exportación de vinos de Mendoza son significativas. El cumplimiento de los Límites Máximos de Residuos (LMR) es un requisito indispensable para ingresar y mantenerse en los principales mercados internacionales, particularmente aquellos con regulaciones más estrictas como la Unión Europea, Estados Unidos, Canadá y Reino Unido. En estos destinos, la fiscalización del cumplimiento de normas de inocuidad alimentaria es rigurosa, y cualquier excedente en los niveles permitidos puede implicar la retención, decomiso o rechazo de lotes enteros de exportación, afectando no solo a la bodega exportadora, sino también a la reputación del país productor.

En este contexto, los casos en los que se detectaron concentraciones de residuos por encima de los LMR, como ocurrió con las muestras 28 y 30 (Ometoato), representan un riesgo real y concreto para la comercialización internacional de vino elaborado con esas uvas. El incumplimiento de los estándares exigidos puede derivar en sanciones comerciales, imposibilidad de ingreso al país de destino e incluso la inclusión del país o región en listas de vigilancia fitosanitaria, lo que impacta de manera negativa sobre la imagen de la industria vitivinícola local y genera pérdidas económicas significativas.

Además, a nivel logístico y administrativo, una partida rechazada en destino implica costos adicionales de almacenamiento, destrucción o reexportación, junto con la necesidad de realizar auditorías correctivas por parte de los organismos reguladores locales. Este tipo de situaciones también puede generar tensiones contractuales con importadores y distribuidores, afectando la continuidad de los vínculos comerciales a mediano y largo plazo.

Por estas razones, se vuelve imperioso fortalecer los controles en la aplicación de agroquímicos, promover el uso racional de pesticidas, y fomentar buenas prácticas agrícolas como el manejo integrado de plagas (MIP) o la transición hacia sistemas de producción orgánica o sustentable. Asimismo, es clave implementar sistemas de trazabilidad a nivel predial, que permitan identificar el origen de los residuos en caso de incidentes, y mejorar la capacitación del personal técnico y operarios encargados de las aplicaciones fitosanitarias.

En definitiva, garantizar que la uva de vinificación cumpla con los requisitos internacionales no solo mejora la seguridad alimentaria y la calidad del producto final, sino que fortalece la competitividad del vino argentino en el mercado global, contribuyendo a sostener y expandir el prestigio alcanzado por Mendoza como una de las regiones vitivinícolas más reconocidas del hemisferio sur.

Retomando los objetivos específicos planteados para este estudio: (1) se cuantificó la concentración de los cuatro principios activos seleccionados en las 40 muestras de uvas de vinificación analizadas; (2) se compararon las concentraciones detectadas con los LMR establecidos por normativas nacionales e internacionales, identificando dos muestras (28 y 30) que superan el LMR de Omatoato en varios de los mercados evaluados; (3) se identificó una tendencia descriptiva de mayor presencia de residuos en la zona de Maipú respecto de Luján de Cuyo y Valle de Uco,

sin alcanzar significancia estadística (Kruskal-Wallis, $p > 0,05$); y (4) a partir de estos hallazgos, en el Capítulo VII se proponen recomendaciones orientadas a fortalecer el monitoreo de residuos y las prácticas agrícolas del sector.

Capítulo VII: Conclusiones

7.1 Cumplimiento de los objetivos del estudio

Objetivo general. "Evaluar la presencia de residuos de dimetoato, ometoato, benomilo-carbendazima y tiofanato-metilo en uvas de vinificación provenientes de distintas zonas productivas de la provincia de Mendoza, mediante técnicas cromatográficas, con el fin de determinar su grado de cumplimiento respecto de los límites máximos de residuos establecidos por normativas nacionales e internacionales." Cumplido: se analizaron 40 muestras de las tres zonas mediante HPLC-MS/MS (Cap. V, 5.6) y sus resultados se compararon sistemáticamente con los LMR vigentes en ocho mercados de destino (Cap. III, 3.1; Cap. VI, 6.1.2).

