

The logo for RevICAp features a stylized rainbow arch in shades of blue and red above the text "RevICAp" in a bold, white, sans-serif font.

RevICAp

Revista de Ingeniería y Ciencias Aplicadas



UNCUYO
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE CUYO



FACULTAD DE
**CIENCIAS APLICADAS
A LA INDUSTRIA**

ISSN 2796-9444 / Num. 2. Vol. 4 -2024

INDICE

El ion manganeso como agente pro-angiogénico en la disfunción endotelial diabética	1
Módulo de rigidez del multimaterial madera-malla-adhesivo de <i>Pinus pseudostrobus</i> , <i>Tabebuia rosea</i> y <i>Quercus scytophylla</i>	11
Comportamiento de <i>Vitis vinifera</i> L. cv. Merlot bajo tres sistemas de instalación de malla antigranizo	24
Germinación de semillas de <i>Leptochloa crinita</i> bajo distintos tipos de acondicionamiento	37
Estudio de la diversidad y de la abundancia estacional de artrópodos en dos agroecosistemas y un parche biológico de monte nativo de Mendoza, Argentina	43
Síntesis y caracterización de hidrogeles compuestos de polivinil alcohol, alginato de sodio y bentonita natural para la remediación de aguas contaminadas	53
Influencia del color de las mallas antigranizo en el estado hídrico de los viñedos y la madurez de <i>Vitis vinifera</i> L. en regiones semiáridas	60
Mejora de las características finales de películas biodegradables de almidón, mediante el uso de un diseño multifactorial	71



El ion manganeso como agente pro-angiogénico en la disfunción endotelial diabética

Agustín Boixart¹, Juan Sebastián Sar², María Marta Bonaventura³, Luis Alberto Haro Durand^{4*}

1. Servicio de Ginecología y Mastología, Hospital Alemán, Avenida Pueyrredón 1640, Capital Federal (1118), Buenos Aires-Argentina.
2. Servicio de Ginecología y Obstetricia, Hospital Naval “Dr. Pedro Mallo”, Avenida Patricias Argentinas 351, Capital Federal (1405), Buenos Aires-Argentina.
3. Escuela de Ciencia y Técnica, Universidad Nacional de San Martín (UNSAM), Avenida 25 de Mayo 1169, San Martín (1650), Buenos Aires-Argentina.
4. Laboratorio de Patología y Farmacología Molecular, Instituto de Biología y Medicina Experimental (IBYME-CONICET), Vuelta de Obligado 2490, Capital Federal (1428), Buenos Aires.

*E-mail: harodurand.luis@gmail.com

PALABRAS CLAVES

Ion Manganeso (Mn²⁺)
Disfunción Endotelial
Angiogénesis
Hiperglucemia

RESUMEN

La disfunción endotelial inducida por hiperglucemia crónica es un factor clave en las complicaciones vasculares de la diabetes. En este estudio se evaluó el potencial pro-angiogénico del ion manganeso (Mn²⁺) sobre cultivos de células endoteliales humanas (HUVECs) sometidas a condiciones de hiperglucemia (30 mmol/L de D-glucosa durante 7 días). Se realizaron ensayos de proliferación, migración, tubulogénesis y análisis de la expresión de marcadores mitogénicos y apoptóticos. Los resultados mostraron que el tratamiento con 100 µmol/L de Mn²⁺ aumentó significativamente la proliferación y migración celular. Además, el ion promovió la formación de estructuras tubulares sobre Geltrex™ en condiciones de hiperglucemia, superando en un 300% la capacidad observada en normoglucemia. El tratamiento también incrementó los niveles de pERK, un marcador mitogénico y disminuyó los niveles de Bax y caspasa-3 clivada, marcadores pro-apoptóticos. En conclusión, el ion Mn²⁺ mostró potencial para revertir la disfunción endotelial y promover la angiogénesis en condiciones hiperglucémicas. Esto sugiere que el ion Mn²⁺ podría ser utilizado en estrategias terapéuticas regenerativas para enfermedades vasculares relacionadas con la diabetes.

Manganese ion as a pro-angiogenic agent in diabetic endothelial dysfunction

KEYWORDS

Manganese Ion (Mn²⁺)
Endothelial Dysfunction
Angiogenesis
Hyperglycemia

ABSTRACT

Chronic hyperglycemia-induced endothelial dysfunction is a key factor in the vascular complications of diabetes. In this study we evaluated the pro-angiogenic potential of manganese ion (Mn²⁺) on cultured human endothelial cells (HUVECs) subjected to hyperglycemia conditions (30 mmol/L D-glucose for 7 days). Proliferation, migration, tubulogenesis and analysis of the expression of mitogenic and apoptotic markers were performed. The results showed that treatment with 100 µmol/L Mn²⁺ significantly increased cell proliferation and migration. In addition, the ion promoted the formation of tubular structures on Geltrex™ under hyperglycemia conditions, exceeding by 300% the capacity observed in normoglycemia. The treatment also increased the levels of pERK, a mitogenic marker, and decreased the levels of Bax and cleaved caspase-3, pro-apoptotic markers. In conclusion, Mn²⁺ ion showed potential to reverse endothelial dysfunction and promote angiogenesis under hyperglycemic conditions. This suggests that Mn²⁺ ion could be used in regenerative therapeutic strategies for diabetes-related vascular diseases.

1. Introducción

La angiogénesis es un proceso biológico mediante el cual se forman nuevos vasos sanguíneos a partir de vasos preexistentes, y juega un papel fundamental en la reparación de tejidos, la cicatrización de heridas y el desarrollo de órganos. Además, también está involucrada en procesos patológicos como el crecimiento tumoral y las enfermedades cardiovasculares (Carmeliet, 2011; Okonkwo y DiPietro, 2017; Ambrose, 2017).

La hiperglucemia crónica es un factor clave en la disfunción endotelial observada en pacientes diabéticos (Kolluru et al., 2012; Okonkwo y DiPietro, 2017; Clyne, 2021). A concentraciones elevadas de glucosa (>25 mmol/L), las células endoteliales experimentan estrés oxidativo, disfunción mitocondrial y activación de vías de señalización proinflamatorias (Clyne, 2021; Baldassarre et al., 2021; An et al., 2023). Dicho entorno, provoca una reducción de la capacidad de proliferación y migración, junto con una alteración en la producción de factores de crecimiento, como el VEGF (factor de crecimiento endotelial vascular), y la inducción de apoptosis. Estas condiciones recrean un escenario similar al de la microangiopatía diabética (Madonna et al., 2017; Oliveira Volpe et al., 2018; Al-Kharashi, 2018).

En este sentido, el desarrollo e investigación de nuevas sustancias bioactivas que permitan restaurar la integridad vascular en pacientes diabéticos mediante la modulación del estrés oxidativo y la promoción de la angiogénesis, y que reúnan las características de ser seguras, efectivas y accesibles, constituye un área de investigación que se encuentra en crecimiento (Sena et al., 2018; Fadilah et al., 2023; Perez-Araluce et al., 2024; Jin y Kan, 2024). Los iones bioactivos son átomos o moléculas (aniones o cationes), que dentro de cierto rango de concentración tienen la capacidad de estimular respuestas celulares y moleculares clave que regulan la expresión génica, la activación de vías de señalización y el control del ciclo celular. Estos iones desempeñan un papel muy importante en una variedad de procesos fisiológicos, incluida la formación de huesos, la reparación de tejidos y la respuesta inmunológica. A menudo se incorporan en biomateriales como implantes, materiales de relleno y/o matrices biopoliméricas para mejorar sus propiedades biológicas o la interacción de los materiales con los tejidos (Mouriño et al., 2012; Lin et al., 2019; Pantulap et al., 2022).

El manganeso (Mn) es un metal de transición presente en cantidades trazas en el organismo y cumple funciones biológicas cruciales como la regulación de la glucosa en sangre, el balance energético y el desarrollo óseo. Debido a su naturaleza química, el ion Mn^{2+} actúa como cofactor esencial de la enzima mitocondrial superóxido dismutasa (MnSOD), que convierte el superóxido (O_2^-) en peróxido de hidrógeno (H_2O_2), el cual posteriormente es degradado por catalasas o peroxidasas (Culotta y Daly, 2013; Chen et al., 2015). Si bien se ha propuesto que el ion Mn^{2+} tendría función en procesos de reparación de tejidos (Hreha et al., 2015; Barrioni et al., 2019; Westhauser et al., 2020, Pantulap et al., 2022), los trabajos relacionados son escasos y aun no existen estudios que evalúen el potencial pro-angiogénico en modelos *in vitro* que reproduzcan las condiciones de hiperglucemia crónica que experimentan los pacientes diabéticos.

Dentro de este contexto, el objetivo del presente estudio fue evaluar el potencial pro-angiogénico del ion Mn^{2+} en cultivos de células endoteliales HUVECs crecidas en condiciones de hiperglucemia crónica.

2. Materiales y métodos

Cultivo de células endoteliales

Para los ensayos *in vitro* se utilizaron células endoteliales derivadas de la vena del cordón umbilical humano (HUVECs, del inglés Human Umbilical Vein Endothelial Cells). Las HUVECs fueron cultivadas entre los repiques +3 y +8 en frascos T75 (156800, Thermo Fisher Scientific) en medio M199 (M5017, Sigma-Aldrich) con 10% de suero fetal bovino (SFB) (M199+10% SFB) y 50 μ g/mL de gentamicina, suplementado con bFGF y VEGF en una concentración final de 2 ng/mL y 10 ng/mL respectivamente y mantenidas en incubadora gaseada con 5% de CO_2 en aire a 37°C.

*Establecimiento del modelo *in vitro* de hiperglucemia*

Las células HUVECs fueron sembradas en placas de cultivo de 10 mm de diámetro (664160 Grainer-Bio One) y cultivadas durante 7 días en medio de cultivo M199+10% SFB suplementado con alta concentración de glucosa (condición de hiperglucemia: HG = 30 mmol/L de D-glucosa) (608203, Sigma-Aldrich) o con baja concentración de glucosa (condición de normoglucemia: NG = 5,5 mmol/L de D-glucosa) (Ido et al., 2002; Zhang et al., 2016; Sayed et al., 2023; Wang et al., 2024). Luego de 7 días de incubación, las células fueron lavadas,

tripsinizadas, contadas en cámara de Neubauer y utilizadas para los ensayos propuestos. Como control osmótico se utilizaron células HUVECs crecidas durante 7 días con 30 mmol/L de D-manitol (M4124, Sigma-Aldrich).

Fuente de iones Mn²⁺

Como fuente de iones Mn²⁺, se utilizó cloruro de manganeso (MnCl₂) comercializado por la empresa Merck (244589, Sigma-Aldrich). Como primer paso, se obtuvo una solución stock de 100 mmol/L de MnCl₂ en H₂O destilada. A partir de esta solución se condicionó el medio de cultivo M199 en todos los ensayos. Teniendo en cuenta que la concentración de Cl⁻ en el medio de cultivo M199 base es de 0,12 mol/L, consideramos que la cantidad de Cl⁻ aportada por el MnCl₂ al medio M199 en los distintos ensayos, fue mínima y no tuvo impacto significativo en los resultados.

Ensayos de citotoxicidad

Se sembraron 10.000 células HUVECs por pocillo en placa de 96 pocillos (greiner BIO ONE 651180) en 100 µL de M199 con 2% de SFB (M199+2% SFB). Una vez alcanzada la adherencia total de las células a la superficie de los pocillos, el medio fue removido y reemplazado con medio M199+10% SFB suplementado con concentraciones crecientes de MnCl₂ entre 0 y 300 µmol/L. Luego de 24 horas se recuperaron los sobrenadantes de cultivo y los mismos se utilizaron para detectar mediante un kit comercial, lactato deshidrogenasa liberada al medio de cultivo (CyQUANTTM LDH Cytotoxicity Assay Kit, Invitrogen-C20300).

Ensayo de proliferación

Células HUVECs crecidas en condiciones de hiperglucemia fueron sembradas en placas de 96 pocillos a una densidad de 8.000 células/pocillo, en 100 µL de medio M199 con 2% de SFB. Luego de 12 horas, se removió el medio y las células fueron tratadas durante 48 horas con 150 µL de M199+10% SFB suplementado con diferentes concentraciones de MnCl₂ de entre 0 y 200 µmol/L. Luego de las primeras 24 horas, se añadieron 25 µL por pocillo de medio M199+10% SFB, conteniendo metil-[3H]-timidina a una concentración final 2,5 µCi/mL. El ensayo se detuvo a las 24 horas mediante la adición de 50 µL de cloruro de guanidinio 6M y las células se lisaron completamente mediante 3 ciclos de congelación y descongelación. El ADN celular fue recogido con filtros Whatman GFC mediante un cosechador (Cell Harvester 8, Nunc), fijado con etanol 96%, secado al aire y la radioactividad

incorporada, se determinó en presencia de 1 mL de solución centelladora (OptiPhase Hi Fase 3, Wallac Scintillation Products) en un contador de centelleo líquido (Packard 1600 TR, Canberra Company).

Ensayo de Migración

Células HUVECs/HG fueron sembradas a confluencia en placas de cultivo de 24 pocillos (greiner BIO ONE 662160) en M199 con 2% de SFB. Luego de asegurada su adherencia a la superficie de los pocillos, se realizó una “herida” con una punta de tip. Las células fueron lavadas tres veces con PBS para remover restos celulares y células desprendidas y se cultivaron durante 8 h en medio M199+10% SFB suplementado con 100 µmol/L de MnCl₂. Se tomaron imágenes fotográficas inmediatamente luego de realizada la “herida” a las 0 horas y luego de 8 horas. La migración celular fue cuantificada utilizando un analizador de imágenes (Image J). El promedio del área de la “herida” se expresó como el porcentaje de recubrimiento (% R) de 3 pocillos tratados de la misma manera usando la ecuación (1):

$$\% R = [1 - (T_t/T_0)] \times 100$$

donde T₀ es el área de la “herida” a las 0 horas y T_t es el área de la “herida” a las 8 horas. Como control absoluto se utilizaron HUVECs crecidas en condiciones de normoglucemia y como control positivo se utilizaron HUVECs crecidas en condiciones de hiperglucemia y tratadas con 10 ng/mL de VEGF.

Ensayo de tubulogénesis

Para el ensayo de tubulogénesis, 60 µL de Geltrex™, reducido en factores de crecimiento, (A1569601, Thermo Fisher Scientific) fueron colocados por pocillo en placas de 96 pocillos. Luego, la placa se incubó durante 30 minutos a 37° C para facilitar la solidificación de la matriz. Luego de la solidificación, se sembraron 10.000 células HUVECs crecidas en condiciones de hiperglucemia sobre la superficie de la matriz en 150 µL de M199+10% SFB suplementado con 100 µmol/L de MnCl₂. El ensayo fue monitoreado cada 2 horas durante un periodo de 6 horas. Al final del ensayo, las células fueron analizadas bajo microscopía óptica y se tomaron fotografías de 3 áreas dentro del pocillo. Usando el programa ImageJ se cuantificó el número de estructuras tubulares completamente formadas en cada área fotografiada. Como control absoluto se utilizaron HUVECs crecidas en condiciones de normoglucemia y como control positivo se utilizaron HUVECs crecidas en condiciones de hiperglucemia y tratadas con 10 ng/mL de VEGF.

Western blot

Monocapas de células HUVECs/HG fueron estimuladas durante 24 horas con M199+10% SFB suplementado con 100 $\mu\text{mol/L}$ de MnCl_2 . Luego de 24 horas las células fueron homogenizadas en 1X SDS sample buffer (composición: 62,5 mM Tris-HCl, 2% w/v SDS, 10% glycerol, 50 mM DTT, 0,01% w/v bromophenol blue). 30 μL de muestra fueron cargadas en un gel de poliacrilamida y corridas en buffer 0.025 M Tris, 0.192 M glicina, 0.1% SDS en una celda de electroforesis (Mini-Protean® II, Bio-Rad). Las proteínas separadas fueron transferidas a una membrana de nitrocelulosa (Hybond, Amersham Biosciences 0.45 μm RPN303D) a 100 V, durante 1 h a 4°C en una celda de transferencia electroforética (Mini-Trans-Blot, Bio-Rad). Luego de la transferencia, las membranas fueron bloqueadas 1 hora a temperatura ambiente en buffer tris con 5% (p/v) de leche descremada en polvo y 0.05 % (v/v) de Tween-20. Las membranas fueron incubadas durante toda la noche con el anticuerpo primario correspondiente anti-pERK (#9101, Cell Signaling Technology), anti-ERK (#9102, Cell Signaling Technology), anti-caspasa 3 clivada (#9661, Cell Signaling Technology), anti-caspasa 3 (sc-271028, Santa Cruz Biotechnology), anti-Bax (sc-70408, Santa Cruz Biotechnology) y anti- β -tubulin (ab179513, abcam). Como control de peso molecular se utilizó el ECL-Rainbow Marker-Full range (GERPN800E, Amersham). La detección se llevó a cabo con el anticuerpo secundario anti-conejo (PI-1000-1, Vector Laboratories) o anti-ratón (PI-2000-1, Vector Laboratories) conjugados a peroxidasa y en presencia de una solución quimioluminiscente sustrato de la peroxidasa (ECLTM, Amersham Biosciences). Como control positivo se utilizaron HUVECs crecidas en condiciones de hiperglucemia y tratadas con 10 ng/mL de VEGF.

Análisis estadístico

Todos los ensayos se realizaron por triplicado. Los resultados fueron analizados estadísticamente suponiendo un $\alpha=0,05$ y $\beta=0,10$. Para todos los datos se calculó el promedio \pm la desviación estándar. Los resultados fueron analizados mediante prueba de t-student y análisis de la varianza (ANOVA) y como prueba post-hoc se utilizó la de Bonferroni.

3. Resultados y Discusión

Rango de concentración no citotóxico del ion Mn^{2+}

Para determinar el rango de concentración no citotóxico del ion Mn^{2+} , las células HUVECs fueron

tratadas con concentraciones crecientes de MnCl_2 entre 0 y 300 $\mu\text{mol/L}$. Como se observa en la Figura 1, la actividad de LDH en el medio de cultivo permaneció invariable entre las concentraciones de 0 a 200 $\mu\text{mol/L}$ de MnCl_2 . Sin embargo, a 250 $\mu\text{mol/L}$ se observó un aumento significativo de un 25% en la actividad de LDH ($p < 0,05$) tras 24 horas de tratamiento. Con base en estos resultados, se definió como rango de concentración no citotóxico para el ion Mn^{2+} aquel entre 0 y 200 $\mu\text{mol/L}$. Este intervalo se encontró por debajo de las concentraciones citotóxicas descritas en bibliografía y por encima de la concentración normal de Mn^{2+} en sangre (Milatovic et al., 2007; Peres et al., 2013; O'Neal & Zheng, 2015). Este ensayo muestra que el ion Mn^{2+} es bien tolerado por las células HUVECs en concentraciones de hasta 200 $\mu\text{mol/L}$. A 250 $\mu\text{mol/L}$, se observa un aumento significativo del 25% en la actividad de LDH, indicando posible citotoxicidad a dosis más altas. Sin embargo, es importante destacar que la actividad de LDH en concentraciones superiores a 200 $\mu\text{mol/L}$ de MnCl_2 , sigue siendo relativamente baja en comparación con el control positivo (tratamiento con agente lítico: LDH+).

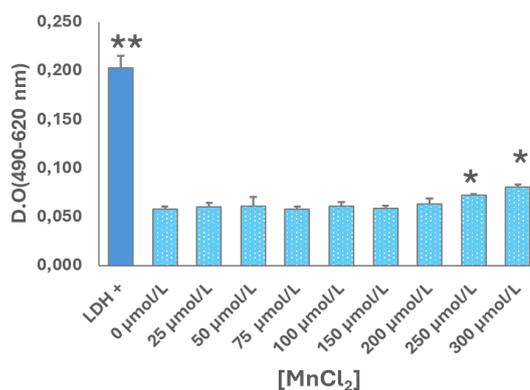


Figura 1: Niveles promedio de lactato deshidrogenasa (LDH) liberada al medio de cultivo tras 24 horas de tratamiento con Mn^{2+} en diferentes concentraciones de MnCl_2 . Los valores se expresan como media \pm desviación estándar. (* $p < 0,05$) indica un aumento significativo en la actividad de LDH comparado con el control (0 $\mu\text{mol/L}$ de MnCl_2). (** $p < 0,01$) indica un aumento altamente significativo comparado con el control (0 $\mu\text{mol/L}$ de MnCl_2).

Proliferación celular bajo condiciones de hiperglucemia y efecto del ion Mn^{2+}

Se postula que el aumento en las especies reactivas del oxígeno (ROS) inducido por hiperglucemia crónica contribuye significativamente a la disfunción endotelial al inhibir la proliferación y migración celular, atenuar la respuesta a factores de crecimiento y promover la expresión de marcadores pro-apoptóticos (Ido et al., 2002; Thomson et al.,

2006; Yu et al., 2006; Arya et al., 2012; Moriya y Ferrara, 2014).

En nuestro estudio, HUVECs tratadas durante 7 días con 30 mmol/L de D-glucosa presentaron una reducción significativa del 50% en la proliferación basal en comparación con las células crecidas en condiciones de normoglucemia (5,5 mmol/L de D-Glucosa) ($p < 0,05$) (Figura 2a). Esta respuesta refleja los efectos nocivos específicos de la glucosa ya que el control osmótico con 30 mmol/L de D-Manitol no mostró alteración de la proliferación basal.

Para explorar el posible efecto pro-angiogénico del ion Mn^{2+} en el contexto de hiperglucemia, las células HUVECs fueron expuestas a concentraciones crecientes de $MnCl_2$ (0 a 200 $\mu\text{mol/L}$) durante 48 horas. Luego se evaluó la proliferación celular mediante incorporación metil-[3H]-timidina. Como muestra la figura 2b, se observó una respuesta proliferativa dependiente de la dosis, con aumento significativo entre 75 y 200 $\mu\text{mol/L}$ de $MnCl_2$

($p < 0,01$), siendo 100 $\mu\text{mol/L}$ una concentración óptima dentro del rango no citotóxico.

Los resultados confirman que la hiperglucemia crónica tiene un efecto negativo sobre la proliferación de células endoteliales, alineándose con estudios previos que demuestran que esta condición genera disfunción endotelial (Hink et al., 2003; Kolluru et al., 2012; Dymkowska et al., 2014). La ausencia de efecto en el control osmótico sugiere que la inhibición de la proliferación es consecuencia directa de los efectos metabólicos de la glucosa y no de la presión osmótica.

En cuanto al ion Mn^{2+} , la concentración de 100 $\mu\text{mol/L}$ no solo resultó ser biológicamente activa, sino que también mostró capacidad para promover la proliferación celular bajo condiciones de hiperglucemia. Este hallazgo sugiere un posible efecto pro-angiogénico aunque es necesario evaluar con más detalles los mecanismos involucrados a nivel molecular (Barrioni et al., 2019; Westhauser et al., 2020).

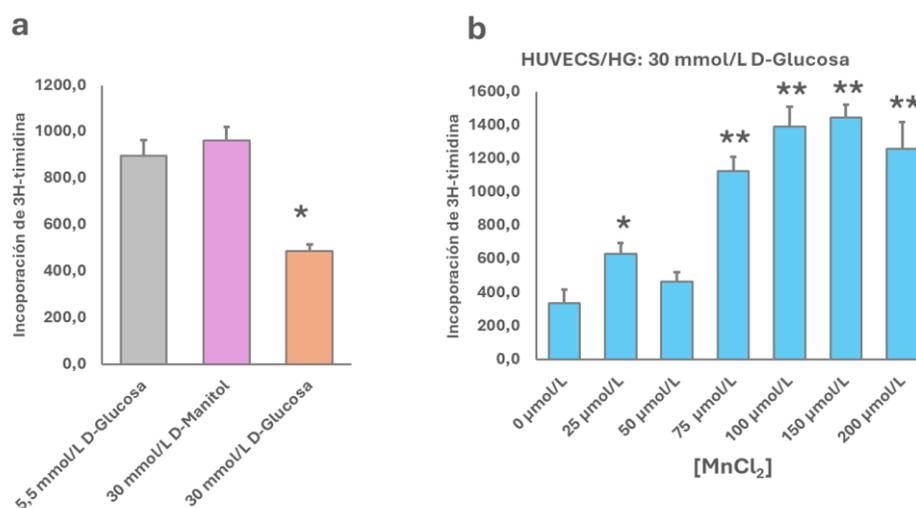


Figura 2: (a): Respuesta proliferativa de las células HUVECs pretratadas durante 7 días con 30 mmol/L de D-glucosa o D-manitol (control osmótico). Los valores se expresan como media \pm desviación estándar (* $p < 0,05$ en comparación con 5,5 mmol/L de D-glucosa). (b): Respuesta proliferativa de HUVECs en condiciones de hiperglucemia tratadas durante 48 horas con concentraciones crecientes de $MnCl_2$ dentro del rango no citotóxico. Los valores se expresan como media \pm desviación estándar (* $p < 0,05$; ** $p < 0,01$ en comparación con el control 0 $\mu\text{mol/L}$ de $MnCl_2$).

Efecto del ion Mn^{2+} sobre la migración celular en condiciones de hiperglucemia

Para evaluar si el tratamiento con Mn^{2+} puede modular la migración de células HUVECs en

condiciones de hiperglucemia, se realizó un ensayo de herida y se determinó el porcentaje de recubrimiento (%R) después de 8 horas de tratamiento. Como se muestra en la Figura 3, el pretratamiento de células HUVECs con 30 mmol/L de

D-Glucosa durante 7 días redujo significativamente el %R basal en comparación con las células crecidas en condiciones de normoglucemia (5,5 mmol/L de D-Glucosa) con una disminución aproximada del 40% ($p < 0,05$). Sin embargo, esta reducción fue revertida tras 8 horas de tratamiento con 100 $\mu\text{mol/L}$ de Mn^{2+} , logrando un %R superior al 100% en comparación con las células HUVECs en condiciones de hiperglucemia no tratadas ($p < 0,01$). Como control positivo, el tratamiento con VEGF incrementó el %R en un 25% respecto a las células hiperglucémicas no tratadas; sin embargo, este aumento no fue estadísticamente significativo (Figura 3).

Nuestros resultados sugieren que el ion Mn^{2+} promueve la migración de células HUVECs expuestas a hiperglucemia, lo que es relevante dado que la capacidad migratoria de las células endoteliales se ve comprometida bajo un estado de hiperglucemia crónica (Kang et al., 2017; Sena et al., 2018; Wang et al., 2021). Este hallazgo refuerza nuestra hipótesis de que el Mn^{2+} tendría potencial pro-angiogénico al facilitar la migración celular, un proceso esencial para la formación de nuevos vasos sanguíneos durante la angiogénesis (Chebassier et al., 2004).

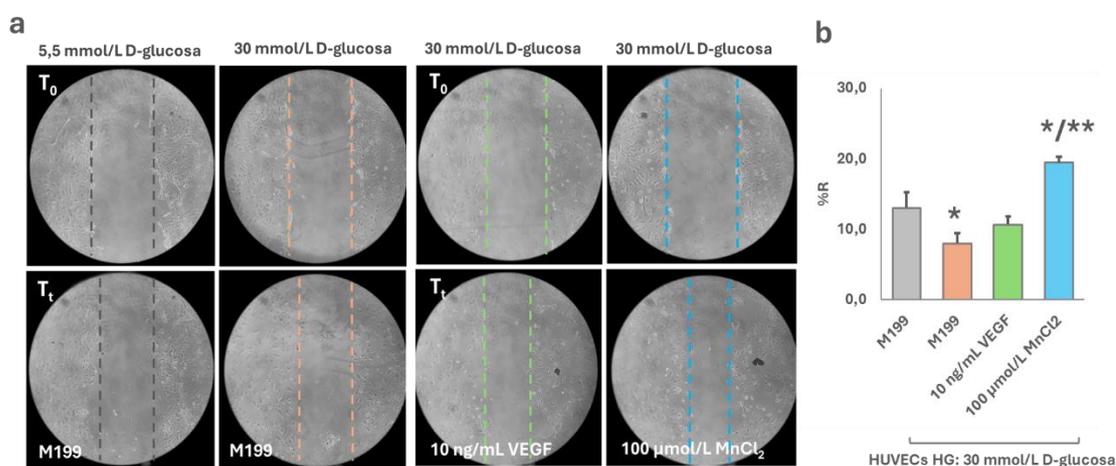


Figura 3: (a): Microfotografías que muestran el área de la herida al tiempo 0 y tras 8 horas de tratamiento con 100 $\mu\text{mol/L}$ de Mn^{2+} . Nótese el mayor recubrimiento del área de la herida en las células tratadas con el ion en comparación con los controles. M.O. 100X. (b): El gráfico de barras representa el porcentaje promedio de recubrimiento del área de la herida después de 8 horas de tratamiento. Los valores se expresan como media \pm desviación estándar (* $p < 0,05$ en comparación con el grupo normoglucémico, ** $p < 0,01$ en comparación con el grupo hiperglucémico no tratado).