Objetivo específico 1. "Cuantificar la concentración de los principios activos seleccionados en 40 muestras de uvas de vinificación provenientes de la provincia de Mendoza." Cumplido: se cuantificaron los cuatro principios activos en las 40 muestras; 10 de ellas (25 %) presentaron residuos detectables de al menos un compuesto (Cap. VI, 6.1.1 y Tabla 5).

Objetivo específico 2. "Comparar las concentraciones detectadas con los límites máximos de residuos establecidos por normativas nacionales e internacionales aplicables." Cumplido: se compararon los resultados con los LMR de Argentina, la Unión Europea, Estados Unidos, Codex Alimentarius, Chile, Brasil, Reino Unido y Canadá (Cap. III, 3.1). Dos muestras (28 y 30, 5 % del total) superaron el LMR de ometoato en varios de estos mercados (Cap. VI, 6.1.2).

Objetivo específico 3. "Identificar posibles diferencias en la presencia de residuos según la zona de producción de las muestras analizadas." Cumplido parcialmente: se identificó una mayor proporción de detecciones en Maipú (6 de 15 muestras) frente a Luján de Cuyo (3 de 10) y Valle de Uco (1 de 15), pero la prueba

de Kruskal-Wallis no encontró diferencias estadísticamente significativas entre zonas ($p = 0,072$ para dimetoato; $p = 0,099$ para ometoato) (Cap. VI, 6.2.2). El objetivo se cumplió en su dimensión descriptiva, aunque el tamaño de muestra por zona no permitió confirmar la diferencia mediante inferencia estadística formal.

Objetivo específico 4. "Proponer recomendaciones orientadas a fortalecer el monitoreo de residuos, mejorar las prácticas agrícolas y contribuir a una vitivinicultura más segura y sostenible." Cumplido: a partir de los hallazgos anteriores se formularon cuatro recomendaciones específicas, detalladas en la sección 7.4, orientadas al control fitosanitario en Maipú, el fortalecimiento del monitoreo, la capacitación de productores y la investigación de alternativas al uso convencional de plaguicidas.

En conjunto, el cumplimiento de estos cuatro objetivos específicos permite dar por alcanzado el objetivo general del estudio, con la salvedad estadística señalada en el objetivo específico 3, que constituye a la vez una limitación metodológica reconocida (Cap. V, 5.7; Cap. VII, 7.5) y una línea de trabajo para futuras investigaciones con mayor tamaño de muestra y representación equilibrada de sistemas de manejo.

7.2 Resumen de los principales hallazgos

El presente estudio evaluó la presencia de pesticidas en uvas de vinificación provenientes de la provincia de Mendoza, utilizando técnicas avanzadas de cromatografía para la detección y cuantificación de residuos. Los resultados indican que la mayoría de las muestras analizadas presentaron niveles de residuos de pesticidas por debajo de los límites máximos de residuos (LMR) establecidos por las normativas nacionales e internacionales. Sin embargo, algunas muestras excedieron estos límites, lo cual resalta la necesidad de una supervisión más estricta y la mejora en las prácticas de manejo de plagas.

Entre los pesticidas analizados, el Dimetoato y el Ometoato presentaron residuos detectables en algunas muestras, siendo el ometoato el que presentó concentraciones superiores a los LMR en el 5 % de los casos. En cuanto al Benomilo-Carbendazima, las concentraciones encontradas estuvieron dentro de los límites permitidos, mientras que el Tiofanato-metilo no fue detectado por encima del límite de cuantificación en ninguna de las muestras. Estos resultados sugieren la necesidad de revisar y ajustar el uso de ciertos pesticidas para garantizar la seguridad de los productos vitivinícolas y cumplir con los estándares internacionales.

Aunque los niveles de residuos detectados en la mayoría de las muestras fueron bajos, la presencia de pesticidas, incluso en concentraciones mínimas, puede generar preocupaciones entre los consumidores y reguladores. Por ello, se recomienda implementar un monitoreo constante y optimizar las prácticas agrícolas para reducir aún más la presencia de residuos.

7.3 Impacto del estudio en la viticultura de Mendoza

Este estudio destaca la necesidad de seguir promoviendo prácticas agrícolas sostenibles en la viticultura de Mendoza. El único viñedo de manejo orgánico evaluado en este estudio mostró una baja presencia de residuos (una muestra positiva de cinco, en concentración traza y dentro de los LMR), lo cual es alentador, pero no permite, por sí solo, afirmar una diferencia estadísticamente significativa frente a los viñedos de manejo convencional, dado que se trata de una única unidad experimental bajo manejo orgánico (ver limitación metodológica en Cap. V, 5.7, y Cap. VI, 6.3.2). Esto subraya la importancia de seguir explorando estrategias de manejo que minimicen el uso de pesticidas, idealmente con diseños futuros que incluyan mayor representación de viñedos orgánicos, y que permitan reducir su impacto en la calidad del vino y en el medio ambiente.

El cumplimiento de los LMR es fundamental para garantizar la seguridad alimentaria y la competitividad de los vinos mendocinos en los mercados internacionales. Los resultados de este estudio pueden servir de base para la implementación de medidas correctivas y para el desarrollo de estrategias que permitan reducir aún más la presencia de pesticidas en los productos vitivinícolas de la región. Además, se resalta la importancia de un monitoreo constante y riguroso para garantizar la conformidad con las normativas internacionales y la protección de la salud de los consumidores.

Si bien el impacto ambiental y social del uso de pesticidas, incluyendo posibles efectos sobre la biodiversidad, la salud de los trabajadores agrícolas o la percepción de los consumidores constituye una dimensión relevante para el sector. Estos aspectos exceden el alcance de los datos relevados en este estudio, que se limitó a la cuantificación de residuos en la materia prima. Se sugiere que futuros trabajos aborden estas dimensiones de forma específica.

7.4 Recomendaciones para el sector vitivinícola

1. **Fortalecimiento del control fitosanitario en Maipú y seguimiento del caso del viñedo orgánico de Valle de Uco:** dado que las dos muestras que superaron los LMR (28 y 30) provienen de Maipú, se recomienda priorizar en esa zona el control de la dosificación y de los períodos de carencia de Dimetoato y Ometoato. Asimismo, dado que el único viñedo de manejo orgánico evaluado presentó residuos traza en una de sus cinco muestras, se recomienda dar seguimiento a esta observación puntual (posible deriva de aplicaciones vecinas) antes de generalizar conclusiones sobre la eficacia del manejo orgánico frente al convencional, dado que el estudio evaluó un único viñedo bajo este sistema. De manera más general, se recomienda seguir explorando el manejo integrado de plagas y la agricultura orgánica

como estrategias de reducción de residuos, con un diseño experimental que incluya mayor representación de viñedos orgánicos en futuros estudios.

2. **Fortalecimiento de los programas de monitoreo y control de residuos:** es esencial fortalecer los programas de monitoreo de residuos de pesticidas en los viñedos para garantizar que los productos cumplan con los límites máximos establecidos. Esto incluye la implementación de análisis periódicos de residuos en las uvas y el vino, así como la formación de los productores en el uso adecuado de productos fitosanitarios. Un monitoreo más riguroso permitirá identificar rápidamente cualquier problema y tomar medidas correctivas antes de que los productos lleguen al mercado. Además, el establecimiento de sistemas de trazabilidad para los productos vitivinícolas ayudaría a garantizar la transparencia y la confianza de los consumidores.

3. **Capacitación y concienciación de los productores:** se recomienda proporcionar capacitación a los productores vitivinícolas sobre el uso adecuado de pesticidas y la importancia del cumplimiento de las normativas internacionales. Concienciar sobre el impacto de los pesticidas en la calidad del vino y en la salud del consumidor es clave para lograr un cambio en las prácticas de manejo de plagas. Además, se debe fomentar la participación de los productores en programas de certificación que promuevan prácticas agrícolas sostenibles, lo cual puede abrir nuevas oportunidades de mercado y mejorar la imagen de los vinos de Mendoza.