Efecto del ion Mn^{2+} sobre la tubulogénesis en condiciones de hiperglucemia

El ensayo de tubulogénesis en matrices 3D (como el GeltrexTM) es un modelo *in vitro* ampliamente utilizado para estudiar la formación de estructuras capilares por células endoteliales como las HUVECs. En este ensayo, las células se siembran en una matriz rica en laminina y colágeno tipo IV y, bajo la estimulación adecuada, se organizan en redes tubulares en 4 a 6 horas. Este ensayo permite evaluar el efecto de diferentes compuestos en la angiogénesis al cuantificar el número de estructuras tubulares completamente formadas (DeCicco-Skinner et al., 2014). En nuestras condiciones experimentales la condición de hiperglucemia (7

días, 30 mmol/L de D-Glucosa) fue suficiente para disminuir la formación de estructuras tubulares en un 25% ($p > 0,05$) en comparación con la condición de normoglucemia (7 días, 5,5 mmol/L de D-Glucosa). Sin embargo, bajo tratamiento con el ion Mn^{2+} la formación de estructuras tubulares se incrementa significativamente un 400% ($p < 0,01$) superando incluso a la condición de normoglucemia en un 300% más ($p < 0,05$). El tratamiento control con VEGF también incrementó significativamente la formación de estructuras tubulares en la condición de hiperglucemia. Este incremento fue del 200% ($p < 0,05$) superando, también, a la condición de normoglucemia en un 100% más (Figura 4).

Estos resultados destacan la capacidad del ion Mn^{2+} para promover la formación de estructuras vasculares en condiciones de hiperglucemia. El incremento del 400% más en la formación de estructuras vasculares sugiere que el Mn^{2+} podría compensar la disfunción endotelial inducida por hiperglucemia al potenciar la proliferación y

migración celular. El efecto pro-angiogénico del Mn^{2+} es comparable al observado con VEGF. Esto subraya su potencial en estrategias terapéuticas para estimular la angiogénesis bajo condiciones de hiperglucemia como la que experimentan los pacientes diabéticos.

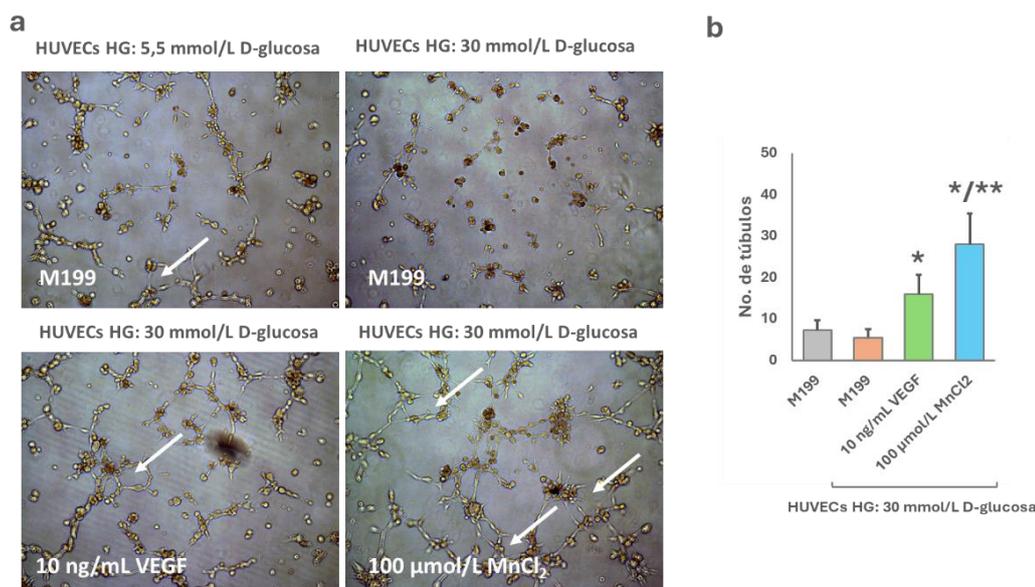


Figura 4: (a): Las microfotografías muestran la formación de estructuras tubulares sobre una matriz GeltrexTM después de 6 horas de tratamiento. Nótese la mayor formación de estructuras tubulares para la condición de hiperglucemia trata con el ion Mn^{2+} . (b): El gráfico de barras representa el promedio del número de estructuras tubulares completamente formadas (flechas blancas) después de 6 horas de tratamiento. Los valores se expresan como media \pm desviación estándar (* $p < 0,05$ en comparación con la condición de normoglucemia, ** $p < 0,01$ en comparación con la condición de hiperglucemia).

Efecto del ion Mn^{2+} sobre la expresión de marcadores de proliferación y apoptosis en condiciones de hiperglucemia

Para evaluar si el ion Mn^{2+} afecta la proliferación y apoptosis en células HUVECs expuestas a hiperglucemia, se analizaron tres marcadores: (1) pERK como marcador mitogénico, (2) Bax como regulador pro-apoptótico, y (3) caspasa-3 clivada como ejecutor de apoptosis. Como se muestra en la Figura 5, el tratamiento con 100 μ mol/L de Mn^{2+} incrementó los niveles de pERK en un 40% ($p > 0,05$) en comparación con la condición de hiperglucemia sin tratamiento, mientras que el VEGF no mostró cambios significativos (Fig. 5a, 5b). El ion Mn^{2+} disminuyó significativamente la expresión de Bax y caspasa-3 clivada en un 60% y 30%, respectivamente ($p < 0,05$). El tratamiento con VEGF también redujo

la expresión de Bax en 30% ($p < 0,05$) y de caspasa-3 clivada en 25% ($p > 0,05$) comparado con la condición de hiperglucemia sin tratamiento (Fig. 5a, 5c-d).

Estos resultados sugieren que el ion Mn^{2+} modularía tanto la proliferación como la apoptosis en células endoteliales expuestas a hiperglucemia, promoviendo una respuesta mitogénica a través del aumento de pERK y reduciendo la expresión de los marcadores apoptóticos Bax y caspasa-3 clivada. Esto sugiere que el Mn^{2+} tendría potencial pro-angiogénico en condiciones que normalmente inhibirían la formación de nuevos vasos. La reducción de Bax y caspasa-3 clivada refleja un efecto similar al del VEGF, reforzando la hipótesis de que Mn^{2+} podría ser utilizado en terapias angiogénicas, especialmente en pacientes diabéticos.

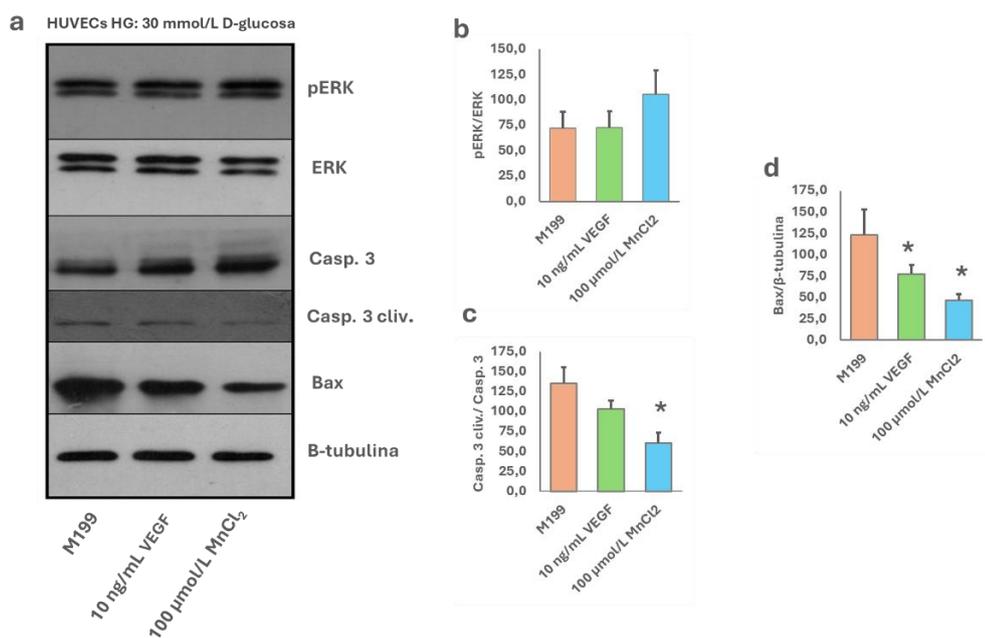


Figura 5: (a): Densitometrías de bandas para la expresión relativa de pERK, Bax y caspasa-3 clivada luego de 24 horas de tratamiento con el ion Mn^{2+} . 5b-c: Gráficos de barras para la expresión relativa de pERK (b), la expresión relativa de caspasa-3 clivada (c) y la expresión relativa de Bax (d). Los valores se expresan como media \pm desviación estándar (* $p < 0,05$ en comparación con la condición de hiperglucemia sin tratamiento). (Casp. 3: caspasa 3, Casp. 3 cliv.: caspasa-3 clivada).

4. Conclusiones

Nuestros hallazgos demuestran que el ion Mn^{2+} tiene un impacto significativo en la recuperación de la función endotelial en condiciones de hiperglucemia crónica, promoviendo la proliferación, la migración celular y reduciendo los marcadores de apoptosis, como Bax y caspasa-3 clivada. Estos efectos sugieren un potencial pro-angiogénico del Mn^{2+} , comparable al de VEGF, lo que lo posicionaría como un agente terapéutico inorgánico factible de ser utilizado para tratar las complicaciones vasculares asociadas a la diabetes.

5. Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento al Dr. Alberto Baldi y al Laboratorio de Patología y Farmacología Molecular del IBYME-CONICET, donde se originó el proyecto y se llevaron a cabo los experimentos. Agradecemos también al Dr. Alejandro Gorustovich por sus aportes en reparación y angiogénesis, así como el apoyo brindado durante este trabajo. Reconocemos el apoyo financiero del Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación (MINCYT) y del FONCYT mediante el proyecto PICT-2018-01777. Finalmente, agradecemos a nuestros colegas por sus comentarios críticos que ayudaron a mejorar este manuscrito.

6. Referencias

- Al-Karashi, A.S. (2018). Role of Oxidative Stress, Inflammation, Hypoxia and Angiogenesis in the Development of Diabetic Retinopathy, *Saudi J Ophthalmol* 32(4), 318-323.
- Ambrose, C.T. (2017). Pro-Angiogenesis Therapy and Aging: A Mini-Review, *Gerontology* 63(5), 393-400.
- An, Y.; Xu, B.T.; Wan, S.R.; Ma, X.M.; Long, Y.; Xu, Y.; Jiang, Z.Z. (2023). The Rol of oxidative Stress in Diabetes Mellitus-Induced Vascular Endothelial Dysfunction, *Cariovasc Diabetol* 22(1), 237.
- Arya, A.K.; Tripathi, R.; Kumar, S.; Tripath, K. (2012). Recent Advances on the Association of Apoptosis in Chronic Non-Healing Diabetic Wound, *Diabetes Complications* 26(6):554-561.
- Baldassarre, M.P.A.; Pipino, C.; Pandolfi, A.; Consoli, A.; Di Pietro, N.; Formoso, G. (2021). Old and New Biomarkers Associated with Endothelial Dysfunction in Chronic Hyperglycemia, *Oxid Med Cell Longev*, 2021:7887426.
- Barrioni, B.R.; Norris, E.; Li, S.; Naruphontjirakul, P.; Jones, J.R.; Pereira, M. (2019). Osteogenic Potential of Sol-Gel Bioactive Glasses

- Containing Manganese. *J Mater Sci Mater Med*, 2019; 30:86.
- Carmeliet, P.; Jain, R.K. (2011). Molecular Mechanism and Clinical Applications of Angiogenesis, *Nature* 473(6), 873-887
- Chen, P.; Chakraborty, S.; Peres, T.V.; Bowman, A.B.; Aschner, M. (2015). Manganese-Induced Neurotoxicity: From *C. elegans* to Humans, *Toxicol Res (Camb)* 4(2):191-202.
- Chebassier, N.; Oujija, E.H.; Viegas, I.; Dreno, B. (2004). Stimulatory Effect of Boron and Manganese Salt on Keratinocyte migration, *Acta Derm Venereol* 84(3), 191-4.
- Clyne, A.M.; (2021). Endothelial Response to Glucose: Dysfunction, Metabolism, and Transport, *Biochem Soc Trans* 49(1), 313-325.
- Culotta, V.C.; Daly, M.J. (2013). Manganese Complexes: Diverse Metabolic Routes to Oxidative Stress Resistance in Prokaryotes and Yeast, *Antioxid Redox Signal* 19(9):933-44.
- DeCicco-Skinner, K.L.; Henry, G.H.; Cataisson, C.; Tabib, T.; Gwilliam, J.C.; Watson, J.; Bullwinkle, E.M.; Falkenburg, L.; O'Neill, R.C.; Morin, A.; Wiest, J.S. (2014). Endothelial Cell Tube Formation Assay for the In Vitro Study of Angiogenesis.
- Dymkowska, D.; Drabarek, B.; Podsiwyalow, B.; Szczepanowska, J.; Zablocki, K. (2014). Hyperglycaemia Modifies Energy Metabolism and Reactive Oxygen Species Formation in Endothelial Cells In Vitro, *Arch Biochem Biophys* 542:7-13.
- Fadilah N.I.; Phang, S.J.; Kamaruzaman, N.; Salleh, A.; Zawani, M.; Sanyal, A.; Fauzi, B. (2023). Antioxidant Biomaterials in Cutaneous Wound Healing and Tissue Regeneration: A Critical Review, *Antioxidants (Basel)* 12(4), 787.
- Hink, U.; Tsimingias, N.; Wendt, M.; Münzel, T. (2003). Mechanisms Underlying Endothelial Dysfunction in Diabetes Mellitus: Therapeutic Implications, *Treat Endocrinol* 2003; 2(5)293-304.
- Hreha, J.; Wey, A.; Cunningham, C.; Krell, E.S.; Brietbart, E.A.; Paglia, D.N.; Nicholas, J.; Montemurro, N.J.; Nguyen, D.A.; Lee, Y.J.; Komlos, D.; Lim, E.; Benevenia, J.; O'Connor, J.P.; Lin, S.S. (2015). Local Manganese Chloride Treatment Accelerates Fracture Healing in a Rat Model, *J Orthop Res* 33(1):122-30.
- Ido, Y.; Carling, D.; Ruderman, N. (2002). Hyperglycemia-Induced Apoptosis in Human Umbilical Vein Endothelial Cell: Inhibition by AMP-Activated Protein Kinase Activation, *Diabetes* 51(1):159-67.
- Jin, S.; Kang, P.M. (2024). A Systematic Review on Advances in Management of Oxidative Stress-Associated Cardiovascular Diseases, *Antioxidant (Basel)* 13(8), 923.
- Kang, H.; Ma, X.; Liu, J.; Fan, Y.; Deng, X. (2017). High glucose-Induced Endothelial Progenitor Cell Dysfunction, *Diab Vasc Dis Res* 14(5), 381-394.
- Kolluru, G.K.; Bir, S.C.; Kevil, C.G. (2012). Endothelial Dysfunction and Diabetes: Effects on Angiogenesis, Vascular Remodeling and Wound Healing, *Int J Vasc Med* 2012:918267.
- Lin, S.H.; Zhang, W.J.; Jiang, X.Q. (2019). Applications of Bioactive Ions in Bone Regeneration, *Chin J Dent Res* 22(2), 93-104.
- Madonna, R.; Balistreri, C.R.; Geng, Y.J.; De Caterina, R. (2017). Diabetic Microangiopathy: Pathogenetic Insights and Novel Therapeutic Approaches, *Vascul Pharmacol* 90, 1-7.
- Milatovic, D.; Yin, Z.; Gupta, R.C.; Sidoryk, M.; Albrecht, J.; Aschner, J.L.; Aschner, M. (2007). Manganese Induces Oxidative Impairment In Cultured Rat Astrocytes, *Toxicol Sci* 98(1), 198-205.
- Moriya, J.; Ferrara, N. (2014). Inhibiting the Response to VEGF in Diabetes. *Sci Signal* 7(307):pe1.
- Mouriño, V.; Cattallini, J.P.; Boccaccini, A.R. (2012). Metallic ions as therapeutic Agents in Tissue Engineering Scaffolds: An Overview of their Biological Applications and Strategies for new Developments, *J R Soc Interface* 9, 401-419.
- Okonkwo, U.A.; DiPietro, L.A. (2017). Diabetes and Wound Angiogenesis, *Int J mol Sci* 18(7), 1419.
- Oliveira Volpe, C.M.; Villar-Delfino, P.H.; Ferreira Dos Anjos, P.M.; Nogueira-Machado, J.A. (2018). Cellular Death, Reactive Oxygen Species (ROS) and Diabetic Complications, *Cell Death Dis* 9(2), 119.
- O'Neal, S.L.; Zheng, W. (2015). Manganese Toxicity Upon Overexposure: A Decade in Review, *Curr Environ Health Rep* 2(3), 325-28.
- Pantulap, U.; Arango-Ospina, M.; Boccaccini, A.R. (2021). Bioactive Glasses Incorporating Less-Common Ions to Improve Biological and Physical Properties, *J Mater Sci Mater Med* 33(1):3.
- Peres, T.V.; Pedro, D.Z.; de Cardova, F.M.; Lopes, M.W.; Goncalves, F.M.; Mendes de Aguiar, C.B.; Walz, R.; Farina, M.; Aschner, M.; Leal, R.B. (2013) In Vitro Manganese Exposure Disrupts

- MAPK Signaling Pathway in Striatal and Hippocampal Slices from Immature Rats. *Biomed Res int* 2013:769295.
- Perez-Araluce, M.; Jungst, T.; Sanmartin, C.; Prosper, F.; Plano, D.; Mazo, M.M. (2024). Biomaterials-Based Antioxidant Strategies for the Treatment of Oxidative Stress Diseases, *Biomimetics (Basel)* 9(1), 23.
- Sena, C.M.; Leandro, A.; Azul, L.; Seica, L.; Perry, G. (2018). Vascular Oxidative Stress: Impact and Therapeutic Approaches, *Front Physiol* 9: 1668.
- Sayed, S.; Faruq, O.; Preya, U.H.; Kim, J.T. (2023). Cathepsin S Knockdown Suppresses Endothelial Inflammation, Angiogenesis, and Complement Protein Activity Under Hyperglycemic Conditions In Vitro by Inhibiting NF- κ B Signaling, *Int J Mol Sci* 24(6), 5428.
- Thomson, S.E.; McLennan, S.V.; Twigg, S.M. (2006). Growth Factors in Diabetes Complications. *Expert Rev Clin Immunol* 2(3):403-18.
- Wang, K.; Ge, Y.; Yang, Y.; Li, Z.; Liu, Z.; Xue, Y.; Zhang, Y.; Pang, X., Ngan, A.H.W.; Tang, B. (2024). Vascular Endothelial Cellular Mechanics Under Hyperglycemia and Its Role in Tissue Regeneration, *Regen Biomater* 11, rbae004.
- Wang, S.; Zheng, B.; Zhao, H.; Li, H.; Zhang, X.; Wen, J. (2021). Downregulation of lncRNA MIR181A2HG by High Glucose Impairs Vascular Endothelial Cell Proliferation and Migration Through the Dysregulation of miRNAs/AKT2 Axis, *Int J Mol Med* 47(4), 35.
- Westhauser, F.; Wilkesmann, S.; Nawaz, Q.; Schmitz, S.I.; Moghaddam, A.; Boccaccini, A.R. (2020). Osteogenic Properties of Manganese Doped Mesoporous Bioactive Glass nanoparticles. *J Biomed Mater Res Part A*, 2020; 108:1806–15.
- Zhang, Y.; Liu, T.; Chen, Y., Dong, Z.; Zhang, J.; Sun, Y.; Jin, B.; Gao, F., Guo, S.; Zhuang, R. (2016). CD226 Reduces Endothelial Cell Glucose Uptake Under Hyperglycemic Conditions with Inflammation in Type 2 Diabetes Mellitus. *Oncotarget* 7(11):12010-23.



Módulo de rigidez del multimaterial madera-malla-adhesivo de *Pinus pseudostrubus*, *Tabebuia rosea* y *Quercus scytophylla*

Sonia Correa Jurado¹, Javier Ramón Sotomayor Castellanos^{1*}, Israel Macedo Alquicira¹

1. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Avenida Francisco J. Múgica S/N. Ciudad Universitaria, CP 58030. Morelia, Michoacán, México.

*E-mail: javier.sotomayor@umich.mx

PALABRAS CLAVES

Construcción
Materiales
Densidad
Vibraciones

RESUMEN

En la industria de la construcción con madera, se requieren materiales estandarizados que posean características mecánicas claramente definidas. Mediante la combinación de placas de madera sólida con mallas, tejidos y adhesivos apropiados, la madera se convierte en un multimaterial. El módulo de rigidez de la madera y del multimaterial son útiles para calcular elementos y conexiones donde aparecen deformaciones fuera de plano causadas por esfuerzos cortantes. El objetivo de la investigación fue cuantificar la densidad y el módulo dinámico en muestras estadísticamente representativas de *P. pseudostrubus*, *T. rosea* y *Q. scytophylla*, y contrastar dichos parámetros con los obtenidos en probetas del multimaterial confeccionado con dichas especies. Se prepararon tres grupos de probetas de madera sólida de pequeñas dimensiones, así como tres grupos de multimaterial de madera con adhesivo y malla. Se llevaron a cabo pruebas de vibraciones en torsión, se registraron las frecuencias de vibración y se calcularon los módulos de rigidez correspondientes. Para las tres especies, se observa un incremento en la densidad y el módulo de rigidez del multimaterial en comparación con la madera en estado sólido. En comparación con la madera sólida, la variabilidad del módulo de rigidez se reduce en el caso del multimaterial.

Rigidity modulus of the wood-mesh-adhesive multimaterial of *Pinus pseudostrubus*, *Tabebuia rosea* and *Quercus scytophylla*

KEYWORDS

Construction
Materials
Density
Vibrations

ABSTRACT

In the wood construction industry, standardized materials with clearly defined mechanical properties are required. By combining solid wooden plates with appropriate meshes, fabrics, and adhesives, wood is transformed into a multimaterial. The modulus of rigidity of wood and multimaterial is useful for calculating elements and connections where out-of-plane deformations occur due to shear stresses. The objective of the research was to quantify the density and dynamic modulus in statistically representative samples of *P. pseudostrubus*, *T. rosea* and *Q. scytophylla*, and to compare these parameters with those obtained from specimens made of the multimaterial created with these species. Three groups of small solid wood test specimens were prepared, as well as three groups of wooden multimaterial with adhesive and mesh. Torsional vibration tests were conducted, the vibration frequencies were recorded, and the corresponding modulus of rigidity were calculated. For the three species, an increase in density and the modulus of rigidity of the multimaterial is observed compared to solid wood. Compared to solid wood, the variability of the modulus of rigidity is reduced in the case of multimaterial.

1. Introducción

La industria de la construcción con madera demanda materiales normalizados y con características mecánicas bien definidas. La tendencia tecnológica es desarrollar productos compuestos y derivados de madera para reemplazar elementos de madera que

requieren sobredimensionado por su heterogeneidad estructural y variabilidad natural. La madera se transforma en un multimaterial al combinarla con mallas, tejidos y adhesivos adecuados, lo que proporciona una mejora tecnológica para aplicaciones especializadas (Kohl et al., 2017). Para avanzar desde la valoración de la madera como una materia prima de origen forestal

hasta su clasificación como un material de ingeniería, se ha desarrollado la tecnología para reforzar componentes de madera sólida y/o laminada con metales (Jasieńko y Nowak 2014; Cañola et al., 2018), cementos (Jorge et al., 2004; Na et al., 2014), fibras naturales (Saba et al., 2016) y/o sintéticas (Qi et al., 2015; Nadir et al., 2016; Kusnindar et al., 2018), y consolidarlos mediante resinas y/o adhesivos (Gáborik et al., 2016; Stoeckel et al., 2013) y/o componentes mecánicos (Campilho et al., 2010; Dietsch y Brandner 2015; Steiger et al., 2015; Qiao et al., 2020).

Así, mediante la combinación de las características físico-mecánicas de cada componente, se alcanza un incremento en su resistencia mecánica y, al integrar compuestos protectores, se disminuye su biodeterioro y se optimiza su estabilización dimensional. Como resultante, se presentan amplias oportunidades para el diseño mecánico de compuestos, laminados y multimateriales que exhiben características análogas a las de la madera sin comprometer sus atributos estéticos, ambientales y de sostenibilidad (Milner 2009; Asdrubali et al., 2017; Caruso et al., 2017).

Un multimaterial de madera puede ser caracterizado como un compuesto que incorpora la sustancia madera como base o sustrato en su estructura y se amalgama con otros componentes de diversa naturaleza, como plástico, metal o fibras naturales. Como complemento, incorpora uno o más elementos que actúan como adhesivos y conectores entre las partes.

Inicialmente, se contempla en forma de placas y/o tableros. En lo concerniente a la escala, se prospecta en espesores análogos a los tableros de madera. Sin embargo, se puede proyectar en cualquier dimensión o geometría, como, por ejemplo, vigas y columnas de madera laminada. En términos conceptuales, el multimaterial se refiere a una membrana que se caracteriza por ser una malla de acero galvanizada, que está rodeada y/o protegida por dos elementos aislantes y/o protectores de un biomaterial, los cuales están unidos mediante un adhesivo.

Esta membrana puede ser sustituida por uno o varios componentes metálicos, plásticos, biológicos y de fibras naturales y/o sintéticas, capaces de almacenar, disipar y/o transmitir información codificada. Estos pueden incluir, por ejemplo, un

material aislante de sonido y/o temperatura, un material sensible al movimiento, y circuitos electrónicos. El adhesivo puede ser reemplazado por pegamentos naturales y/o polímeros sintéticos adecuados para el propósito del diseño del multimaterial (Macedo y Sotomayor 2021).

El módulo de rigidez de la madera es útil para el cálculo ingenieril de elementos y conexiones en los que se observan deformaciones fuera de plano, provocadas por esfuerzos de corte (Cavalli et al., 2017). Se han publicado datos relativos al módulo de rigidez de la madera para una diversidad considerable de especies (Sotomayor 2018; Macedo et al., 2022; Sotomayor 2024).

No obstante, hasta la fecha, no se ha identificado datos relativos a la caracterización en torsión del multimaterial madera-malla-adhesivo utilizando maderas de *Pinus pseudostrabus* Lindl. var *pseudostrabus*, *Tabebuia rosea* (Bertol.) Bertero ex A.DC. y *Quercus scytophylla* Liebm. Las tres especies citadas son endémicas de México y Centroamérica, y su aplicación es extensa en la industria de la construcción y la producción de productos madereros. Sus características físicas y tecnológicas mecánicas están divulgadas por Tamarit y López (2007) y Silva et al. (2010).

En el transcurso del proceso de construcción, la estructura construida con madera incorpora madera, tableros aglomerados de fibra, partículas y astillas, además de madera laminada (Jacob et al., 2018). En el presente escenario, el multimaterial madera-malla-adhesivo es considerado un material de ingeniería que tiene la capacidad de reemplazar componentes de madera que funcionan como componentes estructurales y/o arquitecturales.

La madera de *P. pseudostrabus* se caracteriza por su albura de brillo mediano, color amarillo pálido, grano recto, veteado suave a pronunciado. Posee excelente trabajabilidad. Sus usos actuales son aserrío, chapas para contrachapado, pulpa, molduras y en la industria de la construcción, así como en marcos de puertas y ventanas, tarimas, muebles modulares. Esta especie es muy apreciada para la elaboración de artesanías. Sus usos potenciales son elementos no estructurales en interiores, molduras, así como para fabricar muebles de alta calidad, pisos, cancelas, tarimas, plataformas, armaduras, muros, vigas, postes, pasarelas, estructuras. Si es tratada con asoles, puede ser usada

en aplicaciones en contacto con el suelo, además si se impregna con sales de boro puede ser utilizada para muebles, puertas, pasamanos y en lugares protegidos del intemperismo; se recomienda para plantaciones comerciales (Rendón et al., 2021).

La madera de *T. rosea* posee su albura de color café rosado. Su duramen es de brillo medio, algo lustroso, de color blanco rosáceo. Su durabilidad natural va de moderada a resistente. De grano entrecruzado, oblicuo y/o ondulado. Su textura va de media a gruesa, con veteado pronunciado. Sus usos actuales son en la fabricación de chapa, lambrín, triplay, pisos, muebles, instrumentos musicales, construcciones y decoración de interiores. Se considera excelente para acabados, ebanistería y construcción en general. Sus usos potenciales pueden ser para madera terciada, elementos no estructurales como marcos de puertas, ventanas y pasamanos (Rendón et al., 2021).

La madera de *Q. cytophylla* es de albura gris rosado o blanco rosado, con rayos rojo oscuro y con duramen color castaño ligeramente rojizo. De grano recto, textura gruesa y veteado pronunciado. Esta madera tiene excelentes características de maquinado, torneado, taladrado, moldurado y lijado, para procesar la madera es recomendable utilizar una sierra banda con las características adecuadas para aserrar madera dura. Sus usos actuales son para aserrío y es apropiada para la industria maderera en la elaboración de molduras, lambrín y muebles. De acuerdo con las características anatómicas tiene menos problemas para el aserrío y el secado. Como usos potenciales se recomienda que se utilice en la elaboración de productos de alta calidad tales como ebanistería, chapa, pisos, lambrín, cancelas, accesorios y decoración en general y partes de instrumentos musicales (Rendón et al., 2021).

La hipótesis planteada en la investigación postula que la conversión de madera sólida en un multimaterial madera-malla-adhesivo incrementa su módulo dinámico y reduce la variabilidad natural inherente a esta característica. Con el propósito de corroborar esta hipótesis, el objetivo de la investigación fue cuantificar la densidad y el módulo

dinámico en muestras estadísticamente representativas de *P. pseudostrubus*, *T. rosea* y *Q. scytophylla*, y contrastar dichos parámetros con los obtenidos en probetas del multimaterial confeccionado con dichas especies.

2. Materiales y métodos

Se prepararon seis grupos de probetas, cada uno con 17 unidades. Tres de ellos tienen dimensiones de 0,02 m × 0,15 m × 0,15 m en las direcciones radial, tangencial y longitudinal, y son de madera sólida de *P. pseudostrubus*, *T. rosea* y *Q. scytophylla*. Los otros tres grupos están compuestos por probetas de multimaterial madera-malla-adhesivo. Estas probetas están hechas de dos placas de madera de la misma especie con dimensiones de 0,01 m × 0,15 m × 0,15 m (Figura 1). Estas dos placas están unidas de forma ortogonal en las direcciones tangencial y longitudinal a través de una mezcla de dos componentes de adhesivo de poliuretano distribuidos en 200 kg m⁻². El adhesivo contiene componentes orgánicos volátiles de 5,6 g l⁻¹, viscosidad de 4200 mN m⁻² s, pH de 2,5, duración de la unión abierta de 10 min y resistencia a la unión de 191,5 kN m⁻² (ASTM D-905, American Society for Testing and Materials, 2021). Para fortalecer la conexión entre las dos láminas de madera, se insertó una malla de acero galvanizado de 0,92 mm de espesor entre ambas placas.

Los tres materiales fueron sometidos a una consolidación con una presión de 250 kg m⁻² y una temperatura de 90 °C durante un lapso de 1 hr. De esta manera, se obtuvieron seis muestras independientes y uniformes: tres de madera y tres de multimaterial. Los taxones botánicos de las maderas se determinaron en la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México. Las probetas se almacenaron en una cámara de acondicionamiento con temperatura de 20 °C y humedad relativa del aire de 65% hasta que alcanzaron un contenido de humedad en equilibrio de la madera de 10% y el del multimaterial de 11%. La determinación del contenido de humedad en las probetas se llevó a cabo conforme a la norma ISO 13061-1 (2014).

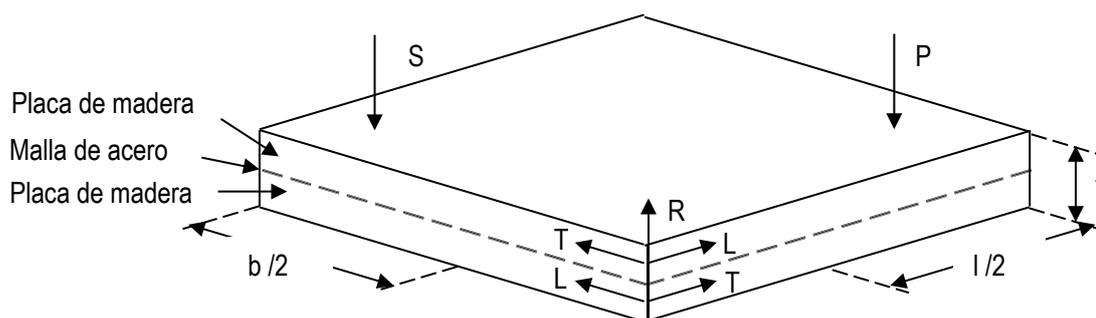


Figura 1. Diagrama de las pruebas de vibraciones en torsión. P: posición para aplicar el impacto; S: posición para medir la frecuencia natural; R: dirección radial (t: espesor); T: dirección tangencial (l: largo); L: dirección longitudinal (b: ancho).

Por otro lado, se calculó la densidad de la madera conforme a la norma ISO 13061-2 (2014). Las pruebas de vibración en torsión adaptaron el protocolo de la norma ASTM C1259-15 (American Society for Testing and Materials, 2015a). El módulo de rigidez de la madera por vibraciones en torsión se calculó de acuerdo con la norma ASTM E1876-15 (American Society for Testing and Materials, 2015b) utilizando la fórmula (1):

$$G_{LT} = \frac{4 l m f^2}{b t} \left[\frac{B}{(1 + A)} \right]$$

Donde G_{LT} = Módulo de rigidez ($N m^{-2}$), f = Frecuencia natural (Hz), m = masa de la probeta (g), l = Largo de la probeta (Dirección tangencial) (m), t = Espesor de la probeta (Dirección radial) (m), b = Ancho de la probeta (Dirección longitudinal) (m) y A, B = Factores de ajuste geométrico.

Diseño experimental

La unidad experimental consistió en tres grupos de madera sólida y tres de multimaterial de *P. pseudostrubus*, *T. rosea* y *Q. scytophylla*. Diecisiete probetas fueron asignadas a cada grupo. Los valores de densidad (ρ_{CH}) y módulo de rigidez (G_{LT}) calculados se utilizaron como variables de entrada para representar el estado de madera sólida en las tres especies. Las variables de salida fueron los parámetros calculados para un estado multimaterial formado con la misma especie que la madera sólida. Se consideró el contenido de humedad (CH) como variable de referencia y no intervino en el experimento.

Se llevaron a cabo pruebas para verificar la distribución normal de las muestras (Kolmogorov-

Smirnov). Para considerar una distribución como normal, se estableció como criterio de demarcación que los valores de sesgo estandarizado (SE) y apuntamiento estandarizado (AE) debían encontrarse dentro del rango de -2 a $+2$. Se llevaron a cabo pruebas de hipótesis para verificar la igualdad de varianzas (Ver-var, prueba de Levene) y para realizar un análisis de varianza (Anova) con un nivel de confianza del 95 por ciento. El criterio de demarcación para aceptar una diferencia de relevancia estadística fue aceptar valores de $P_{(\alpha=0.05)} < 0.05$.

Se llevaron a cabo evaluaciones de rangos múltiples (Diferencia Mínima Significativa de Fisher) con el criterio de demarcación de no aceptar diferencias significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X. Los resultados se contrastaron con datos recopilados en la bibliografía (Tabla 1).

3. Resultados y Discusión

Las evaluaciones de normalidad señalan que todas las muestras presentan homogeneidad y distribuciones de distribución uniforme [$-2 < SE, AE < +2$] (Tabla 2). Las evaluaciones de varianza confirman que las muestras son homogéneas y comparables, dado que $P_{(\alpha = 0,05)} > 0,05$. El análisis de varianza aplicado a la densidad de *P. pseudostrubus* evidencia una diferencia notable ($P_{(\alpha = 0,05)} < 0,05$). Por otro lado, en relación con su módulo de rigidez, no se detecta una variación significativa. Este mismo resultado se repite para la densidad y la resistencia de la madera de *T. rosea*. En cambio, con el *Q. scytophylla* es distinto, ya que su densidad y su resistencia son diferentes.

Tabla 1. Densidades y módulo de rigidez de la bibliografía. ρ_{CH} = Densidad; G_{LT} = Módulo de rigidez

Especies	ρ_{CH} (kg m ⁻³)	G_{LT} (MN m ⁻²)	Referencias
<i>Paulownia tomentosa</i>	266	456	Sotomayor (2024)
<i>Picea sitchensis</i>	390	720	Wang et al. (2018)
<i>Pinus sylvestris</i>	398	755	Roohnia y Kohantorabi (2015)
<i>Cryptomeria japonica</i>	421	742	Sotomayor (2024)
<i>Picea abies</i>	465	863	Kránitz et al. (2014)
<i>Picea abies</i>	472	744	Olsson y Källsner (2013)
<i>Tabebuia donnell-smithii</i>	496	870	Sotomayor (2016)
<i>Enterolobium cyclocarpum</i>	506	695	Sotomayor (2016)
<i>Pinus densiflora</i>	510	981	Cha (2015)
<i>Tabebuia rosea</i>	592	879	Sotomayor (2024)
<i>Hevea brasiliensis</i>	605	1008	Nadir et al. (2014)
<i>Pinus pseudostrubus</i>	620	1141	Sotomayor (2024)
<i>Fagus crenata</i>	629	1056	Sotomayor (2024)
<i>Swietenia humilis</i>	662	1019	Sotomayor (2016)
<i>Fagus sylvatica</i>	689	1010	Ozyhar et al. (2013)
<i>Lysiloma acapulcensi</i>	716	1328	Sotomayor (2016)
<i>Tabebuia rosea</i>	776	1563	Sotomayor (2024)
<i>Quercus scytophylla</i>	976	1204	Sotomayor (2024)
<i>Cordia elaeagnoides</i>	1135	2157	Sotomayor (2024)
<i>Tabebuia chrysantha</i>	1274	2807	Sotomayor (2024)

Las densidades de madera sólida y multimaterial correspondientes a las tres especies estudiadas no comparten una misma columna de X. Igualmente, el módulo de rigidez del multimaterial compuesto por *Q. scytophylla* no comparte una columna de X idéntica. En otras palabras, se observan discrepancias estadísticamente notables entre estos niveles. Por el contrario, los módulos de rigidez de *P. pseudostrubus* y *T. rosea* exhiben homogeneidad debido a que comparten una misma columna de X.

La elaboración de probetas en forma de placas, tal como se ilustra en la Figura 2, facilitó la realización de pruebas de vibraciones de torsión (Sotomayor, 2016; Sotomayor, 2024). Esta tecnología puede aplicarse a elementos estructurales con geometrías de tableros, columnas y/o vigas con utilidad en la industria de la edificación, así como en la fabricación de muebles, si se determinan sus características tecnológicas en probetas con dimensiones de empleo.

Tabla 2. Resultados del análisis estadístico.

Material	Parámetro	SE [-2, +2]	AE [-2, +2]	Ver-var P($\alpha=0.05$)	Anova P($\alpha=0.05$)	GH #
<i>Pinus pseudostrubus</i>						
Madera sólida	ρ_{CH}	-0,761	0,074	0,880	0,022*	X
Multimaterial	ρ_{CH}	-0,708	-0,119			X
Madera sólida	G_{LT}	0,995	0,724	0,756	0,532	X
Multimaterial	G_{LT}	-0,257	-0,968			X
<i>Tabebuia rosea</i>						
Madera sólida	ρ_{CH}	0,195	-0,165	0,695	0,006*	X
Multimaterial	ρ_{CH}	0,222	-0,378			X
Madera sólida	G_{LT}	1,336	-0,199	0,678	0,664	X
Multimaterial	G_{LT}	0,497	-0,820			X
<i>Quercus cytophylla</i>						
Madera sólida	ρ_{CH}	-1,720	0,183	0,666	< 0,001*	X
Multimaterial	ρ_{CH}	-1,678	-0,049			X
Madera sólida	G_{LT}	0,945	1,305	0,838	0,020*	X
Multimaterial	G_{LT}	-0,789	1,290			X

ρ_{CH} = Densidad; G_{LT} = Módulo de rigidez; SE = Sesgo estandarizado; AE = Apuntamiento estandarizado; Ver-var = Verificación de varianza; Anova = Análisis de varianza; * Existe una diferencia significativa para $P_{(\alpha=0.05)} < 0.05$; GH = Grupos homogéneos; # = No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que comparten una misma columna de X.

Densidad

En comparación con la densidad de la madera sólida, la del multimaterial experimenta un incremento del 9% para *P. pseudostrubus*, del 8% para *T. rosea* y del 7% para *Q. scytophylla*. La variabilidad de esta característica, que se explica mediante el coeficiente de variación, disminuye en un 9% para *P. pseudostrubus* y en un 14% para *T. rosea*, pero se mantiene similar para *Q. scytophylla* (Tabla 3).

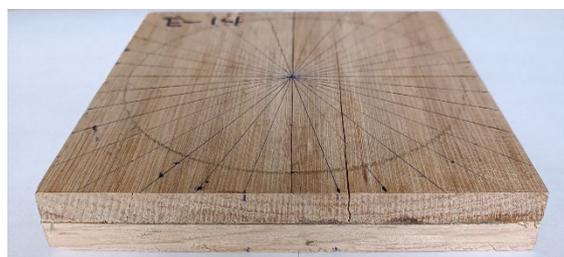


Figura 2. Probeta de multimaterial de *Q. cytophylla*.

Conforme la densidad se eleva, el módulo de rigidez experimenta un incremento. Se observa un aumento en las densidades y módulos de rigidez del

multimaterial en comparación con la madera sólida, tal como se ilustra en las Figuras 3 y 4.

Las variaciones en las magnitudes del módulo de rigidez documentadas en la literatura pueden ser atribuidas tanto a la especie (Rocco et al., 2017) como al método de cálculo (Krüger y Wagenführ,

2020). La estructura anatómica de las tres maderas examinadas presenta variaciones (Tamarit y López 2007), y los ensayos dinámicos se llevaron a cabo bajo las mismas condiciones. Por lo tanto, la fluctuación de la resistencia elástica en torsión es principalmente atribuible a la especie.

Tabla 3. Densidades y módulos de rigidez.

Especies	ρ_{CH} (kg m ⁻³)			G_{LT} (MN m ⁻²)		
	μ	σ	CV	μ	σ	CV
Madera sólida						
<i>Pinus pseudostrubus</i>	608	67	(11)	1075	177	(16)
<i>Tabebuia rosea</i>	774	58	(7)	1560	238	(15)
<i>Quercus scytophylla</i>	913	20	(2)	1289	74	(6)
Multimaterial						
<i>Pinus pseudostrubus</i>	664	68	(10)	1131	170	(15)
<i>Tabebuia rosea</i>	835	63	(8)	1593	206	(13)
<i>Quercus scytophylla</i>	980	22	(2)	1347	66	(5)

ρ_{CH} = Densidad; G_{TL} = Módulo de rigidez; μ = Media; σ = Desviación estándar; CV = Coeficiente de variación en por ciento y entre paréntesis; Contenido de humedad CH = 11%.

Módulo de rigidez

El análisis de varianza indica que las diferencias significativas entre los valores del módulo de rigidez (madera versus multimaterial) no se manifiestan entre las maderas de *P. pseudostrubus* y *T. rosea*. Por lo tanto, estas especies se distinguen de la de *Q. scytophylla*, en la que sí se observa una diferencia significativa. No obstante, desde un punto de vista aritmético, el módulo de rigidez del multimaterial experimenta un incremento promedio del 4% en comparación con el de la madera sólida (Tabla 3).

Las características del módulo de rigidez en la madera de *P. pseudostrubus*, *T. rosea* y *Q. scytophylla* presentan similitudes con las observadas en especies mexicanas con densidades análogas

(Sotomayor, 2018). En comparación con el módulo de rigidez de la madera sólida, se observa un incremento del 5% en el caso de *P. pseudostrubus*, un 2% en el de *T. rosea* y un 4% en el de *Q. scytophylla*. La variabilidad de este parámetro, evidenciada por el coeficiente de variación, disminuye en un 6% para *P. pseudostrubus*, un 13% para *T. rosea* y un 16% para *Q. scytophylla* (Tabla 3).

Desde el enfoque del análisis de resultados de cada especie, la densidad de la madera sólida de *P. pseudostrubus* constituye un buen indicador de su módulo de rigidez ($R^2 = 0,76$). Por el contrario, las maderas de *T. rosea* y *Q. scytophylla* exhiben correlaciones débiles (Figura 3). Se pueden observar las mismas tendencias para el multimaterial en la Figura 4.

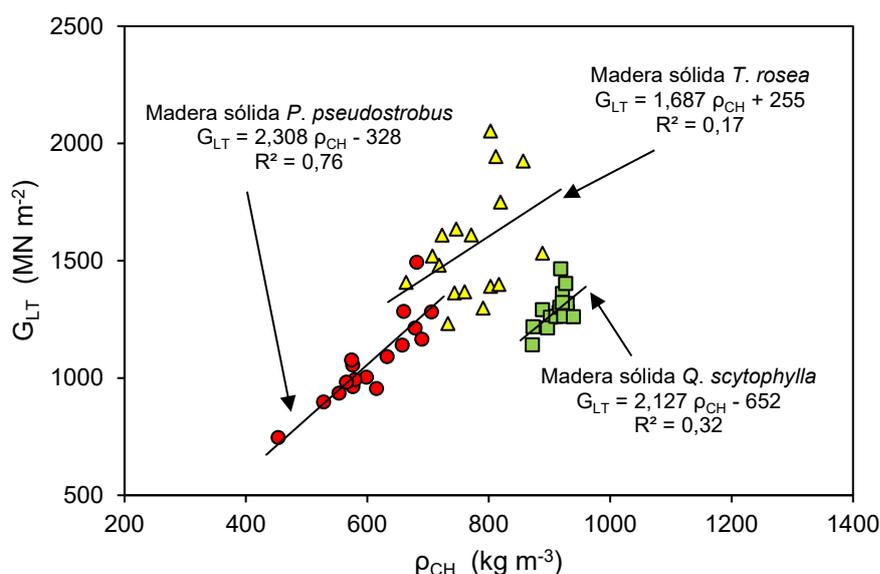


Figura 3: Correlaciones de los módulos de rigidez (G_{LT}) de la madera sólida en función de sus densidades (ρ_{CH}).

El rango de densidades mencionadas en la Tabla 1 abarca desde los 266 kg mm^{-3} de *Paulownia tomentosa* (Sotomayor, 2024) hasta los 1274 kg m^{-3} de *Tabebuia chrysantha* (Sotomayor, 2016). De manera similar, el intervalo correspondiente a los módulos de rigidez se extiende desde 456 MN m^{-2} de *Paulownia tomentosa* (Sotomayor, 2024) hasta 2807 MN m^{-2} de *Tabebuia chrysantha* (Sotomayor, 2016).

En la presente investigación, el rango de las densidades de la madera sólida (Tabla 3) va desde 608 kg m^{-3} de la madera de *P. pseudostrubus* hasta 980 kg m^{-3} del multimaterial de *Q. scytophylla*. Igualmente, el intervalo correspondiente a los módulos de rigidez va desde 1075 MN m^{-2} para *P. pseudostrubus* hasta 1593 MN m^{-2} de *Q. scytophylla*.

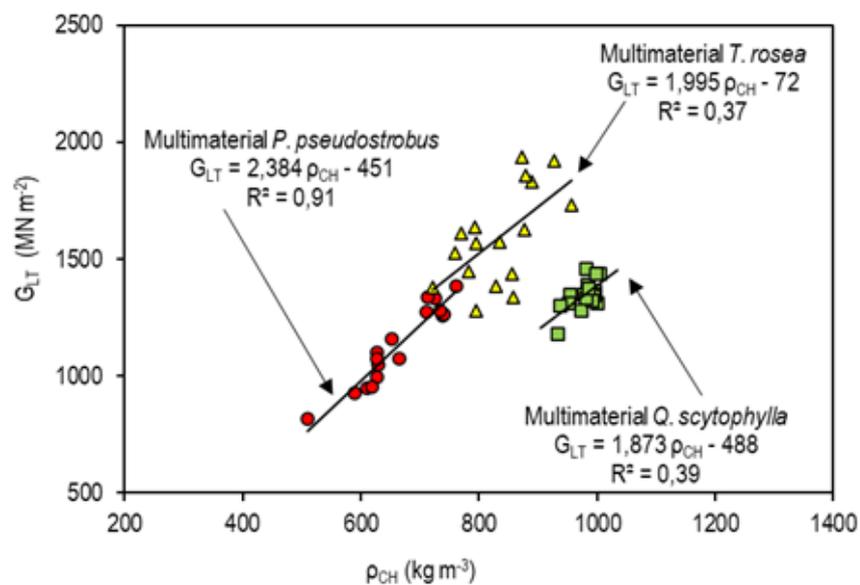


Figura 4. Correlaciones de los módulos de rigidez (G_{LT}) del multimaterial en función de sus densidades (ρ_{CH}).

Estos hallazgos se ilustran en la Figura 5, donde se evidencia que las densidades y los módulos de rigidez están en línea con la tendencia de los datos

bibliográficos, los cuales presentan una correlación elevada ($R^2 = 0,87$), lo que indica que los módulos de rigidez tanto de la madera como del multimaterial

tienden a aumentar de manera proporcional al incremento de sus respectivas densidades.

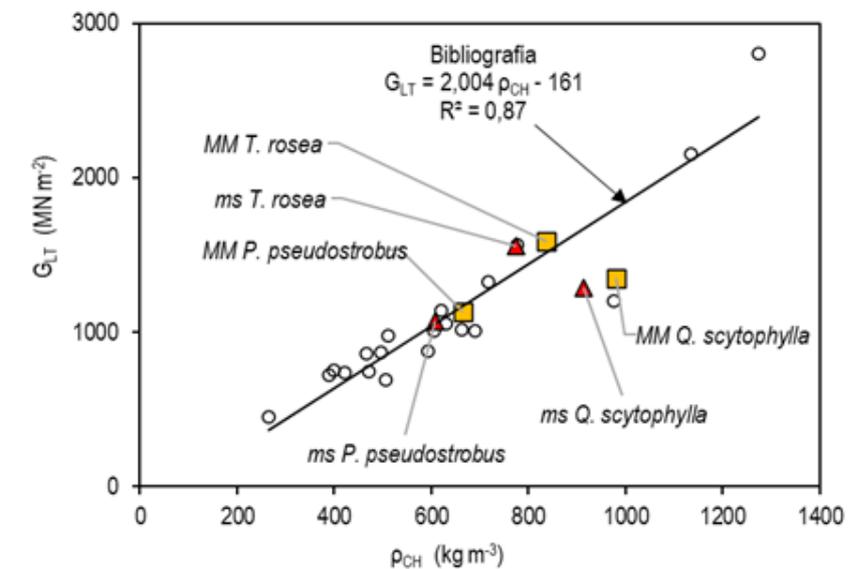


Figura 5: Posicionamiento de los módulos de rigidez (G_{LT}) en relación con la tendencia de valores de la bibliografía (Tabla 1). ρ_{CH} = Densidad; MM = Multimaterial; ms = Madera sólida.

4. Conclusiones

Se observa un incremento en la densidad y el módulo de rigidez del multimaterial en comparación con la madera sólida. Igualmente, a medida que la densidad se incrementa, el módulo de rigidez experimenta un incremento proporcional. La densidad no constituye en todas las instancias un predictor fiable del módulo de rigidez. La interpretación de estos datos requiere la identificación detallada de cada tipo de madera. Una vez que se tenga esta información, se pueden sugerir patrones de comportamiento para una especie en particular y para grupos de especies que muestren tendencias similares.

El multimaterial caracterizado tiene como objetivo convertir las características naturales de la madera en un producto manufacturado con un módulo de rigidez optimizado, y simultáneamente reducir la variabilidad natural del material constitutivo. En comparación con la madera sólida, se percibe el multimaterial como una mejora tecnológica para su integración en la producción de productos y componentes estructurales.

5. Agradecimientos

La investigación fue patrocinada por la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México y por el Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías, México. Una versión preliminar del manuscrito fue presentada en formato de cartel en el III Congreso Ibero-Latinoamericano de la madera en la construcción, en Madrid, España, en junio de 2024.

6. Referencias

- American Society for Testing and Materials. (2015a). ASTM C1259-15. Standard test method for dynamic Young's modulus, shear modulus, and Poisson's ratio for advanced ceramics by impulse excitation of vibration. American Society for Testing and Materials (ASTM), West Conshohocken, U.S.A.
- American Society for Testing and Materials. (2015b). ASTM E1876-15. Standard test method for dynamic Young's modulus, shear modulus, and Poisson's ratio by impulse excitation of vibration. American Society for Testing and Materials (ASTM), West Conshohocken, U.S.A.