4. **Investigación y desarrollo de alternativas al uso de pesticidas convencionales:** es necesario continuar investigando y desarrollando alternativas al uso de pesticidas convencionales, como el empleo de biopesticidas y la mejora genética de las vides para incrementar su resistencia natural a las plagas. Estas alternativas pueden contribuir a una producción más segura y sostenible, alineada

con las expectativas de los consumidores y los estándares internacionales. La investigación también debe enfocarse en la identificación de métodos que permitan reducir la dependencia de insumos externos, promoviendo un enfoque más autosuficiente y resiliente para la producción vitivinícola.

5. Colaboración entre instituciones y actores del sector: para lograr una reducción significativa en el uso de pesticidas y mejorar las prácticas agrícolas, es crucial fomentar la colaboración entre instituciones gubernamentales, centros de investigación y actores del sector vitivinícola. La creación de programas de asistencia técnica y financiamiento para la adopción de tecnologías más limpias puede ser fundamental para facilitar la transición hacia prácticas más sostenibles. Además, la colaboración con organismos internacionales puede ayudar a mantener actualizadas las normativas y garantizar el acceso a los últimos avances en técnicas de manejo de plagas y tecnologías analíticas.

En conjunto, este estudio ofrece una base concreta para la gestión de residuos de pesticidas en la viticultura de Mendoza: cuantificó los niveles de dimetoato, ometoato, benomilo-carbendazima y tiofanato-metilo en 40 muestras, identificó los dos casos que superan los LMR internacionales, y señaló una tendencia, no significativa estadísticamente, hacia una mayor presencia de residuos en Maipú. El fortalecimiento del monitoreo, la capacitación de los productores y la investigación de alternativas al uso convencional de pesticidas, detallados en las recomendaciones de 7.4, constituyen los próximos pasos concretos para sostener la competitividad y la inocuidad de los vinos de Mendoza en los mercados internacionales.

7.5 Limitaciones del estudio

Las siguientes limitaciones metodológicas, ya señaladas en los capítulos correspondientes, se consolidan aquí como referencia para la interpretación correcta

de los resultados y para orientar líneas de trabajo futuras:

6. **Acreditación del laboratorio no confirmada:** el laboratorio privado contratado no reveló si cuenta con acreditación formal bajo ISO/IEC 17025 u otra norma equivalente, lo cual impide una verificación independiente del aseguramiento de calidad del proceso analítico (Cap. IV, 4.2; Cap. V, 5.5).

7. **Parámetros instrumentales no divulgados:** las condiciones cromatográficas específicas (marca y modelo de equipos, columnas, programas de temperatura y gradientes) no fueron informadas por el laboratorio; se presentaron valores de referencia bibliográfica en su lugar (Cap. V, 5.5.1).

8. **Ausencia de datos de réplica analítica:** el laboratorio informó únicamente el valor medio de las inyecciones analíticas por muestra, sin los valores individuales, lo que impidió calcular medidas de dispersión (DE/EE) o barras de error (Cap. VI, Figura 6).

9. **Pseudorreplicación en la comparación de manejo orgánico:** el manejo orgánico estuvo representado por un único viñedo (5 réplicas biológicas), por lo que la comparación con el manejo convencional se presenta con carácter descriptivo y no admite inferencia estadística formal (Cap. V, 5.7; Cap. VI, 6.3.2).

10. **Variabilidad varietal no controlada:** no se registró el varietal específico de cada muestra dentro de cada viñedo, por lo que no puede descartarse que parte de la variabilidad observada responda a características varietales en lugar de al manejo fitosanitario (Cap. VI, 6.2.2).

11. **Tamaño de muestra limitado para inferencia por zona:** con $n=15$, 10 y 15 muestras por zona, la prueba de Kruskal-Wallis no alcanzó significancia estadística ($p > 0,05$) pese a observarse una tendencia descriptiva; un tamaño de muestra mayor permitiría una conclusión más robusta (Cap. VI, 6.2.2).