- American Society for Testing and Materials. (2021). ASTM D905-08(2021). Standard Test Method for Strength Properties of Adhesive Bonds in Shear by Compression Loading. American Society for Testing and Materials (ASTM), West Conshohocken, U.S.A.
- Asdrubali, F.; Ferracuti, B.; Lombardi, L.; Guattari, C.; Evangelisti, L.; Grazieschi, G. (2017). A review of structural, thermo-physical, acoustical, and environmental properties of wooden materials for building applications. *Building and Environment*, 114:307-332. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.12.033>
- Campilho, R.D.S.G.; De Moura, M.F.S.F.; Barreto, A.M.J.P.; Morais, J.J.L.; Domingues, J.J.M.S. (2010). Experimental and numerical evaluation of composite repairs on wood beams damaged by cross-graining. *Construction and Building Materials*, 24(4):531-537. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.10.006>
- Cañola, H.D.; Echavarría, C.; Echavarría, B. (2018). Glulam beams reinforced with punched metal plates. *DYNA*, 85(204):127-133. <https://doi.org/10.15446/dyna.v85n204.67847>
- Caruso, M.C.; Menna, C.; Asprone, D.; Prota, A.; Manfredi, G. (2017). Methodology for Life-Cycle Sustainability Assessment of Building Structures. *ACI Structural Journal*, 114(2):323-336. <https://doi.org/10.14359/51689426>
- Cavalli, A.; Cibecchini, D.; Goli, G.; Togni, M. (2017). Shear modulus of old timber. *iForest - Biogeosciences and Forestry*, 10:446-450. <https://doi.org/10.3832/ifor1787-009>
- Cha, J.K. (2015). Determination of true modulus of elasticity and modulus of rigidity for domestic woods with different slenderness ratios using nondestructive tests. *Journal of the Korean Wood Science and Technology*, 43(1):36-42. <https://doi.org/10.5658/WOOD.2015.43.1.36>
- Dietsch, P.; Brandner, R. (2015). Self-tapping screws and threaded rods as reinforcement for structural timber elements – A state-of-the-art report. *Construction and Building Materials*, 97:78-89. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.04.028>
- Gáborik, J.; Gaff, M.; Ruman, D.; Záborský, V.; Kašíčková, V.; Sikora, A. (2016). Adhesive as a factor affecting the properties of laminated Wood. *BioResources*, 11(4):10565-10574. <https://doi.org/10.15376/biores.11.4.10565-10574>
- International Organization for Standardization. (2014). ISO 13061-1:2014. Physical and mechanical properties of wood. Test methods for small clear wood specimens. Part 1: Determination of moisture content for physical and mechanical tests. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- International Organization for Standardization. (2014). ISO 13061-2:2014. Physical and mechanical properties of wood. Test methods for small clear wood specimens Part 2: Determination of density for physical and mechanical tests. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- Jacob, M.; Harrington, J.; Robinson, B. (2018). The Structural Use of Timber Handbook for Eurocode 5: Part 1-1. COFORD.
- Jasieńko, J.; Nowak, T.P. (2014). Solid timber beams strengthened with steel plates – Experimental studies. *Construction and Building Materials*, 63:81-88. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.020>
- Jorge, F.C.; Pereira, C.; Ferreira, J.M.F. (2004). Wood-cement composites: a review. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 62:370-377. <https://doi.org/10.1007/s00107-004-0501-2>
- Kohl, D.; Long, T.H.N.; Böhm, S. (2017). Wood-Based Multi-Material Systems for Technical

- Applications – Compatibility of Wood from Emerging and Developing Countries. *Procedia Manufacturing* 8:611-618. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.02.078>
- Kránitz, K.; Deublein, M.; Niemz, P. (2014). Determination of dynamic elastic moduli and shear moduli of aged wood by means of ultrasonic devices. *Materials and Structures* 47(6):925-936. <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0103-8>
- Krüger, R.; Wagenführ, A. (2020). Comparison of methods for determining shear modulus of Wood. *European Journal of Wood and Wood Products* 78:1087-1094. <https://doi.org/10.1007/s00107-020-01565-2>
- Kusnindar; Dewi, S.M.; Soehardjono, A.; Wisnumurti. (2018). Performance of glue laminated timber beams composed of sengon wood (*Albizia falcatara*) and coconut wood (*Cocos nucifera*) with nylon-threads reinforcement. *MATEC Web of Conferences* 195:02029. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201819502029>
- Macedo Alquicira, I.; Sotomayor Castellanos, J.R. (2021). Densidad, velocidad del ultrasonido y módulo dinámico de madera sólida y laminada de *Pinus pseudostrobus*. *Madera y Bosques*, 27(3):e2732235, 1-14. <https://doi.org/10.21829/myb.2021.2732235>
- Macedo Alquicira, I.; Bedolla Arrollo, J.; Raya González, D.; Rutiaga Quiñones, J.G.; Castro Sánchez, F.J.; Sotomayor Castellanos, J.R. (2022). Pruebas de torsión dinámica de madera sólida y de multimaterial de *Fagus crenata*. *Bosques Latitud cero* 12:93-102. https://www.researchgate.net/publication/366734257_Pruebas_de_torsion_dinamica_de_madera_soliday_de_multimaterial_de_Fagus_crenata
- Milner, H.R. (2009). Sustainability of engineered wood products in construction. In *Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering, Sustainability of Construction Materials* 184-212, Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9781845695842.184>
- Na, B.; Wang, Z.; Wang, H.; Lu, X. (2014). Wood-cement compatibility review. *Wood Research* 59(5):813-626. <http://www.woodresearch.sk/wr/201405/10.pdf>
- Nadir, Y.; Nagarajan, P.; Ameen, M.; Arif, M. (2016). Flexural stiffness and strength enhancement of horizontally glued laminated wood beams with GFRP and CFRP composite sheets. *Construction and Building Materials* 112:547-555. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.133>
- Nadir, Y.; Nagarajan, P.; Midhun, A.J. (2014). Measuring elastic constants of *Hevea brasiliensis* using compression and losipescu shear test. *European Journal of Wood and Wood Products* 72(6):749-758. <https://doi.org/10.1007/s00107-014-0842-4>
- Olsson, A.; Källsner, B. (2013). Shear modulus of structural timber evaluated by means of dynamic excitation and FE analysis. *Materials and Structures* 48(4):977-985. <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0208-0>
- Ozyhar, T.; Hering, S.; Sanabria, S.J.; Niemz, P. (2013). Determining moisture-dependent elastic characteristics of beech wood by means of ultrasonic waves. *Wood Science and Technology* 47(2):329-341. <https://doi.org/10.1007/s00226-012-0499-2>
- Qi, Y.; Xiong, W.; Liu, W.; Fang, H.; Lu, W. (2015). Experimental Study of the Flexural and Compression Performance of an Innovative Pultruded Glass-Fiber-Reinforced Polymer-Wood Composite Profile. *PLoS ONE* 10(10):e0140893. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0140893>

- 893
- Qiao, Q.; Yang, Z.; Mou, B. (2020). Experimental study on axial compressive behavior of CFRP confined square timber filled steel tube stub columns. *Structures* 24:823-834. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.02.007>
- Sotomayor Castellanos, J. R. (2015). Banco FITECMA de características físico-mecánicas de maderas mexicanas. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. México. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3497.4884>
- Rendón Correa, A.; Dorantes Hernández, F.; Mejía Valencia, S.; Alamilla Fonseca L. N. (2021). Características macroscópicas, propiedades y usos de la madera de especies nativas y exóticas en México. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México. <https://bioteca.biodiversidad.gob.mx/janimum/Documentos/15522.pdf>
- Rocco Lahr, F.A.; Christoforo, A.L.; Donizeti Varanda, L.; Chahud, E.; Almeida De Araujo, V.; Melgaço Nunes Branco, L.A. (2017). Shear and longitudinal modulus of elasticity in wood: relations based on static bending tests. *Acta Scientiarum. Technology* 39:433-437. <https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v39i4.30512>
- Roohnia, M.; Kohantorabi, M. (2015). Dynamic methods to evaluate the shear modulus of wood. *BioResources* 10(3):4867-4876. <https://doi.org/10.15376/biores.10.3.4867-4876>
- Saba, N.; Jawaid, M.; Alothman, O.Y.; Paridah. M.T. (2016). A review on dynamic mechanical properties of natural fibre reinforced polymer composites. *Construction and Building Materials* 106:149-159. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.075>
- Silva Guzmán, J.A.; Fuentes Talavera, F.J.; Rodríguez Anda R.; Torres Andrade, P.A.; Lomelí Ramírez, M.A.; Ramos Quirarte, J.; Waitkus, C.; Richter, H.G. (2010). Fichas de propiedades tecnológicas y usos de maderas nativas de México e importadas. Comisión Nacional Forestal. Guadalajara. http://centro.paot.org.mx/documentos/conafor/catalogo_maderas.pdf
- Sotomayor Castellanos, J.R. (2016). Dynamic modulus of rigidity of seven types of Mexican wood determined by torsional vibration. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 22(2):125-134. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2015.03.008>
- Sotomayor Castellanos, J.R. (2018). Características dinámicas de 22 maderas determinadas por el método de vibraciones transversales. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 48:1-24. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v8i48.150>
- Sotomayor Castellanos, J.R. (2024). Estudio comparativo de módulos de rigidez de tres maderas mexicanas y tres maderas japonesas. *Ingenierías* 27(96):39-48. <https://doi.org/10.29105/ingenierias27.96-950>
- Steiger, R.; Serrano, E.; Stepinac, M.; Rajčić, V.; O'Neill, C.; McPolin, D.; Widmann, R. (2015). Strengthening of timber structures with glued-in rods. *Construction and Building Materials* 97:90-105. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.097>
- Stoeckel, F.; Konnerth, J.; Gindl-Altmatter, W. (2013). Mechanical properties of adhesives for bonding wood - A review. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 45:32-41. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2013.03.013>
- Tamarit Urias, J.C.; López Torres, J.L. (2007). Xilotecología de los principales árboles tropicales de México. INIFAP. México. https://www.researchgate.net/profile/Juan-Carlos-Urias/publication/339936736_XILOTECNOL

OGIA_DE_LOS_PRINCIPALES_ARBOLES_TR
OPICALES_DE_MEXICO/links/5e6d6e0ea6f
dccb994ca193a/XILOTECNOLOGIA-DE-LOS-
PRINCIPALES-ARBOLES-TROPICALES-DE-
MEXICO.pdf

Wang, Z.; Xie, W.; Wang, Z.; Cao, Y. (2018). Strain method for synchronous dynamic measurement of elastic, shear modulus and Poisson's ratio of wood and wood composites. *Construction and Building Materials* 182:608-619. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.139>



Comportamiento de *Vitis vinifera* L. cv. Merlot bajo tres sistemas de instalación de malla antigranizo

Cesar Gabriel Nahuel^{1*}, Pablo Castro¹, Edgardo Nahuel¹, Irene Carbajal Ramos^{2,3}, Jorge Pérez Peña⁴

1. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Estación Experimental Agropecuaria (EEA) Rama Caída, El Vivero s/n, San Rafael (5600), Mendoza, Argentina.
2. Facultad de Ciencias Aplicadas a la Industria (FCAI), Universidad Nacional de Cuyo (UNCuyo), Bernardo de Irigoyen 375, San Rafael, Mendoza, 5600 Argentina.
3. ICAI (CONICET – UNCuyo), Instituto de Ingeniería y Ciencias Aplicadas a la Industria, Bernardo de Irigoyen 375, San Rafael, Mendoza, 5600 Argentina.
4. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Estación Experimental Agropecuaria (EEA) Mendoza, San Martín 3853, Luján de Cuyo (5507), Mendoza, Argentina.

*E-mail: nahuel.gabriel@inta.gob.ar

PALABRAS CLAVES

Grembiule
Microclima
Fotosíntesis
Antocianinas

RESUMEN

En Mendoza, el granizo es una adversidad meteorológica limitante para la producción agrícola. Anualmente el 10% de la superficie cultivada con vid se ve afectada, registrando daños de hasta el 100%. La utilización de malla antigranizo es un método de defensa efectivo, aunque puede modificar el microclima y el comportamiento del cultivo. El objetivo es evaluar la influencia de tres sistemas de instalación de malla antigranizo sobre las condiciones microclimáticas y algunas variables vegetativas, fisiológicas y de composición de bayas en viñedos. Se compararon tres sistemas de instalación de malla plástica antigranizo: Grembiule (Gr), túnel (Tu), malla unida (Mu) y un testigo sin protección (Te) en un diseño de parcelas al azar en un viñedo cv. Merlot. Los resultados evidenciaron que el sistema Gr proporcionó un microclima más fresco y húmedo. El Tu se comportó similar a Gr, aunque la concentración de antocianinas y el peso de baya fueron reducidos. Los sistemas Gr y Tu mejoraron el estado hídrico. En contraste, el sistema Mu ofreció condiciones microclimáticas y estado hídrico similares al testigo. Es importante profundizar el estudio de las relaciones hídricas y la calidad enológica de los viñedos con malla antigranizo, así como el efecto de diferentes tejidos.

Behavior of *Vitis vinifera* L. cv. Merlot Under Three Hail Net Installation Systems

KEYWORDS

Grembiule
Microclimate
Photosynthesis
Anthocyanins

ABSTRACT

In Mendoza, hail is a meteorological challenge that significantly limits agricultural production. Annually, 10% of the vineyard area is affected, with damages reaching up to 100%. The use of hail nets is an effective defense method; however, it can alter the microclimate and crop behavior. This study aims to evaluate the influence of three hail net installation systems on microclimatic conditions and specific vegetative, physiological, and berry composition variables in vineyards. Three plastic hail net systems—Grembiule (Gr), Tunnel (Tu), and Unified Net (Mu)—were compared against an unprotected control (Te) in a randomized block design in a Merlot vineyard. Results showed that the Gr system provided a cooler and more humid microclimate. The Tu system exhibited similar behavior to Gr, though it reduced anthocyanin concentration and berry weight. Both Gr and Tu systems improved the water status of the vines. In contrast, the Mu system presented microclimatic conditions and water status similar to the control. Further research on water relations and the enological quality of vineyards under hail net systems, as well as the effects of different net fabrics, is recommended.

1. Introducción

La viticultura en Argentina se concentra principalmente en el centro-oeste del país, siendo Mendoza la principal productora de uva, con 145.393 hectáreas que representan el 71% de la superficie vitícola nacional (INV, 2023). Sin embargo, esta área cultivada es susceptible a daños por granizo; siendo afectada anualmente el 10% de la superficie y de esta, el 50% presenta daños totales (DACC, 2023). El granizo es un fenómeno meteorológico que se origina en nubes convectivas. En la región de Cuyo, la precipitación de granizo ocurre principalmente entre los meses de octubre y abril luego de un período de intenso calentamiento del suelo (entre las 16:00 y las 23:00 horas), tras las máximas temperaturas del día (Ortiz Maldonado, 1991).

El método más efectivo para proteger los cultivos de daños por granizo es la cobertura con malla plástica antigranizo (Di Césare, 1997; Garnaud, 1998; Iglesias y Alegre, 2006). No obstante, se ha encontrado algunos efectos de la malla principalmente sobre el cultivo en frutales, los que incluyen un incremento de la humedad relativa y una reducción de la radiación solar, de la temperatura del aire y de la velocidad del viento (Garnaud, 1998; Iglesias y Alegre, 2006; Rana et al., 2004; Osaer et al., 2004; Mupambi et al., 2018), pero en el caso de la vid existen escasos estudios que analicen estos efectos.

Se han observado diferencias significativas en la humedad relativa, que muestra un mayor incremento bajo malla en días despejados (Solomakhin y Blanke, 2010). La radiación global y la temperatura media también se comportaron de manera diferente bajo malla, registrándose reducciones de hasta un 30% y de 3 a 4 °C, respectivamente (Lakatos et al., 2011). Experiencias locales indican reducciones de radiación entre el 17% y el 31% (Del Monte et al., 2006; Guida et al., 1997), aunque estos valores se encuentran dentro del rango necesario para alcanzar niveles óptimos de fotosíntesis en la primera capa de hojas (Keller, 2015).

En relación con el viento, se han documentado reducciones de velocidad entre el 30% y el 45% (Di Césare, 1997), y algunos autores reportan una reducción de hasta el 50% (Middleton y McWaters, 2002). Este aspecto es relevante, ya que la

protección antigranizo con malla plástica ha reducido las pérdidas de frutos por efecto del viento en un 20% (Garnaud, 1998). En regiones con alta incidencia de viento, el área foliar y la conductancia estomática se ven afectadas (Carey et al., 2007).

La luz influye directa o indirectamente en la mayoría de los procesos fisiológicos y vegetativos. Se ha encontrado que la fotosíntesis, la formación de yemas, la floración, la expansión foliar y el alargamiento de entrenudos se ven influenciados por la intensidad y calidad de la luz incidente (Salisbury y Ross, 1994). Se ha asociado la reducción de la intensidad y calidad de luz en la canopia de plantas protegidas con malla antigranizo a un incremento de la clorofila en las hojas y una disminución de la tasa fotosintética y del rendimiento (do Amarante et al., 2011), aunque otros estudios no han encontrado diferencias en el comportamiento fotosintético bajo malla (Solomakhin y Blanke, 2008).

La conductancia estomática también se ve afectada por el uso de coberturas. En condiciones sin cobertura, se registran altos valores de conductancia estomática inmediatamente después del riego, seguidos de una rápida reducción hasta alcanzar valores inferiores a los observados en condiciones con cobertura (Smita, 2007). En un estudio sobre el comportamiento diario de la conductancia estomática y la fotosíntesis en vides conducidas en espaldera sin protección antigranizo, se observó que los valores eran más bajos durante las horas de la tarde, independientemente del nivel de riego aplicado (Cuevas et al., 2006).

El uso de mallas antigranizo también se ha asociado con un menor consumo de agua en plantas protegidas. En cultivo de manzanos, durante períodos de deficiencia de humedad del suelo, se ha encontrado valores de potencial hídrico más favorable en plantas bajo malla (Smita, 2007). Algunos estudios recientes han investigado su impacto en diversos cultivos. Por ejemplo, en uvas de mesa, se ha documentado que las redes de sombreado reducen la evapotranspiración y aumentan el potencial hídrico de las hojas y el contenido de agua (Jafari Burki et al., 2022; Avenant y Avenant, 2022). Se ha observado un incremento del potencial hídrico foliar y de la concentración de agua en las hojas (Avenant, 1994), así como una rápida disminución del potencial hídrico foliar en las primeras horas de la mañana, alcanzando valores

mínimos en plantas sin cobertura (Rana et al., 2004). En ambientes áridos, estas redes han demostrado incrementar el vigor de las vides, sugiriendo que las vides pueden mantener un mejor estado hídrico bajo condiciones de sombreo (Villalobos-Soublett et al., 2021).

Si bien la protección antigranizo puede salvaguardar la producción, también puede afectar el rendimiento. Algunos autores han documentado incremento en el rendimiento en cultivos de manzano (do Amarante et al., 2018). Otros han observado menor inducción floral y, aunque no encontraron diferencias en el rendimiento final, sí se reportaron reducciones en la iniciación de flores, el rendimiento y la coloración de la fruta, junto con un aumento en el crecimiento vegetativo y una disminución de las quemaduras solares (Blanke, 2008). En estudios realizados en durazneros bajo malla antigranizo, no se encontraron diferencias significativas en el rendimiento (Ojer et al., 2002), aunque se registraron variaciones en el color de fondo y la firmeza de la pulpa, lo que influyó en el momento de cosecha. Aunque se han realizado algunos estudios en cultivo de vid, la mayoría se ha centrado en uvas de mesa, reportándose en algunos casos un rendimiento mayor bajo malla (Avenant, 1994), aunque en otros no se ha observado diferencias (Salazar et al., 2018).

La composición de las bayas puede verse afectada por cambios en el microclima. La luz y la temperatura son las principales variables que regulan la síntesis de antocianinas; su acumulación puede verse influenciada tanto por una reducción en la síntesis como por un aumento en su degradación (Bergqvist et al., 2001; Haselgrove et al., 2000; Solomakhin y Blanke, 2010). El contenido de fenoles aumenta con mayor radiación, y la composición dependerá del cepaje y de las condiciones de cultivo (Ojeda, 2007). Los sólidos solubles (Brix) en las bayas se correlacionan directamente con la radiación recibida, mientras que la acidez total disminuye al aumentar la radiación y la temperatura en los racimos (Bergqvist et al., 2001).

En base a los antecedentes expuestos el objetivo de este trabajo fue evaluar la influencia de tres sistemas de instalación de malla antigranizo sobre las condiciones microclimáticas y algunas variables vegetativas, fisiológicas y de composición de bayas en viñedos. La industria vitivinícola está interesada en conocer cómo el uso de mallas plásticas

antigranizo influye en el comportamiento de los viñedos y en la producción, por lo que es fundamental generar información y evaluar el impacto de diferentes sistemas de instalación de mallas en viñedos.

2. Materiales y métodos

Sitio del experimento, diseño experimental y tratamientos

El ensayo se realizó en la temporada 2010/2011 en un viñedo ubicado en San Rafael (34° 34' 45,32" S y 68° 25' 26,70" O), Mendoza. El viñedo, implantado con la variedad Merlot (clon 347) injertado sobre 101-14, estaba conducido en espaldero alto, podado en cordón bilateral con 18 yemas por planta. El suelo era franco-arenoso y el marco de plantación de 3 m entre hileras (orientación N-S) y 1,5 m entre plantas. Se instalaron 4 tratamientos que corresponden a tres diferentes sistemas de instalación de tela antigranizo: sistema Grembiule (Gr) el cual utiliza tubos rotantes, separadores y alambres; sistema túnel (Tu) el cual reemplaza separadores por un arco metálico (Cabral et al, 1999); malla unida en el interfilas o sistema Grembiule modificado (Mu) y un testigo sin protección, (Te). Los tratamientos se instalaron en un diseño de parcelas al azar con 4 repeticiones. Cada repetición correspondió a 15 plantas distribuidas en 3 hileras contiguas (unidad experimental). Se usó malla antigranizo estándar, de polietileno de alta densidad (0.947 g cm⁻³) con protección ultravioleta, tejida tipo giro inglés (2 x 1, abertura de 3,6 x 7,5 mm).

Temperatura y humedad relativa del aire

La temperatura y humedad relativa del aire se monitorearon cada 30 minutos durante 39 días (desde el 16-01-2011 hasta el 23-02-2011) con termohigrómetros digitales transmisores (Klima Logger, TFA Dostmann GmbH & Co. KG, Wertheim - Reicholzheim, Alemania), los que se colocaron fijos en la zona de los racimos de una planta representativa en cada unidad experimental y estuvieron conectados inalámbricamente a una estación con data logger (Klima data 30.3015, TFA Dostmann GmbH & Co. KG, Wertheim - Reicholzheim, Alemania).

Radiación incidente

En una planta representativa de cada unidad experimental se midió el flujo de fotones

fotosintéticamente activos (Photosynthetic Photon Flux Density, PPF; $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) incidente en la cara este y oeste de la canopia (a 0,25 m desde el centro, longitudinalmente respecto a la hilera) y en el interior de la misma en la zona del condón de pitones. Las lecturas se realizaron en dos oportunidades (26-01-2011, entre las 11:30 y 12:30 horas y 05-03-2011, entre las 9:30 y 10:30 horas), complementariamente se midió la radiación externa fuera de la malla como referencia (RE). Se utilizó un sensor lineal cuántico (LI-191, LI-COR, Lincoln, NE, EEUU) con un medidor de luz (LI-250A, LI-COR, Lincoln, NE, EEUU).

Velocidad del viento

Se midió la velocidad del viento en el interior de la canopia de una planta representativa en cada unidad experimental, a 20 cm por encima de la altura de los racimos, debajo de la primera capa de hojas y en la cara sudeste del espaldero. Se registró la velocidad máxima y velocidad media en un periodo de 2 minutos, en dos momentos del ciclo (posterior a envero y previo a cosecha) y dos veces en cada momento (entre las 9:00 y 10:00; y entre las 13:00 y 14:00 h). Se utilizó un anemómetro digital de mano (3000, KESTREL, Chester PA, EEUU).

VARIABLES FISIOLÓGICAS Y VEGETATIVAS

En dos oportunidades durante el ciclo vegetativo (envero y previo a cosecha) se realizó monitoreo de potencial hídrico foliar en cinco momentos del día: preamanecer, 9:00, 12:00, 15:00 y 18:00 horas en todas las unidades experimentales. Para cada medición, se extrajo una hoja expuesta, del quinto o sexto nudo del brote de una planta representativa de la unidad experimental. Las mediciones se realizaron mediante el método de la cámara de presión (Scholander et al., 1965) utilizando una cámara de presión (Modelo 2, Biocontrol, Buenos Aires, Argentina). Se midió fotosíntesis, transpiración y conductancia estomática en los mismos momentos que potencial hídrico foliar (27-01-2011 y 09-03-2011; a las 9:00, 12:00, 15:00 y 18:00 horas), con analizador portátil de gases por infrarrojo (CIRAS 2, PPSystems, Hertfordshire, R.U.) y cubeta automática universal de 2,5 cm² (PLC6 (U) CRS121, PP Systems, Hertfordshire, R.U.).

VARIABLES PRODUCTIVAS

Semanalmente se muestrearon 50 bayas por unidad experimental (UE) desde envero a cosecha en las que

se determinó sólidos solubles totales (Brix; ATC-1E, ATAGO, Tokio, Japón), pH (827PHLAB, METROHM, Herisau, Suiza) y acidez total (por titulación ácido base con hidróxido de sodio 0,1N). En el momento de cosecha se extrajo una muestra de 100 bayas por UE, de las cuales 50 fueron separadas para la determinación de antocianinas totales e índice de polifenoles totales (IPT) mediante el protocolo de estimación rápida por extracción parcial caliente (Riou y Asselin, 1996). Se registró el número de racimos por planta, el peso de racimo, el peso de baya y la producción por planta. En invierno, se determinó el peso de la madera de poda y se calculó el índice de Ravaz como el cociente entre la producción y el peso de poda.

Análisis estadístico

Los resultados se analizaron con el software Infostat (versión 2020; Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina) utilizando modelos lineales mixtos. En los datos de medidas repetidas, se agregaron réplicas al modelo como un efecto aleatorio para indicar correlación. Las medias se compararon mediante la prueba múltiple de Fisher ($p \leq 0,05$).

3. Resultados y Discusión

Temperatura y humedad relativa del aire

Los sistemas de instalación de malla antigranizo modificaron el microclima de la canopia, aunque no se comportaron de igual manera. Observamos que la malla instalada en sistema Grembiule (Gr) generó una disminución de la temperatura media del aire y un aumento de la humedad relativa. Mientras que en el sistema túnel (Tu) la temperatura del aire fue similar al testigo (Te), con la malla unida en el interfilar (Mu) se observó los mayores valores de temperatura (Figura 1). Este comportamiento no se esperaba, dado que la protección con malla disminuye la radiación y de este modo no se hubiera incrementado tanto la temperatura, aunque un comportamiento similar ha sido mencionado por Ebert y Casierra (2000), y puede deberse a una mayor interferencia en la circulación del aire generada por la malla instalada en este sistema (Iglesias y Alegre, 2006). El comportamiento de la temperatura observado en el sistema Gr, es un aspecto de interés, ya que la malla instalada en este sistema podría mitigar el efecto del incremento de la

temperatura por cambio climático y el posible daño en frutos expuestos (Blanke, 2008).

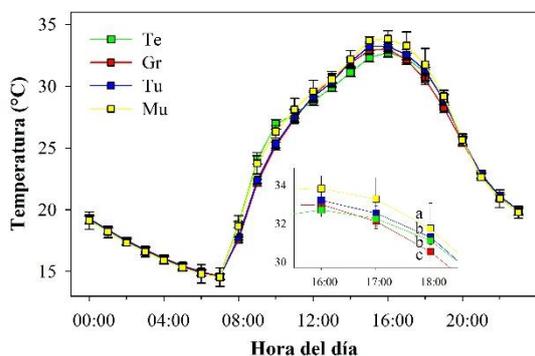


Figura 1. Evolución de la temperatura media del aire (°C) registrada en el interior de la canopia desde el 16-01-2011 hasta el 24-02-2011. Medias con letras iguales no son significativamente diferentes (Fisher $p \leq 0,05$). Las barras indican error estándar.

Al realizar el análisis para un día específico, se observó un comportamiento semejante entre Te y Mu, quienes presentaron mayores valores de temperatura del aire (Figura 2) y menor humedad relativa (Figura 3), aunque en un momento de nubosidad, la temperatura y humedad relativa del aire fueron similares entre tratamientos (Solomakhin y Blanke, 2010). Esto puede resultar de interés para zonas más frescas o de mayor nubosidad en las cuales los sistemas probados provocarían menores diferencias de microclima. La evolución de las temperaturas máximas diarias observadas entre tratamientos (Figura 4), presentaron mayores diferencias en enero que en febrero, debido a las mayores temperaturas registradas en ese mes (Lakatos et al., 2011, Solomakhin y Blanke, 2010). Encontramos que el sistema Mu incrementó la temperatura máxima media diaria en 0,9°C y que el Gr redujo la misma 0,3°C mientras que el Tu se comportó similar a Te. En el sistema de instalación Mu la malla estuvo dispuesta de modo similar al sistema doble vertiente y al ser mayor la superficie cubierta hubo una considerable interferencia en el intercambio de masa de aire con la atmósfera circundante.

Radiación incidente

La malla antigranizo disminuyó el flujo de fotones fotosintéticamente activo (PPFD) incidente en la canopia (Tabla 1). La reducción respecto a la radiación de referencia (directa) provocada por los

sistemas de instalación de malla antigranizo, coincide con lo publicado por varios autores (Iglesias y Alegre, 2006, Mupambi et al., 2018).

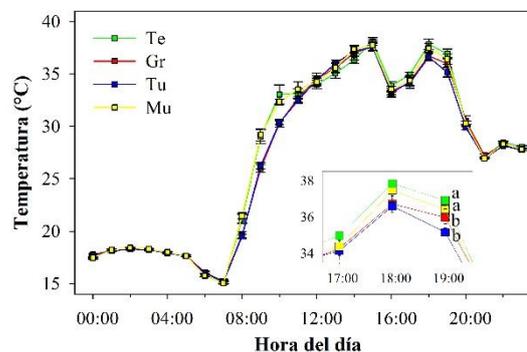


Figura 2. Curso diario de la temperatura del aire (°C) registrada el día 27-01-2011. Medias con letras iguales no son significativamente diferentes (Fisher $p \leq 0,05$). Las barras indican error estándar.

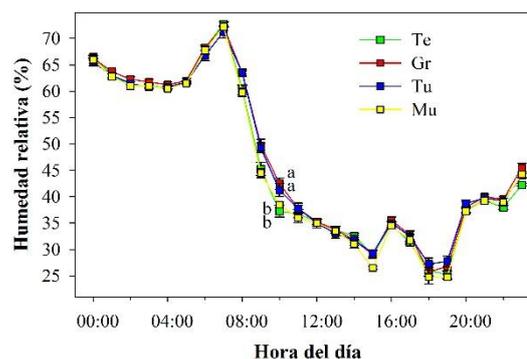


Figura 3. Curso diario de la humedad relativa del aire (%) registrada el día 27-01-2011. Medias con letras iguales no son significativamente diferentes (Fisher $p \leq 0,05$). Las barras indican error estándar.

Teniendo en cuenta el Índice de saturación lumínica (I_s), para las mediciones de PPFD incidente realizadas el 26-01-2011 (entre las 11:30 y 12:30 h), los valores medidos por debajo de la malla, longitudinalmente a la hilera en ambas caras de la canopia (este y oeste), se encontraban dentro del rango necesario para alcanzar una fotosíntesis máxima en la primera capa de hojas; en cambio para la segunda fecha de monitoreo (05-03-2011), dado el horario (entre las 09:30 y 10:30 h), únicamente se registraron niveles de PPFD incidente superiores al I_s en la cara este de la canopia (Keller, 2015). Esto se debe en parte a que la radiación incidente es función de la posición de la tela antigranizo y el momento de determinación a lo

largo del día (Del Monte et al., 2006); razón por la que el PPFD incidentes no se comportó de igual modo bajo los distintos sistemas de instalación, en

las fechas (momento del año) y horarios monitoreados.

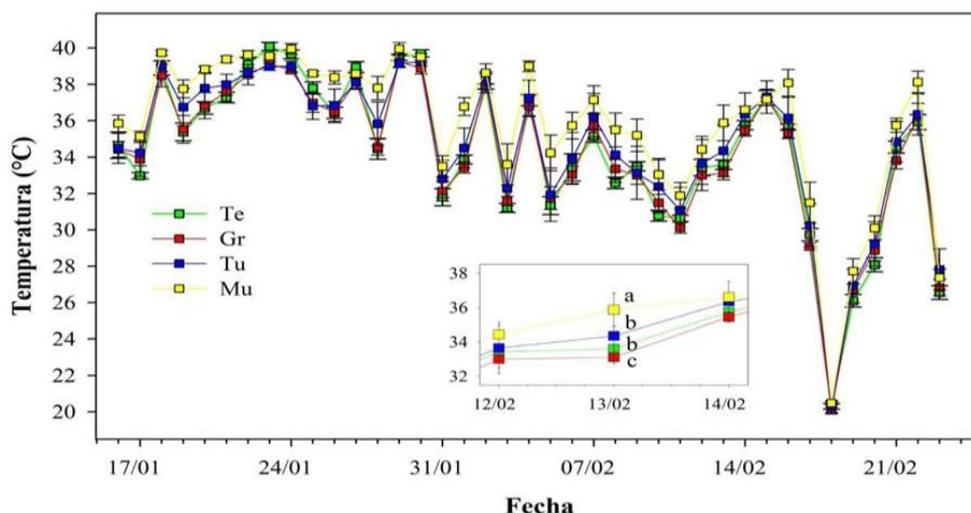


Figura 4. Curso diario de la temperatura máxima del aire (°C) registrada, en el interior de la canopia desde el 16-01-2011 hasta el 23-02-2011. Medias con letras iguales no son significativamente diferentes (Fisher $p \leq 0,05$). Las barras indican error estándar.

Tabla 1. PPFD ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) de referencia (RE) e incidentes en el centro de la canopia (C) y en las caras este (E) y oeste (O). Valores medios y porcentuales registrados los días 26-01-2011 y 05-03-2011. Medias con letras iguales no son significativamente diferentes (Fisher $p \leq 0,05$).

Fecha	Tratamiento	RE	PPFD	PPFD% (E)	PPFD	PPFD% (O)	PPFD	PPFD% (C)
26/01/11 (11:30-12:30)	Te	2141	2111	98,6% $\pm 0,6$ a	1681	78,5% $\pm 2,5$ a	147	6,9% $\pm 0,6$ a
	Gr	1817	1410	77,5% $\pm 0,6$ c	97	53,1% $\pm 2,5$ c	86	4,6% $\pm 0,6$ b
	Tu	1844	1438	78,1% $\pm 0,6$ c	1034	56,6% $\pm 2,5$ c	85	4,5% $\pm 0,6$ b
	Mu	1968	1602	81,5% $\pm 0,6$ b	1276	65,0% $\pm 2,5$ b	127	6,5% $\pm 0,6$ a
Valor <i>p</i>				<0,0001		<0,0001		0,0296
05/03/11 (9:30-10:30)	Te	1154	1130	97,8% $\pm 0,9$ a	64,4	5,6% $\pm 0,1$ a	42	3,7% $\pm 0,1$ a
	Gr	1268	986	77,8% $\pm 0,9$ bc	60,4	4,8% $\pm 0,1$ b	36	2,9% $\pm 0,1$ b
	Tu	1261	957	75,8% $\pm 0,9$ c	60,3	4,8% $\pm 0,1$ b	37	2,9% $\pm 0,1$ b
	Mu	1234	989	80,1% $\pm 0,9$ b	61,7	5,0% $\pm 0,1$ b	39	3,2% $\pm 0,1$ b
Valor <i>p</i>				<0,0001		0,0003		0,0088

Velocidad del viento

Todos los sistemas de instalación evaluados redujeron la velocidad del viento incidente en la canopia. La mayor reducción de la velocidad del viento respecto al Te la produjeron los sistemas de instalación Tu y Gr, y la menor el Mu (Tabla 2). La reducción máxima de la velocidad del viento encontrado en el presente ensayo (44 al 55%) coincide con lo mencionado por varios autores (Middleton y McWaters, 2002; Bosco et al., 2018).

En zonas donde la incidencia de viento es alta, podría considerarse la utilización de malla plástica antigranizo para reducir los efectos negativos sobre las plantas, como disminución de la fotosíntesis por cierre estomático (Campbell-Clause, 1998) y el daño en frutos (Garnaud, 1998); y en regiones donde la incidencia de viento es mayor, podría reducirse el efecto negativo sobre el crecimiento de brotes, el área foliar y el rendimiento en variedades sensibles (Carey et al., 2007).

Tabla 2. Velocidad del viento máxima y medias (m s⁻¹), registradas los días 03-02-2011 y 17-02-2011. Medias con letras iguales no son significativamente diferentes (Fisher $p \leq 0,05$).

Tratamiento	Día 03-02-2011						Día 17-02-2011					
	Vel _{max}			Vel _{med}			Vel _{max}			Vel _{med}		
Te	1,43	±0,05	a	0,58	±0,03	a	1,41	±0,06	a	0,66	±0,04	a
Gr	0,65	±0,05	c	0,3	±0,03	c	0,94	±0,06	c	0,41	±0,04	b
Tu	0,69	±0,05	c	0,25	±0,03	c	0,8	±0,06	c	0,35	±0,04	b
Mu	1,03	±0,05	b	0,44	±0,03	b	1,19	±0,06	b	0,58	±0,04	a
Valor p	<0,0001			<0,0001			0,0001			0,0002		

Potencial hídrico foliar

El estado hídrico de la planta fue afectado en diferente forma por los sistemas de instalación. Encontramos que la evolución diaria de potencial hídrico foliar de plantas bajo malla instalada en sistema Mu se comportó muy parecido al testigo en las dos fechas monitoreadas; en cambio las plantas bajo los sistemas de instalación Gr y Tu presentaron un potencial hídrico foliar mayor al Te (Figura 5A, B). Esto se puede relacionar con los resultados mencionados por Crété et al. (2001), quienes han reportado una disminución del suministro de agua de riego (sin causar estrés hídrico) asociado al uso de la malla antigranizo. En los sistemas de instalación Gr y Tu, la canopia de las plantas estuvieron restringidas por la disposición de la malla, con menor movimiento de aire y mayor humedad relativa, lo

que pudo favorecer la formación de una capa límite de mayor espesor y menor pérdida de agua por evapotranspiración (Azcón-Bieto y Talón, 2013). Este aspecto es de considerable interés en zonas de riego con escasez de agua ya que podría ser considerado como herramienta complementaria en las estrategias de riego que apunten a reducir el consumo de agua (Avenant y Avenant, 2022, Smita, 2007; Villalobos-Soublett et al., 2021). Además, en las dos oportunidades en que se realizó monitoreo del potencial hídrico foliar, el comportamiento diario fue diferente bajo los sistemas de protección Gr y Tu respecto al Mu y Te, a pesar de no observarse diferencias entre tratamientos en el monitoreo de preamanecer.

Fotosíntesis, conductancia estomática y transpiración

Para las fechas en que se realizó monitoreo de conductancia estomática y transpiración no se observaron diferencias significativas, a pesar de observarse una variación mayor a 1m/s en la velocidad del viento en tratamientos con protección respecto al Te (Hagen y Skidmore, 1974). Encontramos que la fotosíntesis fue afectada por efecto de la malla antigranizo, aunque la evolución diaria fue diferente entre las fechas analizadas. En la primera fecha observamos que durante la mañana los tratamientos Gr y Tu presentaron niveles más altos respecto al Te, pero al mediodía y durante la tarde el comportamiento entre tratamientos fue similar (Figura 6A). En la segunda fecha analizada, la tasa fotosintética bajo los tratamientos con

protección fue mayor (Figura 6B). Esto puede explicarse por las condiciones de monitoreo (horario y época del año) que resultaron más cercanas al óptimo fotosintético (Cuevas et al., 2006) o bien podría estar relacionado a la mayor concentración de clorofila observada bajo malla (Avenant, 1994) aunque, en manzanos un incremento en el contenido de clorofila bajo mallas no se tradujo en una mayor tasa fotosintética (Solomakhin y Blanke, 2008). La mejora en la tasa fotosintética observada en horas de la mañana en la primera fecha (bajo Gr y Tu) y por los todos los tratamientos de protección durante la segunda fecha en comparación con el testigo, resulta de gran interés. Esto puede deberse a una reducción de la fotoinhibición por un efecto de sombreado generado por los tratamientos con malla antigranizo (Azcón-Bieto y Talón, 2013).

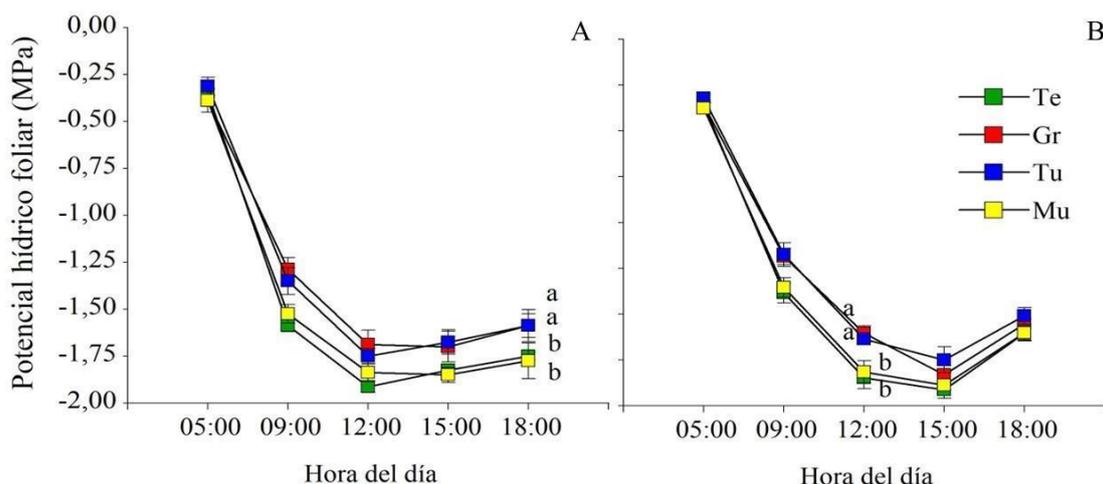


Figura 5. Evolución diaria del potencial hídrico foliar (MPa) registrada en los distintos tratamientos cv. Merlot, correspondiente a los días 27-01-2011 (A) y 09-03-2011 (B). Medias con letras iguales no son significativamente diferentes, ns = no significativo (Fisher $p \leq 0,05$). Las barras indican error estándar.

Crecimiento vegetativo

El método de instalación afectó el crecimiento vegetativo medido a través del peso del material extraído en la poda (Tabla 3). Si bien los tratamientos de protección Gr y Mu fueron similares al testigo, encontramos que bajo el sistema Tu el peso del material extraído durante la poda invernal fue menor. Esto puede estar relacionado al efecto barrera causado por la malla instalada en túnel, lo que dio lugar al curvado de los brotes, disminución

de la conductividad hidráulica y finalmente, reducción del crecimiento radial y longitudinal de los mismos (Schubert et al., 1995).

Componentes del rendimiento

Los rendimientos fueron similares entre los tratamientos. Blanke (2008) mencionan disminución del rendimiento en manzanos aunque, do Amarante et al. (2018), han encontrado un incremento de la producción de manzanas bajo la cobertura con

mallas y Avenant (1994), observó incremento del rendimiento en uva de mesa por efecto de la malla antigranizo pero en nuestro experimento, los tratamientos con protección antigranizo no afectaron el rendimiento total (Kg uva planta⁻¹), el

número de racimos por planta ni el peso de racimo respecto al testigo (Tabla 3), lo que coincide con lo mencionado en estudios previos (Guida et al., 1997; Villalobos-Soublet et al., 2021); aunque, el peso de baya bajo el sistema Tu fue menor (Tabla 4).

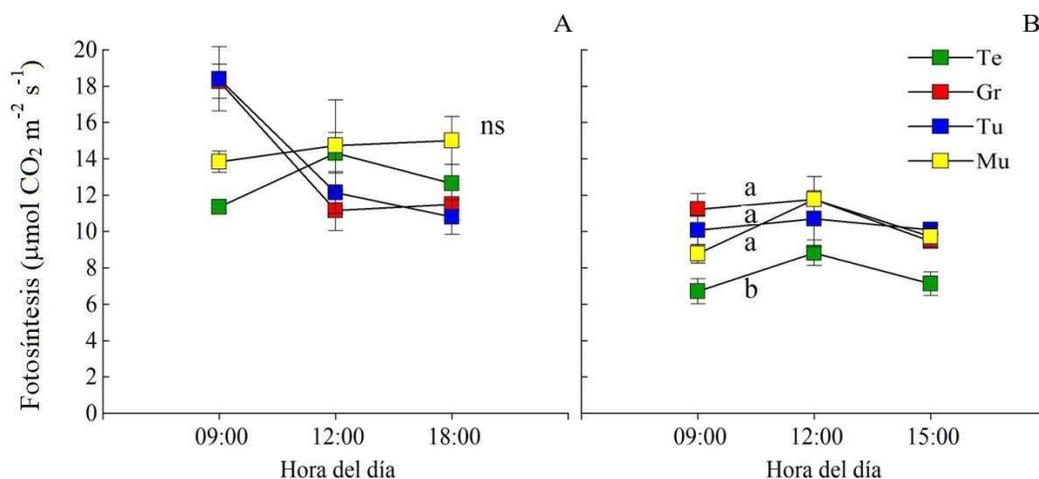


Figura 6. Comportamiento de la fotosíntesis neta ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) registrada en los distintos tratamientos cv. Merlot durante los días 27-01-2011 (A) y 09-03-2011 (B). Medias con letras iguales no son significativamente diferentes, ns = no significativo (Fisher $p \leq 0,05$). Las barras indican error estándar.

De todos modos, estas observaciones se basaron en una temporada de ensayo, lo que posiblemente no sea suficiente para determinar la influencia de los sistemas de instalación con malla antigranizo sobre el cultivo; la formación y diferenciación de yemas es un proceso influenciado por la luz y requiere más de una temporada para completarse (Sánchez y Dokoozlian, 2005). Encontramos que, si bien no hubo

cambios en el rendimiento total, el Índice de Ravaz fue reducido por el sistema Mu mientras que los sistemas Gr y Tu se comportaron similar al Te. Si bien el equilibrio vegetativo fue modificado por efecto de la protección con malla antigranizo como se visualiza en la última columna de Tabla 3, los valores registrados corresponden a plantas equilibradas (Keller, 2015).

Tabla 3. Número de racimos, peso de racimo, rendimiento por planta, peso del material extraído por poda invernal e Índice de Ravaz. Letras iguales no son significativamente diferentes (Fisher $p \leq 0,05$).

Tratamiento	Racimos por planta (N°)	Peso de racimo (g)	Uva (Kg planta ⁻¹)	Peso poda (Kg planta ⁻¹)	Índice de Ravaz
Te	44,2 ±1,4	152,6 ±4,5	6,64 ±0,20	0,60 ±0,03 a	11,6 ±0,5 ab
Gr	42,7 ±1,4	147,6 ±4,5	6,25 ±0,20	0,61 ±0,03 a	10,6 ±0,5 bc
Tu	44,6 ±1,4	142,1 ±4,5	6,23 ±0,20	0,51 ±0,03 b	12,5 ±0,5 a
Mu	40,6 ±1,4	152,1 ±4,5	6,11 ±0,20	0,65 ±0,03 a	10,0 ±0,5 c
Valor p	0,1479	0,3147	0,2753	0,0012	0,0008

Evolución de la madurez y composición de baya a cosecha

En nuestro experimento no hubo reducción de sólidos solubles totales (°Brix) a cosecha bajo los tratamientos con malla, similar a lo mencionado por otros autores en uva de vinificar (Guida et al, 1997) como en manzanos (Iglesias y Alegre, 2006); sin embargo, estudios realizados en Cabernet Sauvignon bajo mallas de sombreado evidenciaron una reducción en los °Brix (Martínez-Lüscher et al., 2020). Además, observamos que la evolución Brix fue similar entre tratamientos (Figura 7A).

A pesar de las diferencias en las condiciones térmicas provocadas por el sistema Tu, tampoco hubo diferencias en el pH ni en su evolución (Figura 7B), sin embargo, la acidez de las bayas evolucionó más lentamente bajo el tratamiento Gr respecto a Tu y Te (Figura 7C), aunque a cosecha observamos similitud entre todos los tratamientos.

El IPT fue similar para todos los tratamientos. Los mayores contenidos de antocianinas totales observado en el tratamiento Gr respecto a los tratamientos Mu y Te (Tabla 4), podría deberse a una mayor biosíntesis, una menor degradación oxidativa, o una combinación de ambos (Bergqvist et al., 2001; Haselgrove et al., 2000, Spayd et al., 2002), debido a los menores valores de temperatura registrado bajo el sistema Gr

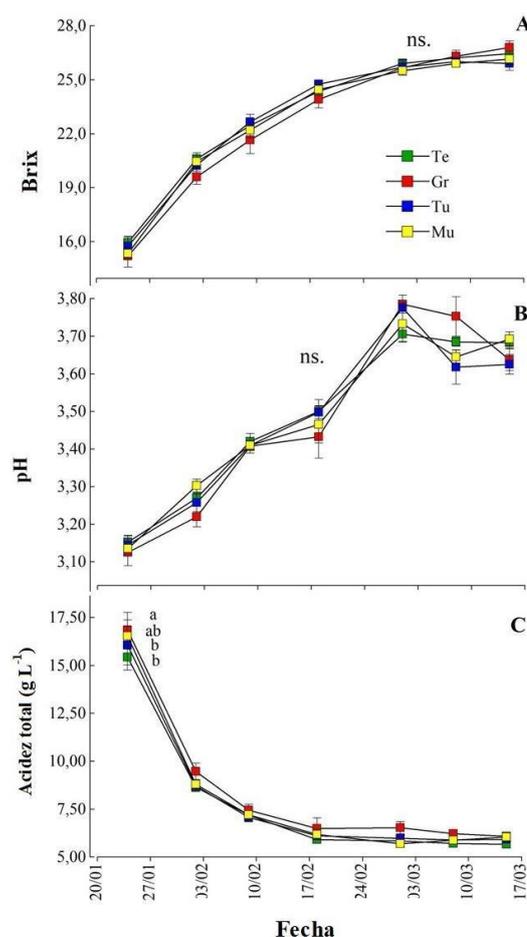


Figura 7. Evolución de sólidos solubles totales expresados en °Brix (A), pH (B) y Acidez total expresada en g L⁻¹ de Ac. tartárico (C) registrados, en los distintos tratamientos cv. Merlot, desde 24-01-2011 hasta 15-03-2011. Medias con letras iguales no son significativamente diferentes, ns = no significativo (Fisher $p \leq 0,05$). Las barras indican error estándar.

Tabla 4. Peso de baya, Antocianinas totales e Índice de Polifenoles Totales en bayas a cosecha. Letras iguales no son significativamente diferentes (Fisher $p \leq 0,05$).

Tratamiento	Peso de baya (g)			Antocianinas totales en bayas (mg Kg ⁻¹)			IPT	
Te	1,07	±0,02	b	1468,4	±34	c	88,4	±1,5
Gr	1,06	±0,02	b	1636,7	±34	a	92,2	±1,5
Tu	1,00	±0,02	c	1579,7	±34	ab	87,3	±1,5
Mu	1,13	±0,02	a	1487,4	±34	bc	90,9	±1,5
Valor p	0,0079			0,0142			0,1179	

4. Conclusiones

Bajo las condiciones del ensayo, se observó que las alteraciones del microclima de la canopia en viñedos conducidos en espaldero dependieron del sistema de instalación de malla antigranizo empleado, lo que a su vez influyó en algunas variables del comportamiento de las plantas y en algunas características de la producción. El Gr resultó ser el sistema de instalación más restrictivo para la expresión vegetativa, además, ofreció un microclima más fresco y húmedo. La variante Tu ofreció un comportamiento muy parecido al Gr en aspectos microclimáticos, aunque favoreció en menor medida la concentración de antocianinas totales, redujo el peso de la baya. En contraste, el sistema Mu presentó condiciones microclimáticas y expresión vegetativa comparables al testigo. Dado el mejor estado hídrico de las plantas bajo los sistemas Gr y Tu, resulta crucial profundizar en las relaciones hídricas de los principales cultivares de vid protegidos con malla plástica antigranizo. También sería pertinente estudiar el efecto de diferentes tipos de tejido (en términos de densidad y color). Además, sería valioso complementar este estudio con microvinificaciones para evaluar el impacto de la malla antigranizo en la calidad enológica de las variedades más relevantes de la región, considerando que nuestros resultados indican una mayor acumulación de antocianinas totales bajo el sistema Gr.

5. Agradecimientos

Ensayo financiado por Proyectos "P.T.R. Apoyo al desarrollo vitivinícola regional", "PRET MZASJ-1251306 Desarrollo del oasis sur de Mendoza" del Instituto Nacional de tecnología Agropecuaria (INTA) y Bodega Casa Bianchi (Valentín Bianchi S.A.C.I.F.).

6. Referencias

- Avenant, J.H. (1994). The effect of hail netting on the performance of table grapes in the summer rainfall regions of South Africa. International Symposium on Table Grape Production. Anaheim, California. 227-229.
- Avenant, J.H.; Avenant, E. (2022). The effect of overhead netting on water utilization and soil water content of a table grape vineyard. *Acta Hort.* 1335, 627-634.
- <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2022.1335.79>.
- Azcon-Bieto, J. y Talón, M. (2013). Fundamentos de fisiología vegetal. 2da Edición. McGraw-Hill. Interamericana. España.
- Bergqvist, J.; Dokoozlian, N. y Ebisuda, N. (2001). Sunlight exposure and temperatures effects on berry growth and composition of Cabernet Sauvignon and Grenache in the San Joaquin Valley of California. *Am. J. Enol. Vitic.* 52(1): 1-7.
- Blanke, M.M. (2008). Perspectives of fruit research and apple orchard management in Germany in a changing climate. *Acta Hort. (ISHS)* 772:441-446.
- Bosco, L.C.; Bergamaschi, H.; Cardoso, L.S.; de Paula, V.A.; Marodin, G.A.B.; Brauner, P.C. (2018). Microclimate alterations caused by agricultural hail net coverage and effects on apple tree yield in subtropical climate of Southern Brazil. *Bragantia*, 77(1), 181-192. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.2016459>.
- Cabral, D.; Worlock, A.; Gudiño, J.; Fuentes C. (1999). Protección de Frutales y Viñedos contra el granizo. Guía práctica para la construcción de estructuras. Publicación INTA.
- Campbell-Clause, J.M. (1998). Stomatal response of grapevines to wind. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 38: 77-82.
- Carey, V.A.; Pienaar, W. y Archer, E. (2007). Efecto del viento en el funcionamiento de la vid en Stellenbosch, Sudáfrica. *Rev. Enología* 3 – Año 4. Julio – Agosto.
- Crété, X.; Regnard J.L.; Ferre G. y Tronel, C. (2001). Effects secondaires et conséquences sur la conduite du verger. *L'arboriculture fruitière*. 553: 51-55.
- Cuevas, E.; Baeza, P. y Lissarrague, J. R. (2006). Variation in stomatal behaviour and gas exchange between mid-morning and mid-afternoon of north-south oriented grapevines (*Vitis vinifera* L. cv. Tempranillo) at different levels of soil water availability. *Scientia Horticulturae*, 108(2), 173-180.
- DACC. (Dirección de Agricultura y Contingencias

- Climáticas). (2023). Estadísticas 1993-2023 [en línea]. [<https://www.mendoza.gov.ar/contingencias/riesgo-agricola/>] [Consulta: 22 de noviembre, 2023].
- Del monte, R.; Uliarte, E.; Ambrogetti, A.; Galat, E. y Prieto, J. (2006). Sistemas de conducción de múltiple prestación cultural (SAMPC). Influencia de la arquitectura y de la tela antigranizo sobre el microclima lumínico. *Rev. Enología* 6 – Año III. Noviembre – Diciembre.
- Di Césare; L.U. (1997). Conducción y manejo de durazneros, ciruelos y perales bajo malla antigranizo. Simposio de Protección Antigranizo, San Rafael, Argentina.
- do Amarante, C.V.T.; Stanger, M.C.; Coldebella, M.C.; Vilvert, J.C.; dos Santos, A.; Steffens, C.A. (2018). Fruit quality and yield of 'Imperial Gala' apple trees protected by anti-hail nets of different colorations in southern Brazil. *Acta Hort.* 1205, 897-904. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2018.1205.115>.
- Ebert, G. y Casierra, F. (2000). Verringert die Einnetzung grundsätzlich die Assimilationsleistung von Apfelbäumen?. *Erwerbsobstbau* 42:12-14.
- Garnaud, J.C. (1998). Las mallas antigranizo en frutales. *Rev. Horticultura Internacional* 19: 19-23.
- Guida, G.; Ojeda, H.; Catania, C.; Chaab, J.; Vila, H.; Nazralla, J.; Castro, O. y García L., (1997). Ensayo sobre comportamiento de la vid bajo red antigranizo. Simposio de Protección Antigranizo, San Rafael, Argentina.
- Hagen, L.J. y Skidmore, E.L. (1974). Reducing turbulent transfer to increase water-use efficiency. *Agricultural Meteorology* 14: 153-168
- Haselgrove, L.; Botting, D.; Van Heeswijck, R.; Hoj, P.B.; Dry, C. Ford, C. e Iland, P.G. (2000). Canopy microclimate and berry composition: the effect of bunch exposure on the phenolic composition of *Vitis vinifera* L. cv. Shiraz grape berries. *Australian Journal of Grape and Wine Research* 6: 141-149.
- Iglesias, I. y Alegre, S. (2006). The effect of anti-hail nets on fruit protection, radiation, temperature, quality and profitability of „Mondial Gala“ apples. *Journal of Applied Horticulture*, 8 (2): 91-100.
- INV. (2024). Informe anual de superficie 2023. Instituto Nacional de Vitivinicultura, Mendoza. Disponible en https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/2018/10/informe_anual_de_superficie_2023.pdf [Último acceso 16/05/2024].
- Jafari Burki, L.; Kavooosi, B.; Zare, H. (2022). Response of some Vegetative, Qualitative and Quantitative Traits of Grape Vine (*Vitis vinifera* L. Cv. Rishbaba) to Type of Color and Percentage of Shading in Netting System. *Journal of Horticultural Science*, 36(3), 671-682. <https://doi.org/10.22067/jhs.2021.73470.1105>.
- Keller, M. (2015). *The Science of Grapevines: Anatomy and Physiology*. Ed. 2, 522p. WA. USA. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-06797-7>
- Lakatos, L.; Gonda, I.; Soltész, M.; Szabó, Z.; Szél, J. y Nyéki J. (2011). Effect of excessive weather on the micro-climate of apple plantations under the hail protection nets. *International Journal of Horticultural Science* 17:81-85.
- Martínez-Lüscher, J.; Chen, C. C. L.; Brillante, L. y Kurtural, S. K. (2020). Mitigating heat wave and exposure damage to “Cabernet Sauvignon” wine grape with partial shading under two irrigation amounts. *Frontiers in Plant Science*, 11, 579192.
- Middleton, S y McWaters, A. (2002). Hail Netting of Apple Orchards – Australian Experience. *The compact fruit tree*. Volumen 35 (2): 51-55.
- Mupambi, G.; Anthony, B. M.; Layne, D. R.; Musacchi, S.; Serra, S.; Schmidt, T.; Kalcsits, L. A. (2018). The influence of protective netting on tree physiology and fruit quality of apple:

- A review. *Sci. Hortic.*, 236, 60-72.
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.03.014>.
- Ojeda, H. (2007). Compuestos fenólicos de la uva. *Rev. Enología* 4 – Año IV. Setiembre – Octubre
- Ojer, M.; Podestá, L.; Arjona C. y Gil F. (2002). Durazneros bajo tela antigranizo. Efecto sobre rendimiento y coloración de piel. *Rev. FCA UNCuyo*. Tomo XXXIV. (1):17-23.
- Ortiz Maldonado. (1991). *Adversidades Agrometeorológicas de Mendoza*. Ed. Centro de Bodegueros.
- Osaer, A. (1997). Incidence agronomique des filets paragrele. *Expériences francaises*. Simposio de Protección Antigranizo, San Rafael, Argentina.
- Rana, G.; Katerji, N.; Introna, M. y Hammami, A. (2004). Microclimate and plant water relationship of the "overhead" table grape vineyard managed with three different covering techniques. *Scientia Horticulturae* 102: 105-120.
- Riou V., y Asselin C., 1996. Potentiel polyphénolique disponible du raisin. Estimation rapide par extraction partielle à chaud. *Progrès Agricole et Viticole* 113(18): 382-384.
- Salazar, M., Callejas, R., y Morales, L. (2018). Evaluation of the use of a net coverage system in table grape vines, Thompson Seedless variety. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 12(2), 338-347. <http://doi.org/10.17584/rcch.2018v12i2.7437>
- Salisbury, F.B. y Ross, C.W. (1994). *Fisiología Vegetal*. Grupo Edit. Iberoamérica S.A. México D.F. 759 p.
- Sánchez L.A. y Dokoozlian, N.K. (2005). Bud microclimate and fruitfulness in *Vitis vinifera* L. *Am. J. Enol. Vitic.* 56(4): 319-329.
- Scholander, P.F., Hammel, H.T.; Bradstreet, E.D., Hemmingsen, E.A. (1965). Sap pressure in vascular plants. *Science*, 148:339-346.
- Schubert, A.; Restagno V., Novello V. y Peterlunger, E. (1995). Effects of shoot orientation on growth, net photosynthesis and hydraulic conductivity of *Vitis vinifera* cv. Cortese. *Am. J. Enol. Vitic.* 46 (3): 324-328.
- Smita, A. (2007). Apple tree and fruit responses to shade netting. Thesis presented in partial fulfillment of the requirements for the degree Master of Science in Agriculture at the University of Stellenbosch.
- Solomakhin, A. y Blanke M. (2008). Coloured hailnets alter Light transmission, spectra and phytochrome, as well as vegetative growth, leaf chlorophyll and photosynthesis and reduce flower induction of apple. *Plant Growth Regulation* 56: 211-218.
- Solomakhin, A. y Blanke, M. (2010). Can coloured hailnets improve taste (sugar, sugar:acid ratio), consumer appeal (colouration) and nutritional value (anthocyanin, vitamin C) of apple fruit?. *LWT - Food Science and Technology* 43:1277-1284.
- Spayd, S.E.; Tarara, J.M.; MEE, D.L. y Ferguson, J.C. (2002). Separation of sunlight and temperature effects on the composition of *Vitis vinifera* cv. Merlot berries. *Am. J. Enol. Vitic.* 53:3, 171-182.
- Villalobos-Soublett, E.; Gutiérrez-Gamboa, G.; Balbontín, C.; Zurita-Silva, A.; Ibacache, A.; Verdugo-Vásquez, N. (2021). Effect of shading nets on yield, leaf biomass and petiole nutrients of a Muscat of Alexandria vineyard growing under hyper-arid conditions. *Horticulturae*, 7(11), 445. <https://doi.org/10.3390/horticulturae7110445>.