Índice de Figuras

Figura 1 Estructura química del Benomilo.....	33
Figura 2 Estructura química de la Carbendazima.....	33
Figura 3 Estructura química del Dimetoato	34
Figura 4 Estructura química del Ometoato.....	35
Figura 5 Estructura química del Tiofanato-metilo	36
Figura 6 Concentración de residuos por muestra.....	71
Figura 7 Porcentaje de concentración de Dimetoato en las muestras	71
Figura 8 Porcentaje de concentración de Ometoato en las muestras.....	72

Índice de Tablas

Tabla 1 Variables del estudio: tipo y definición operacional	59
Tabla 2 Plan de trabajo	65
Tabla 3 Distribución de viñedos, réplicas y manejo por zona vitivinícola	67
Tabla 4 Períodos de carencia para principios activos en vid	69
Tabla 5 Concentración de residuos por muestra positiva y principio activo, comparado con límites máximos de residuos (LMR)	70

ANEXOS

Anexo 1: Glosario de Términos Técnicos

Este glosario incluye definiciones breves de los términos técnicos más relevantes utilizados a lo largo del trabajo:

- **LMR (Límite Máximo de Residuo):** cantidad máxima de un residuo de plaguicida que legalmente puede estar presente en un alimento.
- **Pesticida:** sustancia química utilizada para prevenir, destruir o controlar plagas.
- **Organofosforado:** tipo de compuesto químico orgánico que contiene fósforo, frecuentemente utilizado como insecticida.
- **Cromatografía:** técnica analítica utilizada para separar, identificar y cuantificar componentes en una mezcla.
- **Bioacumulación:** acumulación progresiva de sustancias químicas en organismos vivos.
- **Viñedo:** terreno plantado con vides para la producción de uvas destinadas a la vinificación.

Anexo 2: Formulario de Recolección de Datos

Durante la etapa de muestreo, se empleó el siguiente modelo de formulario para registrar la información relevante de cada muestra:

- Código de muestra:
- Fecha de recolección:
- Ubicación (región y finca):
- Altitud:
- Tipo de cultivo:
- Método de producción (convencional/orgánico):

Referencias Bibliográficas

- ANVISA (Agência Nacional de Vigilância Sanitária). (2025). *Programa de Análise de Resíduos de Agrotóxicos em Alimentos (PARA)*. <https://www.gov.br/anvisa>
- AOAC International. (2007). AOAC Official Method 2007.01: Pesticide residues in foods by acetonitrile extraction and partitioning with magnesium sulfate. En *Official Methods of Analysis of AOAC International*. AOAC International.
- Argentina.gob.ar. (s.f.). *Historia de la vitivinicultura argentina*. <https://www.argentina.gob.ar>
- Banerjee, K., Oulkar, D. P., Dasgupta, S., Patil, S. B., Patil, S. H., Savant, R., & Adsule, P. G. (2007). Validation and uncertainty analysis of a multi-residue method for pesticides in grapes using ethyl acetate extraction and liquid chromatography–tandem mass spectrometry. *Journal of Chromatography A*, 1173(1–2), 98–109. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2007.10.013>
- Bouagga, A., Chaabane, H., Toumi, K., Mougou Hamdane, A., Nasraoui, B., & Joly, L. (2019). Pesticide residues in Tunisian table grapes and associated risk for consumer's health. *Food Additives & Contaminants: Part B*, 12(2), 135–144. <https://doi.org/10.1080/19393210.2019.1571532>
- Codex Alimentarius. (2023a). *Codex Texts: Maximum Residue Limits*. FAO/WHO. Recuperado de <https://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/codex-texts/maximum-residue-limits/es/>
- Codex Alimentarius. (2023b). *International Food Standards*. FAO/OMS. <http://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/home/es/>
- Codex Alimentarius Commission. (2017). *Report of the 49th session of the Codex Committee on Pesticide Residues*. FAO/OMS. <https://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/>
- Comisión Europea. (2019). *Reglamento de Ejecución (UE) 2019/1090 relativo a la no renovación de la aprobación de la sustancia activa dimetoato*. Diario Oficial de la Unión Europea.
- Comisión Europea. (2021). *Reglamento (UE) 2021/155 por el que se modifican los anexos II y III del Reglamento (CE) n.º 396/2005 en lo que respecta a los límites máximos de residuos de dimetoato y ometoato, entre otras sustancias*. Diario Oficial de la Unión Europea.
- EPA (United States Environmental Protection Agency). (s.f.-a). *Thiophanate-methyl; tolerances for residues (40 CFR § 180.371)*. <https://www.epa.gov>
- EPA (United States Environmental Protection Agency). (s.f.-b). *Pesticide product label system*. <https://www.epa.gov>
- EPA (United States Environmental Protection Agency). (2021). *Registration review: Benzimidazole fungicides (benomyl, carbendazim, thiophanate-methyl)*. <https://www.epa.gov/pesticide-reevaluation>
- European Commission. (s.f.). *EU Pesticides database*. <https://ec.europa.eu/food/plant/pesticides/eu-pesticides-database/>
- European Commission. (2021). *Guidance document on analytical quality control and method validation procedures for pesticide residues analysis in food and feed (SANTE/12682/2019, rev. 1)*. <https://food.ec.europa.eu>