Germinación de semillas de *Leptochloa crinita* bajo distintos tipos de acondicionamiento

Liliana Cecilia Ramos^{1,2*}, Sebastián Mora¹, Pablo Eugenio Villagra^{3,4}

1. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Estación Experimental Agropecuaria (EEA) Rama Caída, El Vivero s/n, San Rafael (5600), Mendoza, Argentina.
2. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).
3. Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA) Centro Científico Tecnológico (CCT) CONICET Mendoza.
4. Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Cuyo Alte. Brown 500, Chacras de Coria, Luján de Cuyo, (5507), Mendoza.

*E-mail: ramos.liliana@inta.gob.ar

PALABRAS CLAVES

Tecnología de semillas
Forrajera nativa
Monte

RESUMEN

Leptochloa crinita es una gramínea forrajera perenne nativa de alto valor forrajero. Presenta inflorescencias formadas por racimos de espiguillas. Cada espiguilla está compuesta por un antecio fértil que contiene el cariopsis y 1-2 antecios estériles. La lemma inferior de cada espiguilla es triaristada. La manipulación de la unidad seminal es compleja debido a las aristas y requiere acondicionamiento para su eliminación. El objetivo del trabajo fue analizar el efecto de distintos tipos de acondicionamiento sobre la germinación. Los tratamientos fueron desaristado manual (DM) y fuego (DF) manteniendo las estructuras seminales y desglumado dejando solo el cariopsis (CA). Se utilizó la espiguilla como tratamiento control (C). Los ensayos se llevaron a cabo en cámara de germinación, las semillas fueron puestas en bandejas plásticas bajo condiciones controladas de luz y temperatura según protocolo *Eragrostis curvula*; siendo cuatro repeticiones por cada tipo de acondicionamiento. La germinación con DF fue significativamente menor, mientras que los cariopsis desglumados germinaron más rápido. Estas observaciones muestran que el desglumado no afectó la germinación del cariopsis mientras que los tratamientos que mantienen las estructuras seminales promueven algún tipo de aletargamiento en la germinación a excepción del fuego, que pareciera no ser un método adecuado de acondicionamiento.

Seed germination of *Leptochloa crinita* under different types of conditioning

KEYWORDS

Seed technology
Native forage
Monte

ABSTRACT

Leptochloa crinita is a native perennial forage grass of high forage value. It has inflorescences formed by clusters of spikelets. Each spikelet is composed of a fertile anther containing the caryopsis and 1-2 sterile anthers. The lower lemma of each spikelet is triaristate. Handling of the seminal unit is complex due to the edges and requires conditioning for removal. The objective of this work was to analyze the effect of different types of conditioning on germination. The treatments were manual de-aristate and fire de-aristate, maintaining the seminal structures and degumming leaving only the caryopsis. The spikelet was used as a control treatment. The trials were carried out in germination chambers, the seeds were placed in plastic trays under controlled conditions of light and temperature according to *Eragrostis curvula* protocol; there were four replicates for each type of conditioning. Germination after fire de-aristate was significantly lower, while degummed caryopsis germinated faster. These observations show that degumming did not affect the caryopsis germination while treatments that maintain the seminal structures promote some kind of germination dormancy except for fire, which seems not to be an adequate conditioning method.

1. Introducción

Las tierras secas cubren el 41% de la superficie terrestre (Reynolds et al., 2007; Cherlet et al., 2018). En Argentina dos tercios de su superficie corresponden a zonas áridas y semiáridas, representadas en las regiones fitogeográficas de la Puna, Chaco Occidental, Monte, Caldenal y Patagonia (Cabrera, 1976; Fernández y Busso, 1999). Debido a la baja fertilidad de los suelos de las tierras secas, el riesgo de degradación y desertificación es grave en el 10-20% de zonas áridas y semiáridas (Millennium Ecosystem Assessment, 2005, Maestre et al., 2013), lo cual se espera que empeore en el contexto del cambio climático, conduciendo a la pérdida de biodiversidad y productividad del suelo (Bedunah y Angerer, 2012).

Los pastizales representan el 30% de la superficie terrestre (Ojima et al., 1993), estando presente más que cualquier otro tipo de vegetación (Wang y Fang, 2009). Sin embargo, desde el siglo pasado su coexistencia y eventual desplazamiento por leñosas, viene siendo objeto de debate, discutiéndose la incidencia antropogénica en la frecuencia de incendios, intensidad de pastoreo, factores bióticos y abióticos (Asner et al., 2003; Biancari et al., 2024). Es por eso, que la necesidad de restaurar y recuperar la capacidad forrajera de los pastizales llevó a la siembra de pastos introducidos para la recuperación de áreas degradadas, sin embargo, se ha demostrado que las pasturas nativas son más adecuadas en regiones áridas y semiáridas (Waters y Shaw, 2003; Kozub et al., 2017). No obstante, por otro lado, las inflorescencias de las gramíneas nativas contienen estructuras seminales que presentan una forma irregular con apéndices que impiden su manipulación y por consiguiente la siembra mecanizada. Los tratamientos de semilla que aplican recubrimientos específicos para la mejora en la manipulación también se ven afectados por dichos apéndices (Guzzomi et al., 2016).

En Argentina, la zona de pastizales más árida es el Monte (Guevara et al., 2009), allí uno de los sistemas productivos predominantes es la cría bovina. La base forrajera de los bovinos está constituida por gramíneas nativas perennes que se encuentran en el Monte. *Leptochloa crinita* es un componente importante de los pastizales de Monte, debido a su amplia distribución (Quiroga et al., 2018), y tolerancia a condiciones de extrema aridez y

salinidad (Greco y Cavagnaro, 2003, Marinoni et al., 2020); además se trata de la especie forrajera de mayor importancia por digestibilidad, buen nivel proteico y preferencia animal (Waistein y Gonzales, 1971; Anderson, 1980). *L. crinita* es una gramínea forrajera perenne que puede ser decumbente o erecta. Presenta inflorescencias densas compuestas por racimos digitados, espiguillas solitarias con dos o tres flores, donde una de ellas es fértil y las otras estériles, protegidas por glumas lanceoladas y donde las superiores son triaristadas (Zuloaga et al., 2012; Mora et al., 2013). Estas aristas de 6-9 mm de largo, tienden a enredarse con las aristas de otras espiguillas formando una masa algodonosa que dificulta la siembra mecánica (Mora et al., 2013), por lo que su eliminación facilitaría su manipulación (Mora, 2014; Guzzomi et al., 2016). Graco y colaboradores (2003) reportaron que la germinación en *L. crinita*, utilizando la espiguilla completa, se logra a temperaturas relativamente cálidas, en un rango de 15-40°C.

Considerando el potencial de *L. crinita* para la restauración de pastizales naturales y la recuperación de la capacidad forrajera en el Monte mendocino, exploramos la potencialidad de uso de sus semillas para la siembra mecanizada, por lo que se planteó como objetivo de este trabajo, evaluar diferentes tipos de acondicionamiento para sus semillas y el efecto de estos sobre la germinación. Para ello, realizamos distintos tipos de acondicionamientos, donde en dos de ellos se buscó eliminar solo las aristas (desaristado manual y por fuego); y en otro, quitar todas las estructuras seminales (desglumado) para dejar libre el cariopsis. La hipótesis planteada es que las semillas acondicionadas mejoran su germinación en comparación con las semillas del tratamiento control.

2. Materiales y métodos

Diseño de los ensayos

Se llevaron a cabo ensayos para evaluar el efecto de tres tipos de acondicionamiento sobre la germinación de semillas de *L. crinita*. Los tratamientos fueron: desaristado manual (DM), desaristado por fuego (DF), desglumado dejando el cariopsis desnudo (CA) y la espiguilla como control (C) (Figura 1).

Las semillas utilizadas en el trabajo se obtuvieron a partir de la cosecha realizada durante marzo y abril de 2024 en las parcelas experimentales de la EEA Rama Caída. El acondicionamiento por desaristado manual se realizó mediante la frotación manual suave de las semillas; por otro lado, el desaristado por fuego se realizó mediante el quemado por corto tiempo mediante el uso de una fuente de fuego sobre las semillas; mientras que el desglumado de las semillas se realizó mediante su fricción en una caja de madera forrada con gomas, que quitaron todas las cubiertas seminales dejando el cariopsis libre sin dañar (Figura 2).



Figura 1. Acondicionamientos de las semillas de *Leptochloa crinita*. A- Por desaristado manual (DM). B- Por desaristado por fuego (DF). C- Por desglumado del cariopsis (CA). D- Control (C).

Para el ensayo de germinación, se prepararon 4 réplicas por tratamiento, siendo un total de 16 bandejas. Se utilizaron bandejas plásticas transparentes (17 cm de largo, 12 cm de ancho, 6 cm de profundidad) y se colocaron toallas de papel humedecidas en agua, para luego colocar las semillas sobre la superficie. Se colocaron 50 semillas por bandeja distribuidas en 10 filas equidistantes. Las bandejas fueron tapadas con sus respectivas tapas plásticas transparentes y llevadas a cámara de germinación (BIO-CONTROL, modelo 500N), con una

alternancia de $30^{\circ}\text{C} \pm 0,1$ a $20^{\circ}\text{C} \pm 0,1$ con un fotoperíodo de 8 hs de luz y 16 hs de oscuridad (Mora, 2009); y fueron acomodadas en dos estantes centrales, ordenadas en forma sistemática para evitar sesgos espaciales. Debido a que la especie no se encuentra descripta en las normas ISTA, se tomó como referencia al género *Eragrostis*, por lo que se estableció la duración del ensayo en 10 días, registrándose la germinación diariamente durante ese período.

Se estimó el porcentaje de germinación acumulada (PGA) mediante la fórmula $\text{PGA} = \text{G}/50 \cdot 100$, donde G es la germinación total durante los 10 días. Por otro lado se estimó el índice de velocidad de germinación modificado para las 50 semillas (IVGm) mediante la fórmula $\text{IVGm} = (\Sigma(\text{G}/\text{T}))/50$, donde G es el número de semillas germinadas en un día específico y T es el día de observación.



Figura 2. Caja de madera forrada con gomas utilizada para desglumar los cariopsis.

Análisis de los datos

Para el análisis de los datos obtenidos se ajustaron modelos lineales generalizados (MLG). Para los datos de germinación se utilizó la distribución binomial con función de enlace logit, mientras que para IVGm se utilizó la distribución normal con función de enlace identity. Se consideró como estadísticamente significativo un p valor $< 0,05$ y se aplicó la prueba a posteriori de Bonferroni. Los análisis fueron

realizados con Infostat versión 2020 (Di Rienzo et al., 2020).

3. Resultados y Discusión

Con respecto al porcentaje de germinación acumulada, los resultados muestran que el acondicionamiento DF afectó negativamente la germinación, mientras que no se encontraron diferencias significativas entre los porcentajes de germinación acumulada del tratamiento C y los otros dos tipos de acondicionamientos (DM y CA). Por otro

lado, sólo en el acondicionamiento CA el porcentaje de germinación acumulada llegó al 100%, mientras que la curva de germinación acumulada del tratamiento control, no alcanzó en su fase de estabilización en los 10 días que duró el ensayo (Figura 3A).

En relación a la velocidad de germinación, se observa que el IVGm es significativamente mayor para el acondicionamiento CA y significativamente menor para DF, es decir las semillas germinan más rápido cuando el cariopsis se encuentra desnudo (Figura 3B).

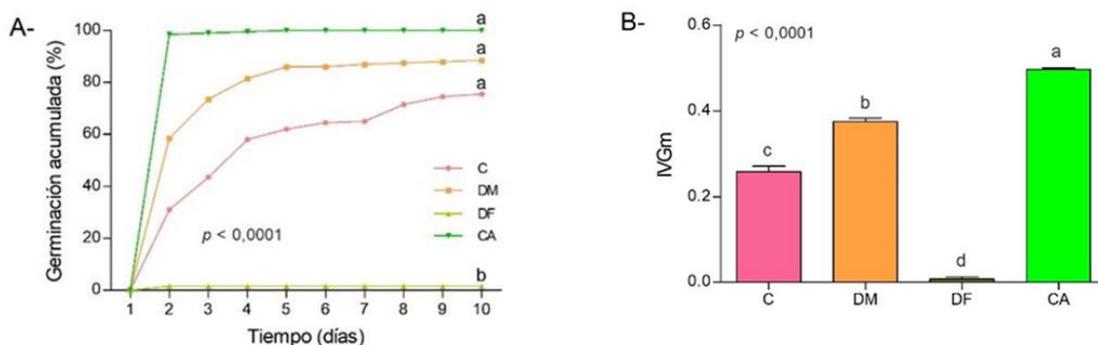


Figura 3. Germinación de semillas de *Leptochloa crinita*. (A-) Germinación acumulada en porcentaje. (B-) Índice de velocidad de germinación modificado. Se muestra C: tratamiento control, DM: desaristado manual, DF: desaristado por fuego, CA: cariopsis desglumado. Se muestra el resultado obtenido del MGL. Las barras corresponden a media \pm error estándar. Letras diferentes indican las diferencias significativas entre las medias según la prueba a posteriori de Bonferroni.

Por lo tanto, en el tratamiento CA además de alcanzar el 100% de germinación acumulada, germinó más rápido. Por el contrario, en el tratamiento DF la germinación alcanzó el 2%, y la velocidad de germinación fue significativamente más baja que en los demás tratamientos.

A diferencia de otras experiencias donde luego de la aplicación del tratamiento térmico se obtuvieron resultados positivos en cuanto a la eliminación de aristas y la no afectación a la germinación (Guzzomi et al., 2016), en este caso es posible que la forma en que se aplicó el fuego, con escaso control de temperatura, y el tiempo de exposición hayan dañado el embrión, como ocurrió con *Neurachne alopecuoides* en el trabajo de Berto y colaboradores (2020). Es posible también que el tamaño de la semilla sea determinante, ya que *L. crinita* es tan pequeña como *N. alopecuoides*. Por su parte, el tratamiento que eliminó completamente las estructuras florales (CA) dejando el cariopsis desnudo, bajo humedad y temperatura adecuadas (Mora, 2009) mostró resultados satisfactorios

debido a que se eliminaron las barreras físicas, facilitando la rápida imbibición (Jarrar et al., 2023).

Por último, las semillas bajo los tratamientos de desaristado manual y control que mantuvieron las glumas mostraron diferencias en la velocidad de germinación respecto a los cariopsis, reflejando un comportamiento donde posiblemente las estructuras florales actuaron como barrera entre el cariopsis y la humedad de la bandeja, reflejado también en los porcentajes de germinación nombrados anteriormente. Esto podría ser un indicio de la existencia de alguna sustancia química en las estructuras florales que inhibe los procesos de germinación (dormición química), presente en otras especies de su género (Baskin et al., 1999) y común en semillas de especies de zonas áridas y semiáridas (Pedrini y Dixon, 2020). Por otro lado, las estructuras florales podrían estar actuando como una barrera física que retarda los procesos de imbibición (dormición física). Esto abre el interrogante acerca del rol que cumplen las estructuras florales en la germinación de *L. crinita* en condiciones naturales a

campo y si efectivamente están vinculadas con algún tipo de dormición de las semillas. Futuros estudios similares podrían ser complementados con una prueba de tetrazolio para verificar la viabilidad de las semillas no germinadas y así establecer efectivamente el causal de la no germinación de las semillas.

4. Conclusiones

Los resultados obtenidos mostraron que los distintos acondicionamientos causaron tanto efectos positivos como negativos sobre la germinación de las semillas. Por un lado, y aunque no hubo diferencias significativas en el porcentaje de germinación acumulado con respecto al control y al desaristado manual, los cariopsis desnudos (semillas desglumadas alcanzaron el 100% y germinaron significativamente más rápido; por el otro, la germinación en las semillas desaristadas por fuego fue significativamente inferior, presentando además el IVGm más bajo. Por esto, la hipótesis planteada no se cumple completamente, sino que se presentan matices en los resultados.

Estos matices en los resultados, principalmente aquellos referidos al aletargamiento en la velocidad de germinación de las semillas cubiertas (espiguilla y semillas acondicionadas por desaristado manual), plantean interrogantes a ser dilucidados en futuros estudios.

5. Agradecimientos

Este estudio fue financiado con fondos del Proyecto Estructural (PE I001) INTA de la cartera 772023: Ganadería Bovina Sostenible en el Semiárido-Árido del centro oeste argentino.

6. Referencias

- Anderson D.L. 1980. La recuperación y mejoramiento de los pastizales naturales. *Ecología*. (4): 9-11.
- Asner, G. P., Archer, S., Hughes, R. F., Ansley, R. J., & Wessman, C. A. (2003). Net changes in regional woody vegetation cover and carbon storage in Texas drylands, 1937–1999. *Global Change Biology*, 9(3), 316-335.
- Baskin, C. C., Baskin, J. M., & Chester, E. W. (1999). Seed germination ecology of the annual grass *Leptochloa panicea* ssp. *mucronata* and a comparison with *L. panicoides* and *L. fusca*. *Acta Oecologica*, 20(5), 571-577.
- Baskin, C. C., y Baskin, J. M. (2014). Variation in seed dormancy and germination within and between individuals and populations of a species. *Seeds*, 4, 1913-1923.
- Berto, B., Erickson, T. E., & Ritchie, A. L. (2020). Flash flaming improves flow properties of Mediterranean grasses used for direct seeding. *Plants*, 9(12), 1699.
- Biancari, L., Aguiar, M. R., Eldridge, D. J., Oñatibia, G. R., Le Bagousse-Pinguet, Y., Saiz, H., ... & Maestre, F. T. (2024). Drivers of woody dominance across global drylands. *Science Advances*, 10(41), eadn6007.
- Cabrera, A.L. (1976) Regiones fitogeográficas Argentinas. Enciclopedia Argentina de Agricultura y Jardinería. Tomo 2, ACME, Buenos Aires.
- Cherlet, M., Hutchinson, C., Reynolds, J., Hill, J., Sommer, S., y VON, M. G. (2018). World atlas of desertification.
- Di Rienzo J.A., Casanoves F., Balzarini M.G., Gonzalez L., Tablada M., Robledo C.W. InfoStat versión 2020. Centro de Transferencia InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>
- Fernández, O. A., y Busso, C. A. (1999). Arid and semi-arid rangelands: two thirds of Argentina (pp. 41-60). Reykjavic, Iceland: Agricultural Research Institute.
- Greco, S. A., & Cavagnaro, J. B. (2003). Effects of drought in biomass production and allocation in three varieties of *Trichloris crinita* P. (Poaceae) a forage grass from the arid Monte region of Argentina. *Plant Ecology*, 164(1), 125-135.
- Greco, S. A., Cavagnaro, J. B., & Marone, L. (2003). Temperature effects on seed germination of four forage grasses from Monte region, Argentina. *Boletín Sociedad Argentina de Botánica*, 38, 182.
- Guevara, J. C., Grünwaldt, E. G., Estevez, O. R.,

- Bigigato, A. J., Blanco, L. J., Biurrun, F. N., ... & Passera, C. B. (2009). Range and livestock production in the Monte Desert, Argentina. *Journal of Arid Environments*, 73(2), 228-237.
- Guzzomi, A. L., Erickson, T. E., Ling, K. Y., Dixon, K. W., & Merritt, D. J. (2016). Flash flaming effectively removes appendages and improves the seed coating potential of grass florets. *Restoration Ecology*, 24, S98-S105.
- Jarrar, H., El-Keblawy, A., Ghenai, C., Abhilash, P. C., Bundela, A. K., Abideen, Z., & Sheteiwy, M. S. (2023). Seed enhancement technologies for sustainable dryland restoration: Coating and scarification. *Science of the Total Environment*, 904, 166150.
- Maestre, F. T., Escolar, C., de Guevara, M. L., Quero, J. L., Lázaro, R., Delgado-Baquerizo, M., ... & Gallardo, A. (2013). Changes in biocrust cover drive carbon cycle responses to climate change in drylands. *Global change biology*, 19(12), 3835-3847.
- Marinoni, L. D. R., Richard, G. A., Bustos, D., Taleisnik, E. L., Pensiero, J. F., & Zabala, J. M. (2020). Differential response of *Trichloris* ecotypes from different habitats to drought and salt stress. *Theoretical and Experimental Plant Physiology*, 32, 213-229.
- MEA, Millennium Ecosystem Assessment (2005). Ecosystems and human well-being: Desertification synthesis. Washington, DC: World Resources Institute.
- Mora, S. (2009). Herramientas de manejo para la producción de semillas de calidad de *Trichloris crinita* (Lag.) Parodi. Tesis de maestría. Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Córdoba.
- Mora, S. (2014). Hay avances en la cosecha de semilla de pasto plumerito. *Revista campo Andino*, 24, 28-29.
- Mora, S., Cabral, D., & Rosales, I. (2013). Establecimiento de pasto plumerito (*Trichloris crinita* Parodi) en el año de siembra. *Revista de la Facultad de Agronomía UNLPam*, 22.
- Ojima, D. S., Dirks, B. O., Glenn, E. P., Owensby, C. E., & Scurlock, J. O. (1993). Assessment of C budget for grasslands and drylands of the world. *Water, Air, and Soil Pollution*, 70, 95-109.
- Pedrini, S., & Dixon, K. W. (2020). International principles and standards for native seeds in ecological restoration. *Restoration Ecology*, 28, S286-S303.
- Quiroga, R. E., Premoli, A. C., & Fernandez, R. J. (2018). Climatic niche shift in the amphitropical disjunct grass *Trichloris crinita*. *PLoS one*, 13(6), e0199811.
- Reynolds, J. F., Smith, D. M. S., Lambin, E. F., Turner, B. L., Mortimore, M., Batterbury, S. P., y Walker, B. (2007). Global desertification: building a science for dryland development. *Science*, 316(5826), 847-851.
- Wainstein P. y Gonzales S. 1971. Valor nutritivo de las plantas forrajeras del Este de la provincial de Mendoza. (Reserva Ecológica de Ñacuñan). *Deserta*. (2): 77-85.
- Waters, C. M., & Shaw, N. L. (2003). Developing native grass seed industries for revegetation in Australia and the western United States: a contrast in production and adoption. *African Journal of Range and Forage Science*, 20, 159.
- Zuloaga, F. O., Rugolo, Z. E., & Anton, A. M. R. (2012). Flora Argentina: flora vascular de la República Argentina. Gráficamente Ediciones.



Estudio de la diversidad y de la abundancia estacional de artrópodos en dos agroecosistemas y un parche biológico de monte nativo de Mendoza, Argentina

Anabel María Almonacid^{1*}, Miriam Holgado², Viviana Quiroga²

1. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Estación Experimental Agropecuaria (EEA) Rama Caída, El Vivero s/n, San Rafael (5600), Mendoza, Argentina.
2. Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Cuyo Alte. Brown 500, Chacras de Coria, Luján de Cuyo, 5507, Mendoza.

*E-mail: almonacid.anabel@inta.gob.ar

PALABRAS CLAVES

Biodiversidad
Artrópodos
Agroecosistema
Morfoespecies

RESUMEN

Los artrópodos son componentes clave de los ecosistemas terrestres, proporcionando servicios ecosistémicos esenciales como la polinización y el control biológico de plagas. Sin embargo, la intensificación agrícola ha impactado sobre su diversidad. La presente investigación tiene como finalidad cuantificar los cambios en la diversidad y composición de las comunidades de artrópodos en función de la estacionalidad y del tipo de hábitat. Se realizó un monitoreo semanal para cada estación del año en un viñedo, un olivar y un parche de monte nativo. Posteriormente, para evaluar los cambios en la diversidad, se calcularon los componentes alfa y beta mediante los índices de Shannon-Wiener, Jaccard y Pielou. Los resultados arrojaron que los sitios bajo estudio fueron diferentes en la composición de artrópodos en cuanto a la diversidad, relacionado posiblemente con la variación en la estructura de la vegetación y en la composición del suelo de cada sitio, siendo diferente respecto de la abundancia. En cuanto a la estacionalidad se registraron cambios en la riqueza y abundancia a lo largo del año apreciándose un mayor número de ejemplares y morfoespecies de artrópodos capturados durante las estaciones de verano y otoño.

Study of diversity and seasonal abundance of arthropods in two agroecosystems and a biological patch of native forest in Mendoza, Argentina

KEYWORDS

Biodiversity
Arthropods
Agroecosystem
Morphospecies

ABSTRACT

Arthropods are key components of terrestrial ecosystems, providing essential ecosystem services such as pollination and biological pest control. However, agricultural intensification has impacted on arthropod diversity. The present research aims to quantify changes in the diversity and composition of arthropod communities based on seasonality and habitat type. Weekly monitoring was carried out for each season of the year in a vineyard, an olive grove, and a patch of native forest. Subsequently, to evaluate changes in diversity, alpha and beta components were calculated using the Shannon-Wiener, Jaccard and Pielou indices. The results showed that the sites under study were different in arthropod composition in terms of diversity, possibly related to the variation in vegetation structure and soil composition of each site, being different in terms of abundance. Regarding seasonality, changes in richness and abundance were recorded throughout the year, with a greater number of captured arthropods as well as a greater number of morphospecies during the summer and autumn seasons.

1. Introducción

Uno de los principales problemas ambientales actuales es la aceleración en la tasa de extinción de

especies asociada a las actividades humanas, hecho que provoca una pérdida irreversible de la diversidad biológica y que puede tener consecuencias impredecibles para el equilibrio del ambiente, ya que

se advierte que muchos servicios de los ecosistemas están declinando de manera acelerada (Purvis y Hector, 2000; Capetillo y Cuevas, 2024). Por ello, la conservación de la diversidad biológica ha llegado a convertirse en una preocupación global y un objetivo ineludible, dedicándose un creciente esfuerzo para entender cómo estas reducciones afectarán el funcionamiento de los ecosistemas y suponen riesgos para el bienestar humano (Loreau et al., 2001; Brassiolo y Vicuña, 2023).

Los cambios en la biodiversidad están repercutiendo directa e indirectamente sobre el bienestar humano, ya que comprometen el funcionamiento mismo de los ecosistemas y su capacidad de generar servicios esenciales para la sociedad (Díaz et al., 2006). La amenaza mundial a la que está expuesta la biodiversidad no debe extrañar a los profesionales agrícolas, puesto que la agricultura, que cubre alrededor del 37% de la superficie terrestre, es posiblemente una de las principales actividades que afecta a la diversidad biológica (FAO, 2018). Como se mencionó anteriormente el uso de la tierra con fines agrícolas afecta a grandes extensiones del área terrestre, por lo que su contribución a la biodiversidad es fundamental para una conservación exitosa de la misma en el futuro (Tscharnkte et al., 2005). Se argumenta que debido a que los procesos de renovación y los servicios ecológicos mediados por la biodiversidad son en gran medida biológicos, su persistencia depende del mantenimiento de la integridad biológica y la diversidad en los agroecosistemas (Altieri, 1999). La pérdida de estos servicios ha sido inadvertida por muchos productores que ignoran el valor de sus beneficios económicos. Estos temas adquieren relevancia cuando se valoriza la salud de los ecosistemas como parte del capital y de los procesos productivos con calidad ambiental y sostenibilidad (Zaccagnini, 2011).

La preocupación por la disminución de la biodiversidad en las tierras agrícolas, así como por la sostenibilidad de los sistemas agrícolas, ha impulsado muchas investigaciones sobre la diversidad biológica en los agroecosistemas, las cuales advierten que el grado de cambio está asociado a la intensidad de la actividad productiva, al estilo de agricultura realizado y que la complejidad que logre cada sistema, a través de la intervención del agricultor, determinará el nivel de diversidad presente. Una mayor diversidad permitirá que se den las interacciones necesarias para optimizar los

servicios ecológicos. Estos son el fundamento clave para el diseño de sistemas sustentables (Carter, 2001; Buguna-Hoffmann, 2000).

Los artrópodos beneficiosos, que incluyen abejas nativas, depredadores y parasitoides, brindan valiosos servicios ecosistémicos para la agricultura. Estos servicios ecosistémicos mediados por artrópodos incluyen la polinización de cultivos y el control de plagas, que ayudan a mantener la productividad agrícola y reducen la necesidad de insumos de pesticidas (Baak-Baak et al., 2024). Maximizar la supervivencia y la reproducción de artrópodos beneficiosos es de vital importancia y requiere la provisión de recursos que a menudo son escasos en los paisajes agrícolas modernos y de propiciar zonas de confort para su multiplicación y adaptación. Para ello es necesario conocer la influencia que los factores ambientales ejercen sobre su desarrollo (Isaacs et al., 2009).

Los artrópodos son esenciales para los ecosistemas áridos como lo es la provincia de Mendoza. Su principal amenaza es la pérdida de hábitat. Por lo que es valioso analizar su dinámica espacial en función de factores ambientales porque permiten predecir cambios en la biodiversidad (Cheli y Martínez, 2018). Así, analizar la dinámica espacial de las comunidades de artrópodos en función de los factores ambientales es de extremo valor porque permitirá predecir cambios en la biodiversidad debido a la pérdida de hábitats (Tewset et al., 2004). La vid y el olivo son cultivos de gran importancia económica en Mendoza, pero su influencia en la biodiversidad de artrópodos es poco conocida. Este estudio tiene como objetivo cuantificar y comparar la diversidad y abundancia estacional de artrópodos en viñedos, olivares y un parche de monte nativo, utilizando la metodología Rapid Biodiversity Assessment. Los resultados contribuirán a una mejor comprensión de los efectos de los agroecosistemas en la biodiversidad local y a la implementación de prácticas de manejo más sostenibles.

2. Materiales y métodos

Caracterización del área de estudio

El estudio se realizó en una finca de Maipú ubicada en el distrito Fray Luis Beltrán 40 km al sudeste de la ciudad de Mendoza, a una altitud promedio de 650 ms.n.m. El clima correspondiente a esta zona es templado árido con tendencia al cálido, con

temperaturas máximas absolutas de 42,7°C y mínimas absolutas de 9,2°C. Las precipitaciones oscilan en los 200 mm anuales, con período de lluvias en verano. El suelo es de tipo franco arenoso en su mayoría, con niveles medios-altos de salinidad. Los vientos predominantes son del oeste y sudoeste a los que hay que agregar los provenientes del noroeste (zonda). La Finca cuenta con 180 has de viñedos, 80 has de olivares y 60 has de vegetación nativa que actúan como un parche biológico. La vegetación nativa de los alrededores de los dos cultivos corresponde a la denominada región fitogeográfica del Monte. La vegetación arbórea y arbustiva remanente del área está conformada por retortuño (*Prosopis strombulifera*), zampa (*Atriplex lampa*), jume (*Salicornia ambigua*), campa (*Cortesia cuneifolia*), atamisque (*Capparis atamisquea*) y en las zonas más arenosas podemos encontrar chañar (*Geoffroea decorticans*) y la penca (*Opuntia sulphurea*) entre otras (información del establecimiento). Es de importancia aclarar que el parche de vegetación nativa se encuentra degradado debido al proceso de fragmentación sufrido. El mismo posee menor cobertura vegetal y una composición florística reducida respecto a la comunidad vegetal característica de la región fitogeográfica del Monte.

Por último, el olivar, se encuentra en un suelo salino, es regado por surco, los interfilares poseen una baja densidad de especies espontáneas entre las cuales predomina el nabo silvestre (*Brassica rapa*). Además, hay forrajeras de la familia de las fabáceas como el lotus (*Lotus tenuis*) y la vicia (*Vicia villosa*) (Información del establecimiento).

Selección de los sitios de muestreo

La localización de las estaciones de muestreo se basó en un diseño experimental que garantizara la representatividad espacial de las muestras. Se consideraron criterios como la variabilidad ambiental, la distribución de las variables de interés y la accesibilidad del terreno. La determinación del número óptimo de estaciones se realizó mediante un análisis de costo-beneficio, considerando la disponibilidad de recursos y la precisión deseada en los resultados.

Descripción de la estación de muestreo

Para la captura se establecieron tres estaciones de muestreo en cada ambiente de estudio viñedo (V), olivar (O) y parche biológico de monte (PBM). Cada

estación constó de dos trampas: una de caída del tipo Pitfall y otra de intercepción. Las Pitfall están compuestas por recipientes de material plástico de un litro de capacidad y 9 cm de diámetro con embudos y una cubierta de madera, colocadas con su boca al ras del suelo. Las trampas de intercepción consistieron en la colocación de dos placas de madera de alto impacto de 50 x 50 cm que se intersectan perpendicularmente por su centro determinando cuatro cuadrantes. El eje de intersección coincide con el centro del embudo. De este modo los artrópodos en vuelo chocan con las paredes y caen dentro del embudo que está cerrado por un tapón en la parte inferior y lleno de la misma solución utilizada en las trampas Pitfall (Figura 1). Los ejemplares son recogidos en un recipiente colocado en la parte inferior del panel. Para preservar adecuadamente el material entomológico colectado, se utilizó a modo de fluido conservante y fijador detergente y cloruro de sodio al 3% en cada trampa. La totalidad del material colectado fue preservado en alcohol 70%. Se realizó un muestreo de una semana en cada estación del año.



Figura 1. (A) Estación de muestreo combinado en el Monte nativo (B). Trampa de tipo intercepción (C). Trampa tipo Pitfall. Fuente: Elaboración propia.

La determinación y cuantificación de los ejemplares se realizó en laboratorio por observación bajo lupa estereoscópica. El método que se utilizó para realizar el estudio fue Rapid Biodiversity Assessment (RBA) (Oliver y Beatie, 1996). Se clasificó a los ejemplares capturados según sus características morfológicas visibles. Dentro de cada Orden taxonómicos los individuos se agruparon por morfoespecies y se codificaron de manera alfanumérica, las letras

representan el Orden al que pertenecen y los números permiten diferenciar las ME dentro de cada Orden. Se armó una colección entomológica de referencia con un ejemplar de cada morfoespecie contenidos en eppendorfs en una solución de alcohol 70% (Figura 2).

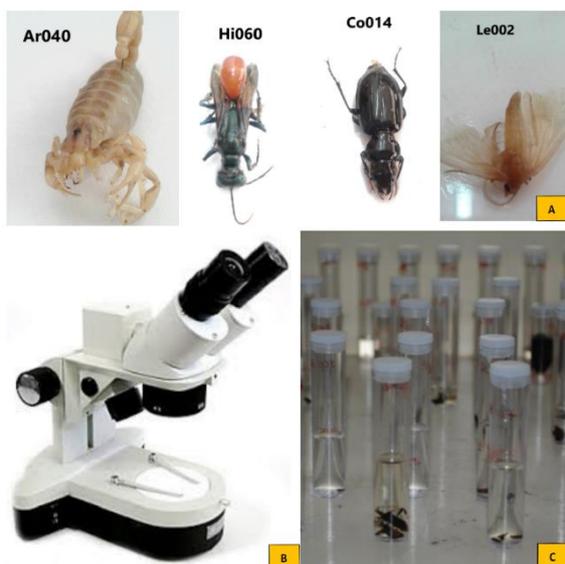


Figura 2. (A) Colección fotográfica de artrópodos con sus respectivos códigos de clasificación de morfoespecies. (B) Lupa estereoscópica (C) Colección de artrópodos de referencia. Fuente: Elaboración propia.

Análisis de los datos

Los datos fueron analizados utilizando Excel versión 2016. En primer lugar, se creó una hoja de cálculo donde se registraron y organizaron los datos obtenidos en cada muestreo, incluyendo morfoespecie, tipo de trampa, ubicación, número de individuos capturados y estación del año. A continuación, se calcularon los índices de diversidad también con Excel 2016, y se realizaron análisis estadísticos utilizando InfoStat versión 2020e y R-Studio versión 4.0.3. Las visualizaciones gráficas se generaron con Excel y R-Studio 4.0.3.

Cálculo de la diversidad

Para evaluar los cambios en la biodiversidad en relación con la estructura del paisaje, se calcularon los componentes alfa y beta de la diversidad. Se seleccionaron los índices de Shannon-Wiener, Jaccard y Pielou debido a su capacidad para cuantificar tanto la riqueza de especies como la equidad dentro de cada muestra (alfa) y la diferenciación entre muestras (beta),

respectivamente. Estos índices permiten explorar cómo la heterogeneidad del paisaje influye en la composición y estructura de las comunidades.

Cálculo diversidad alfa

Riqueza específica: La riqueza específica (S) es la forma más sencilla de medir la biodiversidad, ya que, en el número de especies presentes, sin tomar en cuenta el valor de importancia de las mismas. Es el número total de especies obtenidos por un censo de la comunidad (Moreno et al., 2011).

Índice de Shannon-Wiener: Expresa la uniformidad de los valores de importancia a través de todas las especies de la muestra. Este índice, que procede de la teoría de la información, es el más ampliamente empleado ya que considera tanto la riqueza en especies como su abundancia, al emplear una escala logarítmica (Magurran, 2004). El mismo se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$H' = - \sum p_i * \ln(p_i)$$

Donde:

H': Índice de diversidad de Shannon-Wiener.

Σ : Sumatoria.

p_i : Proporción de individuos de la especie i respecto al total de individuos.

\ln : Logaritmo natural.

Índice uniformidad Pielou: Este índice mide la uniformidad o equilibrio, expresada como la diversidad observada respecto a la diversidad que se podría obtener en una comunidad con el mismo número de especies, pero con una uniformidad máxima (Moreno et al., 2011).

$$J = H' / H'_{max}$$

Donde:

J: Índice de equidad de Pielou.

H': Índice de diversidad de Shannon-Wiener.

H' $_{max}$: Valor máximo teórico del índice de Shannon-Wiener.

Cálculo diversidad beta

Coeficiente de similitud de Jaccard: Finalmente, se empleó el Coeficiente de Similitud de Jaccard para expresar el grado en el que dos muestras son semejantes por las especies presentes en ellas, por lo que son una medida inversa de la diversidad, que se refiere al cambio de especies entre dos estaciones (Magurran, 2004). Este coeficiente se obtuvo según la siguiente expresión:

$$J(A, B) = C / (A + B + C)$$

Donde:

A es el número de elementos que solo están en el conjunto A.

B es el número de elementos que solo están en el conjunto B.

C es el número de elementos que están en ambos conjuntos (intersección).

Un total de 1385 artrópodos fueron recolectados y correspondieron a 301 ME de 8 Ordenes; 41 arácnidos, 59 coleópteros, 89 dípteros, 36 hemípteros, 67 himenópteros, 1 isópodo, 5 lepidópteros, 3 ortópteros. Los Ordenes que presentaron mayores valores de abundancia fueron Hymenoptera, Diptera, Isopoda y Coleoptera (Figura 3). No se observaron diferencias significativas en el número total de individuos colectados entre los diferentes métodos de captura. Sin embargo, se registró una notable diferencia en el número de morfoespecies, con 235 morfoespecies capturadas en trampas de intercepción frente a 82 en trampas Pitfall, lo que sugiere una mayor diversidad de artrópodos voladores en este último método.

La distribución de la abundancia de individuos a lo largo del año mostró un predominio en las estaciones de verano y otoño, que en conjunto representaron el 80% de los individuos capturados, mientras que el 20% restante correspondió a las estaciones de invierno y primavera.

3. Resultados y Discusión

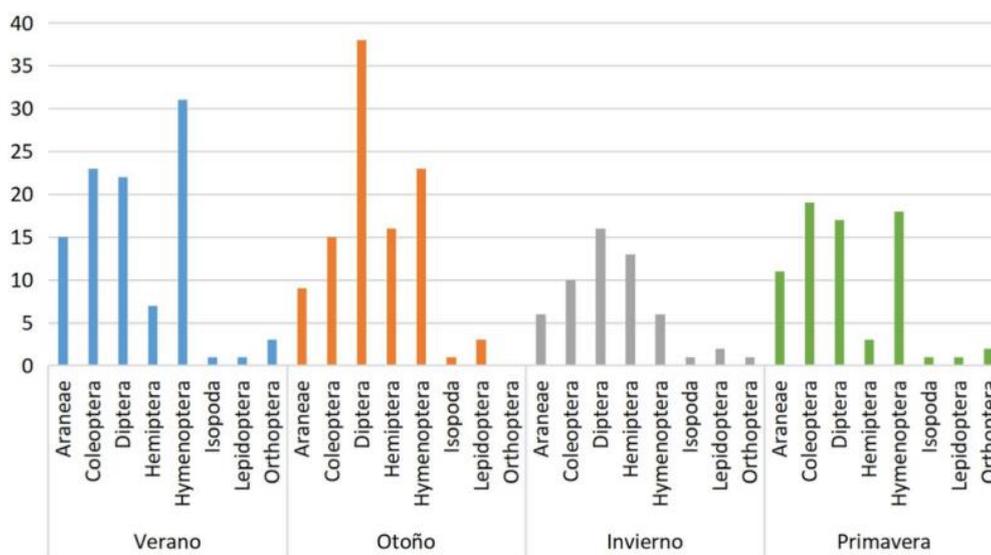


Figura 3. Representación del número de morfoespecies por orden y estación del año

Se realizó el análisis estadístico para respaldar los resultados. Para ello, se llevó a cabo un análisis de varianza no paramétrico mediante la prueba de Kruskal-Wallis (ALFA 0,05), que reveló que no existían diferencias estadísticamente significativas en el número de individuos capturados entre los diferentes ambientes. Adicionalmente, se analizó el

número de morfoespecies por orden en las distintas estaciones del año, registrándose diferencias significativas entre los ocho órdenes taxonómicos relevados. Se observó un patrón general de mayor abundancia de morfoespecies en las estaciones de verano y otoño en comparación con invierno y primavera. Estos resultados son consistentes con los

encontrados por (Olivera,2018) en estudios similares realizados en zonas áridas de la patagonia.

Finalmente, se examinó la influencia del hábitat y la estacionalidad sobre la diversidad de artrópodos utilizando índices específicos. Se evaluó la diversidad de artrópodos en función del hábitat, sin considerar la estacionalidad; para ello, se calcularon los índices con el total de individuos colectados a lo largo del año en cada ambiente.

Primero se calculó índice de Shannon-Weiner empleando logaritmos de base e y luego el índice de equidad de Pielou. Dando como resultado ambos índices un valor superior para el ecosistema viñedo. Así pues, la diversidad es mayor en el viñedo, lo cual puede estar relacionado a una distribución más equitativa de las morfoespecies. (Figura 4).

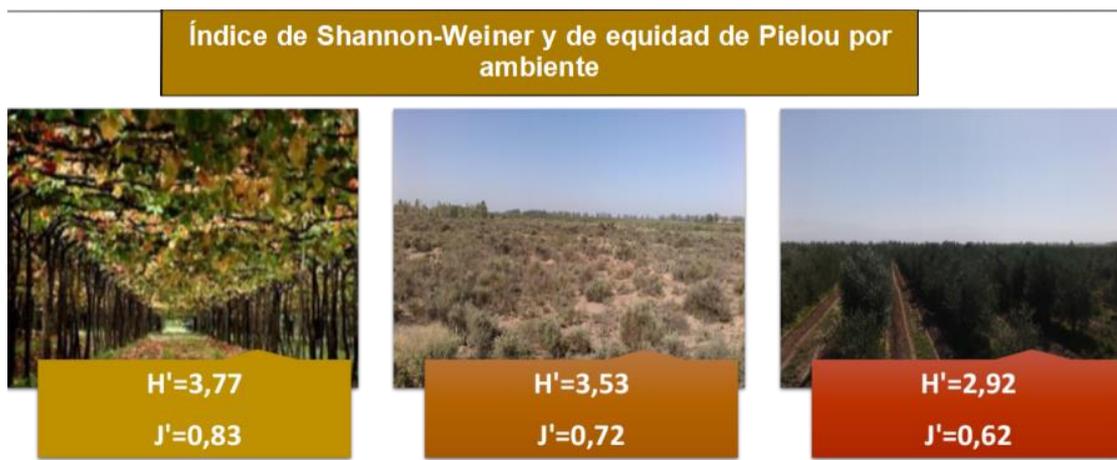


Figura 4. Índice de Shannon-Weiner y de equidad de Pielou para cada ambiente de estudio viñedo, parche biológico de Monte y olivar.

Las diferencias encontradas de diversidad de artrópodos entre los ambientes examinados podrían atribuirse a características particulares de cada uno de ellos. Cada hábitat provee distintos recursos para la artropodofauna como lo son el refugio, el alimento y la oportunidad de reproducirse. A lo mencionado anteriormente se le suman los requerimientos específicos de las especies (Tews et al., 2004; Stein et al., 2014).

En efecto, las variaciones climáticas estacionales pueden impactar significativamente los ecosistemas y, en consecuencia, afectar la biodiversidad de artrópodos. Estas variaciones no solo cambian las condiciones ambientales, como la temperatura y la humedad, sino que también influyen en la disponibilidad de recursos, como el alimento y el hábitat. Esto se debe a que muchos artrópodos dependen directamente de la vegetación y de otros recursos específicos que varían según la estación. Así, al modificarse la composición florística de un ambiente, se pueden alterar tanto la abundancia

como la diversidad de artrópodos, afectando su ciclo de vida y patrones de distribución (Peñalosa et al. 2012).

El índice de Shannon-Wiener registró valores de 3,77 para el viñedo y 3,53 para el parche biológico de Monte. Estos resultados son semejantes a los obtenidos por Echeverría (2010), quien reportó un índice de 4,59 en el viñedo y de 3,71 en el Monte nativo. Las variaciones observadas entre ambos estudios podrían explicarse por varios factores interrelacionados. Por un lado, el manejo orgánico del viñedo, al reducir el uso de pesticidas y promover prácticas agrícolas más sostenibles, puede favorecer el establecimiento y persistencia de una comunidad de artrópodos más diversa y abundante. Por otro lado, las diferencias en los protocolos de muestreo, incluyendo el tipo de trampas, la estacionalidad y la duración del muestreo, pueden influir significativamente en los resultados obtenidos, así como a la degradación del parche biológico de

Monte como resultado del proceso de fragmentación del hábitat.

En concordancia con Martínez (2024), el Orden mejor representado numéricamente fue Hymenoptera, particularmente formícidos, seguido por los órdenes Díptera, Isopoda y Coleoptera. Cabe destacar que el Orden Lepidoptera registró mayor abundancia y diversidad en el parche biológico de Monte siendo escasa la captura de estos en ambos agroecosistemas a lo largo del año, lo cual podría atribuirse a la mayor variedad de flora existente en el parche biológico de Monte nativo. El ambiente con mayor abundancia de artrópodos fue el olivar en todas las estaciones del año con excepción de la estación de invierno. El hábitat con mayor complejidad estructural y heterogeneidad en la vegetación, parche biológico de Monte, fue el segundo de mayor abundancia, mientras que el viñedo registró la menor abundancia en todas las estaciones del año. Por el contrario, el ambiente menos diverso fue el olivar, presentando los valores más altos de diversidad el viñedo y el parche biológico de Monte nativo.

Los órdenes de artrópodos con mayor riqueza de morfoespecies podrían ser seleccionados en estudios futuros como grupos focales para la conservación de los ecosistemas. En cuanto a la diversidad de artrópodos, el agroecosistema de viñedo fue el ambiente que mostró mayor diversidad y equitatividad. Por otro lado, la composición de las comunidades de artrópodos entre los tres tipos de ecosistemas evaluados presentó un bajo grado de similitud, lo cual sugiere diferencias significativas en la estructura comunitaria de cada ambiente

Finalmente se construyó una curva de acumulación de especies (Figura 5), con el fin de estimar la riqueza total de morfoespecies existente en la finca de estudio, como así también la calidad del inventario biológico. Se consideró como unidad de esfuerzo de muestreo a cada estación de trampeo combinada (trampa tipo Pitfall junto con la de intercepción) por punto de muestreo y estación, por ejemplo, Estación1 de muestreo en viñedo para verano.

La curva de acumulación de especies construida a partir del conjunto de muestras indica que el esfuerzo de muestreo empleado hasta el momento podría no ser suficiente para capturar la totalidad de la riqueza de morfoespecies presente en el área de estudio. Dado que la curva aún no alcanza una asíntota clara, es probable que un mayor esfuerzo de muestreo permita registrar un número significativamente mayor de morfoespecies (Sørensen et al., 2002). La forma de la curva de acumulación también podría verse influenciada por factores temporales, como la estacionalidad. Algunas especies podrían tener períodos de actividad o de vuelo muy cortos, lo que dificulta su detección en muestreos puntuales. Un muestreo más prolongado a lo largo del año podría permitir capturar una mayor proporción de la diversidad presente. Según Willot (2001) este patrón también podría atribuirse en gran medida a la presencia de un elevado número de especies raras, es decir, aquellas representadas por uno o dos individuos en las muestras. Estas especies, aunque poco abundantes, contribuyen de manera significativa a la riqueza de especies y pueden ser indicadoras de condiciones ambientales particulares o de perturbaciones recientes.

Los artrópodos, por su enorme diversidad y la complejidad de sus relaciones filogenéticas, representan un desafío constante para los investigadores. Esta dificultad se traduce en inventarios que, por lo general, subestiman la riqueza de especies presente en un determinado ecosistema. Tal como apuntan Jiménez-Valverde y Hortal (2003), la obtención de listados exhaustivos es prácticamente inalcanzable para estos grupos.

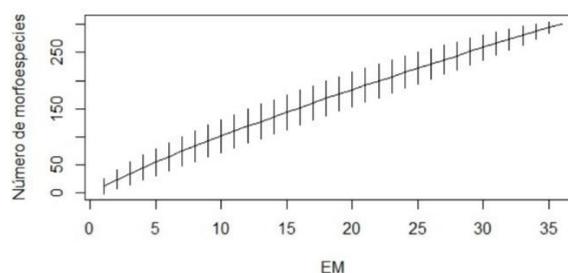


Figura 5. Curva de acumulación de especies para el total de las muestras.

4. Conclusiones

Los resultados aportan una base sólida para desarrollar estrategias de manejo y conservación efectivas, además de permitir un seguimiento detallado de la artrópodo-fauna en los ecosistemas estudiados. Este conocimiento es fundamental para la conservación de la biodiversidad y para la gestión sostenible de los agroecosistemas, fomentando así su resiliencia y equilibrio ecológico a largo plazo.

En relación con el método RBA ha demostrado ser una herramienta eficaz para realizar estudios comparativos de la composición de comunidades de artrópodos, proporcionando datos rápidos sobre diversidad y abundancia. Sin embargo, para profundizar en el entendimiento de los roles ecológicos de estos organismos y su potencial en el manejo de plagas, es fundamental una identificación taxonómica precisa, especialmente de aquellos órdenes y familias que agrupan a especies clave como predadores, polinizadores y otros grupos funcionales. En el caso de los cultivos de viñedo y olivar, la identificación taxonómica de familias como Coccinellidae, Carabidae, Miridae, Reduviidae, Nabidae, Anthocoridae y Syrphidae permitiría generar información valiosa para el desarrollo de estrategias de control biológico más eficientes (Holgado et al., 2018).

Del mismo modo, la curva de acumulación de especies es una herramienta útil para visualizar la incompletitud de los inventarios de la entomofauna. En el caso de los artrópodos, estas curvas suelen presentar una asíntota muy gradual, lo que indica que a medida que aumenta el esfuerzo de muestreo, se siguen descubriendo nuevas especies. Esta tendencia refleja la enorme diversidad de este grupo y la dificultad de obtener un muestreo representativo.

Para concluir, este estudio sienta las bases para futuras investigaciones en otras regiones de Mendoza, explorando la entomofauna asociada a diferentes cultivos y ecosistemas naturales. Estudios venideros deberían explorar la entomofauna asociada a otros agroecosistemas de Mendoza, así como evaluar el impacto de diferentes prácticas de manejo agronómico sobre la estructura y función de las comunidades de artrópodos. Un enfoque prometedor sería el análisis de los artrópodos por grupos funcionales, lo que permitiría comprender en

detalle las interacciones tróficas y las contribuciones específicas de cada grupo a los servicios ecosistémicos como la polinización, la depredación y la descomposición.

5. Agradecimientos

Expreso mi más sincero agradecimiento a la Cátedra de Zoología Agrícola, en particular, a las profesoras Miriam Holgado y Viviana Quiroga por su contribución a este estudio, por su apoyo y guía ya que sus conocimientos en el área de la Zoología Agrícola fueron fundamentales para el desarrollo exitoso de esta investigación. Por último, a la comunidad de la Facultad de Ciencias Agrarias y a la Universidad Nacional de Cuyo, por haberme dado la posibilidad de formarme y capacitarme como profesional en una casa de estudios tan prestigiosa, por las herramientas y valores que me brindaron.