- European Food Safety Authority (EFSA). (2021). *Reasoned opinion on the toxicological properties and maximum residue levels (MRLs) for the benzimidazole substances carbendazim and thiophanate-methyl*. EFSA Journal, 19(8), Artículo e06773. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2021.6773>
- European Food Safety Authority (EFSA). (2024). *Updated reasoned opinion on the toxicological properties and maximum residue levels (MRLs) for the benzimidazole substances carbendazim and thiophanate-methyl*. EFSA Journal, 22(2), Artículo e8569. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2024.8569>
- FAO. (s.f.). *Integrated Pest Management (IPM)*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <https://www.fao.org/pest-and-pesticide-management/ipm/integrated-pest-management/en/>
- Federal Register. (2002). *Thiophanate-methyl; pesticide tolerance*. U.S. Government Publishing Office. <https://www.federalregister.gov>
- Fernandes Pinheiro, D., Maciel, G. M., Lima, N. P., Mafessoni Liviz, C. do A., Folmann Lima, N., & Isidoro Haminiuk, C. W. (2025). Assessment of pesticides concentration in South American wines by liquid chromatography-tandem mass spectrometry. *Food Control*.
- Health and Safety Executive (HSE). (s.f.). *GB MRL statutory register*. <https://www.hse.gov.uk/pesticides/mrls/register.htm>
- Health Canada. (2011). *Proposed re-evaluation decision PRVD2011-07: Thiophanate-methyl*. Pest Management Regulatory Agency, Health Canada. <https://www.canada.ca/en/health-canada/services/consumer-product-safety/pesticides-pest-management/public/consultations/proposed-re-evaluation-decisions/2011/thiophanate-methyl.html>
- Health Canada. (2022). *Proposed Maximum Residue Limit PMRL2022-10, Dimethoate*. Government of Canada. <https://www.canada.ca/en/health-canada/services/consumer-product-safety/pesticides-pest-management/public/consultations/proposed-maximum-residue-limit/2022/dimethoate/document.html>
- Health Canada. (2024). *Maximum residue limits, human health, and food safety*. Government of Canada. <https://www.canada.ca/en/health-canada/services/consumer-product-safety/pesticides-pest-management/public/protecting-your-health-environment/pesticides-food/maximum-residue-limits-pesticides.html>
- Instituto Nacional de Vitivinicultura (INV). (2025a). *Informe Anuario de Superficie 2025*. <https://www.argentina.gob.ar/noticias/informe-anuario-de-superficie-2025>
- Instituto Nacional de Vitivinicultura (INV). (2025b). *Principales datos vitivinícolas*. <https://www.argentina.gob.ar/inv/estadisticas-vitivinícolas/principales-datos-vitivinícolas>
- Instituto Nacional de Vitivinicultura (INV). (2025c). *Portal institucional*. <https://www.argentina.gob.ar/inv>
- Instituto Nacional de Vitivinicultura (INV). (2025d). *INV - Actividad vitivinícola* [Conjunto de datos]. <https://datos.magyp.gob.ar/dataset/inv-actividad-vitivinicola>
- IUPAC. (s.f.-a). *Chromatography*. En IUPAC Compendium of Chemical Terminology (the Gold Book). <https://goldbook.iupac.org>
- IUPAC. (s.f.-b). *Gas chromatography*. En IUPAC Compendium of Chemical Terminology (the Gold Book). <https://goldbook.iupac.org>
- IUPAC. (s.f.-c). *Liquid chromatography*. En IUPAC Compendium of Chemical

- Terminology (the Gold Book). <https://goldbook.iupac.org>
- Joint FAO/WHO Meeting on Pesticide Residues [JMPR]. (1998). *Dimethoate, omethoate, formothion: Evaluation*. FAO.
- Ministerio de Salud de Chile. (2020). *Reglamento sanitario de los alimentos: Límites de residuos de plaguicidas*. <https://www.minsal.cl>
- OIV (Organización Internacional de la Viña y el Vino). (2025). *International standards and recommendations*. <https://www.oiv.int>
- Parlamento Europeo. (2024, 18 de septiembre). *Resolución sobre el proyecto de Reglamento de la Comisión por el que se modifican los anexos II, III y V del Reglamento (CE) n.º 396/2005 en lo que respecta a los límites máximos de residuos de benomilo, carbendazima y tiofanato-metilo*. Recuperado de <https://www.europarl.europa.eu>
- Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea. (2005). Reglamento (CE) n.º 396/2005 relativo a los límites máximos de residuos de plaguicidas en alimentos y piensos de origen vegetal y animal. *Diario Oficial de la Unión Europea*, L 70, 1–16.
- Schusterova, D., Hajslova, J., Kocourek, V., & Pulkrabova, J. (2021). Pesticide residues and their metabolites in grapes and wines from conventional and organic farming system. *Foods*, 10(2), 307. <https://doi.org/10.3390/foods10020307>
- Secretaría de Bioeconomía. (2024). *Vitivinicultura argentina*. Ministerio de Economía de la Nación. <https://www.argentina.gob.ar/economia/bioeconomia>
- SENASA. (2023). *Residuos de plaguicidas y límites máximos*. Recuperado de <https://www.argentina.gob.ar/senasa/alimentos/residuos-plaguicidas>
- SENASA. (2026). *Registro Nacional de Terapéutica Vegetal: Límites máximos de residuos permitidos*. Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agroalimentaria. <https://www.argentina.gob.ar/senasa/programas-sanitarios/productosveterinarios-fitosanitarios-y-fertilizantes/registro-nacional-de-terapeutica-vegetal>
- SENASA (Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agroalimentaria). (2010). *Resolución 934/2010: Productos y Subproductos Agropecuarios*. Boletín Oficial de la República Argentina. <https://www.argentina.gob.ar/normativa/nacional/resoluci%C3%B3n-934-2010-177593/texto>
- Summit Agro. (2023). *Ficha técnica de producto fitosanitario [Hoja de datos comercial]*. Summit Agro.
- United States Department of Agriculture, Foreign Agricultural Service (USDA-FAS). (s.f.). *Maximum Residue Limits (MRL) database*. <https://www.fas.usda.gov/maximum-residue-limits-mrl-database>
- Universidad Nacional de Cuyo (UNCUYO). (2009, 18 de junio). *Elaboraron una historia de la vitivinicultura en Mendoza*. Prensa UNCUYO. <https://www.uncuyo.edu.ar/prensa/elaboraron-una-historia-de-la-vitivinicultura-en-mendoza>