6. Referencias

- Altieri, M. A. (1999). The ecological role of biodiversity in agroecosystems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 74, 19-31.
- Baak-Baak, C. M., García-Rejón, J. E., c Cetina-Trejo, R., Chan-Pérez, J. I., Acosta-Viana, K. Y., Y Cigarroa-Toledo, N. (2024). Beneficios de los insectos para los humanos y la naturaleza. *Bioagrocencias*, 17(1).
- Baumgardner, D. E. (2007). New species of Leptohyphidae (Ephemeroptera) from Costa Rica. *Proceedings of the Entomological Society of Washington*, 109(2), 416-426.
- Brassiolo, P., and Vicuña, S. (2023). RED 2023-Capítulo 1: Cambio climático y biodiversidad: de las bases físicas a la perspectiva económica.
- Buguna-Hoffmann, L. (2000). Stimulating positive linkages between agriculture and biodiversity. Recommendations for Building Blocs for the European Conservation Agricultural Action Plan on Biodiversity. (ECNC-Technical Report Series). European Centre for Nature Conservation, Tilburg.
- Capetillo, M. A. C. and Cuevas, F. I. H. (2024). Dinámicas socioeconómicas para la conservación de la biodiversidad en una

- reserva natural privada de Yucatán, México. *Avances*, 26(2), 241-256.
- Carter, M. R. (2001). Researching the agroecosystem/environmental interface. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 83, 3-9. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(00\)00277-2](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(00)00277-2)
- Cheli, G. H., Y Martínez, F. J. (2018). Artrópodos terrestres, su rol como indicadores ambientales. Instituto Patagónico para el Estudio de los Ecosistemas Continentales
- Díaz, S., Fargione, J., Chapin III, F. S., Y Tilman, D. (2006). Biodiversity loss threatens human well-being. *PLoS Biology*, 4(8), e277. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.0040277>
- Dirección de Agricultura y Contingencias Climáticas. (2019, January 3). <http://www.contingencias.mendoza.gov.ar/web1/>
- Echeverría, M. L. (2010). Estimación de la biodiversidad de artrópodos a través de un método simplificado de clasificación parataxonómica en dos ambientes de la provincia de Mendoza. Tesis doctoral, Universidad Nacional de Cuyo, Facultad de Ciencias Agrarias.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). (2018). Recuperado el 3 de diciembre de 2018, de <http://www.fao.org/faostat/es/>.
- Halffter, G., Moreno, C. E., Y Pineda, E. O. (2001). Manual para evaluación de la biodiversidad en Reservas de la Biosfera (MYT, Manuales y Tesis SEA Vol. 2). <http://www.sea-entomologia.org/PDF/MYTSEA02.pdf>
- Hickman, C. P., Roberts, L. S., Y Larson, A. (2001). *Integrated principles of zoology*. McGraw-Hill.
- Isaacs, R., Tuell, J., Fiedler, A., Gardiner, M., Y Landis, D. (2009). Maximizing arthropod-mediated ecosystem services in agricultural landscapes: The role of native plants. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 7(4), 196–203.
- Jiménez-Valverde, A., Y Hortal, J. (2003). Las curvas de acumulación de especies y la necesidad de evaluar la calidad de los inventarios biológicos. *Revista Ibérica de Aracnología*, 8, 151-161
- Lassau, S. A., Hochuli, D. F., Cassis, G., Y Reid, C. A. M. (2005). Effects of habitat complexity on forest beetle diversity: do functional groups respond consistently? *Diversity and Distributions*, 11, 73-82.
- Loreau, M., Naeem, S., Inchausti, P., Bengtsson, J., Grime, J. P., Y Hector, A. (2001). Biodiversity and ecosystem functioning: current knowledge and future challenges. *Science*, 294, 804-808.
- Magurran, A. E. (2004). *Measuring biological diversity*. Blackwell Publishing, Oxford, UK.
- Martínez, PN, Zamar, MI, Y Alejo, GB (2024). Diversidad de artrópodos epigeos en un gradiente altitudinal y temporal en zonas áridas de Jujuy (República Argentina). *Ecología Austral*, 34 (1)
- Moreno, C. E., Barragán, F., Pineda, E., Y Pavón, N. P. (2011). Reanálisis de la diversidad alfa: alternativas para interpretar y comparar información sobre comunidades ecológicas. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 82, 1249–1261.
- Moreno, C. E., Barragán, F., Pineda, E., y Pavón, N. P. (2011). Reanálisis de la diversidad alfa: alternativas para interpretar y comparar información sobre comunidades ecológicas. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 82, 1249–1261.
- Moreno, C.E. (2001). Métodos para medir la biodiversidad. MYT - Manuales y Tesis SEA, vol.1. Primera edición, 84 pp.
- Obrist, M. K., y Duelli, P. (2010). Rapid biodiversity assessment of arthropods for monitoring average local species richness and related ecosystem services. *Biodiversity & Conservation*, 19, 2201–2220. <https://doi.org/10.1007/s10531-010-9832-y>
- Olivera, P. I., y Cheli, G. H. (2018). Variación estacional de la comunidad de artrópodos terrestres en Península Valdés, Chubut

- (Argentina).
- Olivier, I., y Beattie, A. J. (1996). Invertebrate morphospecies as surrogates for species: A case study. *Conservation Biology*, 10, 99-109. Recuperado el 10 de diciembre de 2018, de https://www.researchgate.net/publication/201999858_Invertebrate_Morphospecies_as_Surrogates_for_Species_A_Case_Study
- Peñaloza, O. A., Corronca, J., Y Balzarini, M. (2012). Descripción de artrópodos epigeos en dos ambientes del Parque Nacional Talampaya, La Rioja, Argentina. *UNLaR Ciencia*, 1, 17-23.
- Purvis, A., Y Hector, A. (2000). Getting the measure of biodiversity. *Nature*, 405, 212-219.
- Sørensen, I. L., Coddington, J. A., Y Scharff, N. (2002). Inventorying and estimating subcanopy spiders diversity using semiquantitative sampling methods in an afro-montane forest. *Environmental Entomology*, 31(2), 319-330
- Stein, A., Gerstner, K., Y Kreft, H. (2014). Environmental heterogeneity as a universal driver of species richness across taxa, biomes and spatial scales. *Ecology Letters*, 17, 866-880.
- Tews, J., Brose, U., Grimm, V., Tielbörger, K., Y Whichmann, M. (2004). Animal species diversity driven by habitat heterogeneity/diversity: The importance of keystone structures. *Journal of Biogeography*, 31, 79-92.
- Tscharntke, T., Klein, A., Kruess, A., Steffan, I., Y Carsten, T. (2005). Agroecology. University of Gottingen, Germany. *Ecology Letters*, 8, 857-874.
- Whittaker, R. J., Willis, K. J., Y Field, R. (2001). Scale and species richness: Towards a general, hierarchical theory of species diversity. *Journal of Biogeography*, 28, 453-470.
- Willot, S. J. (2001). Species accumulation curves and the measure of sampling effort. *Journal of Applied Ecology*, 38(3), 484-486.
- Zaccagnini, M. E. (2011). Manejo de biodiversidad en agroecosistemas: 22 años de aportes del INTA en investigación, extensión y capacitación (1990-2011). Publicaciones INTA, Buenos Aires. 200 pp.
- Zar, J. H. (1996). Biostatistical analysis (3ra ed.). Prentice Hall, New Jersey



Síntesis y caracterización de hidrogeles compuestos de polivinil alcohol, alginato de sodio y bentonita natural para la remediación de aguas contaminadas

Katherina Milagros Carrazco Suji¹, Mario Daniel Ninago^{1,2}

1. Facultad de Ciencias Aplicadas a la Industria. Universidad Nacional de Cuyo (FCAI-UNCuyo), Bernardo de Irigoyen 375, San Rafael, 5600, Mendoza, Argentina.
2. Instituto de Ingeniería y Ciencias Aplicadas a la Industria (ICAI-UNCuyo-CONICET), Bernardo de Irigoyen 375, San Rafael, 5600, Mendoza, Argentina.

*E-mail: mninago@fcai.uncu.edu.ar

PALABRAS CLAVES

PVA
Hidrogeles
Compuesto
Biorremediadores

RESUMEN

El uso de arcillas naturales se presenta como una opción económica y eficaz para eliminar colorantes de aguas residuales industriales, gracias a sus características microestructurales y de carga superficial. No obstante, debido al tamaño de sus partículas, estas forman suspensiones coloidales muy estables que causan arrastre y grandes pérdidas de carga en sistemas de filtración, dificultando su separación y recuperación del flujo líquido. Por ello, inmovilizar la mismas en estructuras de mayor tamaño es una alternativa efectiva para minimizar estos problemas. Entre los hidrogeles más utilizados se encuentran el poli (vinil alcohol) y el alginato de sodio, biopolímeros capaces de formar geles por gelación iónica. Por lo tanto, el objetivo del presente trabajo consistió en sintetizar perlas mixtas de PVA-ALG con bentonita, caracterizar su desempeño mecánico y determinar la capacidad de adsorción cuando están en contacto con muestras de agua contaminadas con un colorante modelo. Los resultados preliminares obtenidos mostraron que la combinación de diferentes etapas de gelación iónica mejoró el desempeño mecánico de la matriz de alginato. Asimismo, el uso de rellenos minerales permitió la remoción del 99 % del colorante inicial luego de 32 horas de contacto. Finalmente, se determinó que los biorremediadores obtenidos se ajustaron a un modelo de adsorción de pseudo-segundo orden, confirmando que la etapa controlante del proceso es la adsorción química, siendo despreciables los fenómenos de transferencia de masa en la solución.

Synthesis and characterization of polyvinyl alcohol, sodium alginate, and natural bentonite composite hydrogels for contaminated water remediation

KEYWORDS

PVA
Hydrogels
Compound
Bioremediators

ABSTRACT

The use of natural clays is presented as a cost-effective and efficient option for removing dyes from industrial wastewater thanks to their microstructural and surface charge characteristics. However, due to their particle size, they form very stable colloidal suspensions that cause drag and significant head losses in filtration systems, making their separation and recovery from the liquid stream difficult. Therefore, immobilizing them in larger structures is an effective alternative to minimize these problems. Among the most commonly used hydrogels are poly(vinyl alcohol) and sodium alginate, biopolymers capable of forming gels by ionic gelation. Therefore, the objective of the present work was to synthesize PVA-ALG mixed pearls with bentonite, characterize their mechanical performance, and determine the adsorption capacity when in contact with samples of water contaminated with a model dye. The preliminary results obtained showed that the combination of different stages of ionic gelation improved the mechanical performance of the alginate matrix. Likewise, the use of mineral fillers allowed the removal of 99% of the initial dye after 32 hours of contact. Finally, it was determined that the obtained bioremediators fit a pseudo-second-order adsorption model, confirming that the controlling stage of the process is chemical adsorption, with mass transfer phenomena in the solution being negligible.

1. Introducción

El progreso tecnológico como consecuencia de la revolución industrial y la urbanización son probablemente las principales causas que promueven la exploración y explotación de los recursos naturales. Así, el desecho de aguas residuales, efluentes industriales y el uso indiscriminado de colorantes, fertilizantes, pesticidas y derrames de petróleo, representan las principales causas del detrimento de los recursos hídricos (Das et al., 2015). Debido a esto, en las últimas décadas se ha incrementado el uso de biomateriales en el área de remediación ambiental, convirtiéndose en un tema de interés no sólo desde el punto de vista científico sino también tecnológico e industrial (Gupta et al., 2017). Por otra parte, el agua subterránea es un recurso esencial para el desarrollo socioeconómico de zonas rurales áridas de Argentina. Particularmente en la provincia de Mendoza, la actividad minera ha generado grandes volúmenes de efluentes que han contaminado fuentes de agua subterráneas (Documentación Remediación Sierra Pintada). Así, el uso de partículas minerales o materiales compuestos se presenta como una alternativa prometedora para la remoción de este tipo de contaminantes (Molina et al., 2023). Particularmente, el uso de arcillas representa una alternativa promisoriosa para ser empleada en procesos de remediación de efluentes líquidos debido a su inocuidad y amplia disponibilidad, siendo atractivas tanto desde el punto de vista económico como ambiental. Sin embargo, su principal desventaja se fundamenta en la formación de suspensiones extremadamente estables, que al entrar en contacto con agua dificultan su posterior separación. Para evitar este fenómeno, una de las metodologías más usadas consiste en soportar las arcillas sobre matrices poliméricas que faciliten su separación de la corriente acuosa. Así, materiales de origen renovable como el alginato de sodio, gelatina, quitosano o polivinil alcohol, podrían ser empleados para tal fin, debido a que presentan la capacidad de formar geles en presencia de ciertos agentes de entrecruzamiento (Lin et al., 2013). En este contexto, los hidrogeles son polímeros con alta capacidad de adsorción de diferentes tipos de iones, y pueden obtenerse en forma de films o perlas. Además, cuando son combinados con partículas adsorbentes durante su fabricación, se obtienen mejoras en la remoción de contaminantes y en las propiedades mecánicas finales (Aslam et al., 2018). Entre los materiales más destacados para la formulación de

hidrogeles se encuentran el polivinil alcohol (PVA), conocido por su versatilidad y bajo costo, y el alginato de sodio (ALG), un biopolímero aniónico que forma hidrogeles reversibles en agua en presencia de iones divalentes. Por lo tanto, el objetivo del presente trabajo consistió en sintetizar perlas mixtas de PVA-ALG con bentonita, caracterizar su microestructura y desempeño mecánico, así como evaluar la capacidad de adsorción de las perlas cuando están en contacto con muestras de agua contaminadas.

2. Materiales y métodos

Como matrices poliméricas se emplearon poli(vinil alcohol) PVA, comercial (Ballester S.A.) y Alginato de sodio, Alg (Tetrahedron). Además, se empleó cloruro de calcio CaCl_2 (Tetrahedron), y borato de sodio (Biopak) como agentes de reticulación iónica, respectivamente. Como relleno mineral se empleó una bentonita natural proveniente de la localidad "Los jilgueros" del Departamento de San Rafael, Mendoza. La misma fue sometida a trituración primaria para reducir el tamaño inicial de la roca de cantera. A continuación, se procedió a tamizar la muestra molida utilizando un tren de tamices (Stack Zonytest) y tamiz malla N°40. Este método permitió la eliminación del material no arcilloso, obteniéndose partículas con tamaños menores a $420\mu\text{m}$. Asimismo, se utilizó azul de metileno y agua destilada (ósmosis inversa) para la preparación de las soluciones, suspensiones y curvas de calibrado.

Obtención de los compuestos biorremediadores

A partir de una solución acuosa de PVA (10% m/v), combinada con soluciones de Alg (1% m/v) y Bentonita (5% m/m, respecto a la masa de biopolímero), se obtuvieron perlas por gelación iónica goteando las mismas sobre una solución de CaCl_2 al 2% (m/v), empleando una bomba difusora de jeringa (Apema), a una velocidad de dosificación de $90\text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}$ para asegurar la repetitividad en la técnica de fabricación de los hidrogeles. Las perlas recién formadas se mantuvieron en la solución de CaCl_2 bajo agitación magnética durante 4 horas para asegurar la reticulación completa de la red y pasado este tiempo, se lavaron con agua destilada. Luego, se realizó la inmersión de los hidrogeles en una solución de Borato de Sodio (4% m/v) durante 24 horas siguiendo el procedimiento experimental propuesto por Zain y col (2011). Los hidrogeles obtenidos se denominaron: Alg y PVA-Alg a los hidrogeles

entrecruzados con CaCl₂ y PVA-Alg_# a los hidrogeles entrecruzados con CaCl₂ y Borato de sodio.

Caracterización de los compuestos biorremediadores (PVA-Alg y PVA-Alg_#)

Para cada formulación propuesta se determinó la fracción gel (FG %) a partir de ensayos gravimétricos (ecuación 1).

$$FG (\%) = \frac{m_{sf}}{m_{si}} \times 100 \quad (1)$$

donde, m_{si} y m_{sf} son las masas de las perlas secas antes y después de su inmersión en agua destilada por 4 días. Las propiedades mecánicas primarias de los compuestos se determinaron mediante ensayos de compresión y análisis de perfil de textura (TPA). Para los ensayos de TPA, se colocaron 1,5 g de perlas sobre una base acrílica de 25 mm de diámetro y 6 mm de profundidad, a la cual se le adicionaron 1 ml de agua destilada a fin de evitar el fenómeno de sinéresis, es decir la contracción de las perlas debido a la pérdida de agua durante el proceso de compresión (Voo et al., 2016). Los ensayos se realizaron en un texturómetro TA-XT2i Texture Analyzer (Stable Micro Systems, Reino Unido) equipado con una celda de carga de 25 kg. El programa consistió en dos ciclos de compresión hasta un 30 % de deformación, empleando una sonda de aluminio de 25 mm de diámetro (P25R). Las condiciones de medida del ensayo fueron las siguientes: velocidad de pre y post-ensayo 5 mm s⁻¹, velocidad de ensayo 0,5 mm s⁻¹, fuerza de contacto 0,5N. Previamente el texturómetro se calibró con una pesa de 5 kg. Las determinaciones se realizaron por triplicado para cada una de las formulaciones. Los datos obtenidos se procesaron mediante el uso del software Texture Expert® para determinar las propiedades físicas primarias de los biorremediadores tales como: dureza y elasticidad.

Ensayos de adsorción de los compuestos biorremediadores (PVA-Alg y PVA-Alg_#)

La eficiencia en la remoción de azul de metileno (AM) se determinó por espectrofotometría UV-visible (DR 6000 UV-VIS) siguiendo la metodología de trabajo publicada en trabajos previos del grupo (Morant et al., 2022). Inicialmente se realizó un barrido espectral entre 200 y 800 nm a partir de soluciones testigo de azul de metileno, para determinar el valor de absorbancia máximo, a partir de la cual se realizó una curva de calibrado para diferentes concentraciones de colorante (soluciones testigo).

Por otra parte, para calcular el porcentaje de remoción de colorante, se colocaron 2 g de hidrogel compuesto con 20 mL de solución testigo (3 mg.L⁻¹) bajo agitación magnética. La capacidad de remoción se determinó para diferentes tiempos de contacto (1, 2, 4, 8, 16 y 32 horas) siguiendo los procedimientos reportados en la literatura (Sánchez et al., 2019; González et al., 2016), empleando como blanco, biorremediadores sin bentonita.

La concentración de AM en el sobrenadante se cuantificó a λ = 624 nm y cada prueba se realizó por triplicado. La cantidad de colorante adsorbido por gramo de biorremediador (qt) se calculó utilizando la ecuación (2).

$$q_t = \frac{(C_0 - C_t) \times V}{W} \quad (2)$$

Además, el porcentaje de remoción de colorante (R%) se obtuvo a partir de la ecuación (3).

$$R\% = \frac{(C_0 - C_t)}{C_0} \times 100 \quad (3)$$

donde C₀ y C_t son las cantidades (mg) de AM presentes en la solución antes y después del proceso de adsorción, V el volumen (L) de solución estándar de AM extraída, y W la masa (g) de biorremediador usada en cada ensayo.

Asimismo, para los estudios cinéticos, se tomaron alícuotas del medio de adsorción a diferentes tiempos de contacto, hasta un tiempo máximo de contacto de 32 h. Los datos experimentales se ajustaron a modelos cinéticos de pseudo-primer orden (Ecuación 4) y pseudo-segundo orden (Ecuación 5) para predecir cuál es el proceso de adsorción que presentaron los materiales obtenidos.

$$\frac{1}{q_t} = \frac{k_1}{q_e t} + \frac{1}{q_e} \quad (4)$$

donde k₁ es la constante de velocidad de adsorción de orden pseudo-primer (min⁻¹), q_e y q_t las cantidades de analito adsorbido en equilibrio y en el tiempo t (min), respectivamente. Por otra parte, para el modelo de adsorción de pseudo-segundo orden se empleó la ecuación siguiente:

$$\frac{1}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \left(\frac{1}{q_e}\right) t \quad (5)$$

donde k₂ era la constante de velocidad de adsorción de orden pseudo-segundo (g.mg⁻¹ min⁻¹) y el resto de los parámetros son los mismos de la Ecuación (4).

3. Resultados y Discusión

Caracterización de los compuestos biorremediadores

En la Tabla 1, se resumen las condiciones de gelación iónica usadas en cada formulación. Los valores de fracción gel calculados mostraron que las perlas sometidas a inmersión en soluciones de cloruro de calcio y borato de sodio, evidenciaron mayores valores de fracción gel respecto a las perlas

obtenidas sólo en presencia de CaCl_2 (~30% mayor para ambas formulaciones). En este sentido, Zain y col. (2011) reportaron que la combinación de CaCl_2 seguido de inmersiones en borato de sodio podrían ayudar a reticular los grupos alcohol presentes en las cadenas adyacentes del PVA con el alginato, proporcionando interacciones covalentes lábiles que podrían conducir a la formación de un copolímero.

Tabla 1. Biorremediadores obtenidos por gelación iónica (etapas de inmersión).

Muestra	CaCl_2 (4 horas)	Bórax (24 horas)	Forma Gel	Fracción Gel (%)
PVA	—	✓	✓	ND*
Alg	✓	—	✓	84.16
PVA-Alg	✓	—	✓	48.45
PVA-Alg#	✓	✓	✓	76.70
PVA-Alg _{5B} #	✓	✓	✓	78.20

*(ND): No pudo determinarse su valor debido a que el hidrogel se disolvió luego de 4 hs en contacto con agua.

A partir de ensayos de compresión y análisis de perfil de textura (TPA), se evaluó la resistencia mecánica de los biorremediadores al proceso de compresión. Los perfiles obtenidos mostraron una curva de tensión-deformación que tiende a elevarse progresivamente hasta alcanzar el porcentaje de

deformación predeterminado en el ensayo. Al liberar la carga aplicada, se observó que la descompresión no presenta el mismo recorrido, dando lugar a un ciclo de histéresis lo cual reveló el comportamiento visco-elástico que presentan los hidrogeles obtenidos (Figura 1).

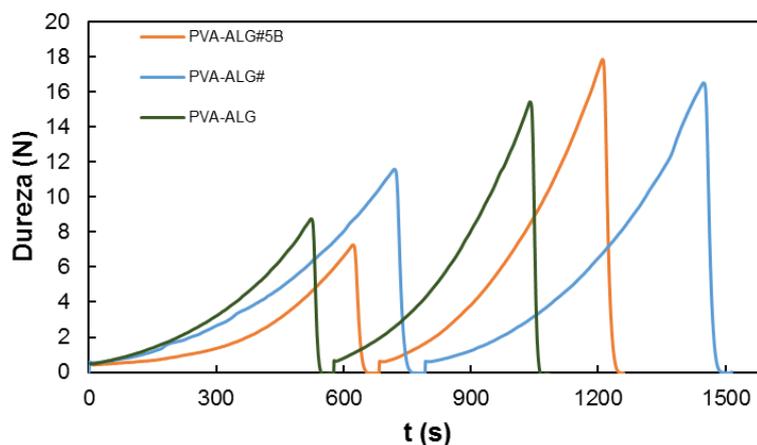


Figura 1. Ensayo de TPA para PVA-Alg, PVA-Alg# y PVA-Alg_{5B}

En la Tabla 2 se resumen los parámetros de TPA obtenidos para las formulaciones propuestas. Con respecto a los valores de dureza calculados, se observó que los hidrogeles de Alg, presentaron pobres propiedades mecánicas, esto podría estar asociado a la baja concentración de biopolímero en la formulación. Por otra parte, para PVA-Alg_# incrementaron su valor en ~40%, respecto a la matriz de PVA-Alg. Este incremento en el valor de fuerza máxima podría estar asociados a la formación de

nuevos enlaces entre las cadenas de PVA y Alg. Sin embargo, para los biorremediadores con 5 % de bentonita (PVA-Alg_{5B}) no se observaron cambios significativos en esta propiedad (respecto a la matriz de PVA-Alg), efecto que debe estudiarse con mayor profundidad. Por último, todos los hidrogeles presentaron valores de elasticidad cercanos a la unidad, demostrando que pueden recuperar su forma original luego de ser sometidos a dos ciclos de compresión.

Tabla 2. Propiedades mecánicas de los biorremediadores obtenidos.

Muestra	Dureza (N)	Elasticidad
Alg	3,4 ± 0,31	0,91 ± 0,01
PVA-Alg	8,6 ± 0,61	0,95 ± 0,01
PVA-Alg _#	11,95 ± 2,05	0,93 ± 0,01
PVA-Alg _{#5B}	7,45 ± 0,64	0,88 ± 0,02

Ensayos de adsorción de los compuestos biorremediadores

En la Tabla 3 se resumen los valores máximos de colorante removido por gramo de muestra

($\text{mg}_{\text{AM}}/\text{g}_{\text{perla}}$), y el porcentaje de remoción luego de 4, 8 y 32 h de tiempo de contacto. Como puede observarse, las formulaciones entrecruzadas con cloruro de calcio y borato de sodio lograron remover casi la totalidad del colorante inicial.

Tabla 3. Azul de metileno adsorbido y porcentaje de remoción

Muestra	mg AM ads . g ⁻¹ perlas			Remoción AM (%)		
	4 h	8 h	32 h	4 h	8 h	32 h
Alg	1,63	1,71	1,78	54,47	57,13	59,35
PVA-Alg _#	2,78	2,81	2,96	92,55	93,66	98,68
PVA-Alg _{#5B}	2,86	2,86	2,87	95,63	95,63	99,00

Asimismo, las muestras con bentonita removieron mayores porcentajes de colorante durante las primeras horas de contacto. Además, las perlas de Alg sólo pudieron eliminar 59,3% del colorante inicial, demostrando la importancia de incorporar rellenos minerales para alcanzar la completa remoción de contaminantes en muestras de agua dulce. La Figura 4 muestra la cantidad de colorante adsorbido por gramo de biorremediador para

diferentes tiempos de contacto su ajuste cinético. Como se muestra en la Figura 4a, todas las formulaciones presentaron una rápida adsorción inicial del colorante durante los primeros 100 min, alcanzando el tiempo de equilibrio alrededor de 300 min (5 h de tiempo de contacto). En este sentido, para las perlas entrecruzadas con borato y en presencia de bentonita este efecto fue mayor. Por otra parte, los datos experimentales se ajustaron con

éxito al modelo cinético de pseudo-segundo orden, obteniéndose valores de R^2 mayores a 0,99 (Figura 4b). En este modelo, la adsorción química es la etapa

controlante del proceso de adsorción e indica que los fenómenos de transferencia de masa en la solución son despreciables.

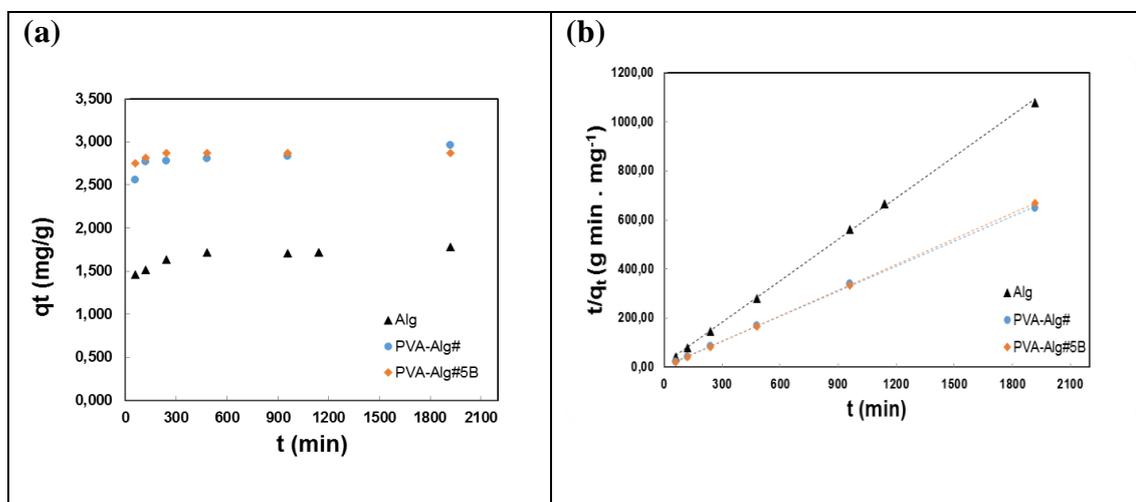


Figura 4. (a) Colorante adsorbido por gramo de biorremediador y (b) cantidad de azul de metileno adsorbido para diferentes tiempos de contacto.

Tabla 4. Modelos cinéticos de adsorción de azul de metileno

Muestra	R^2 pseudo primer orden	R^2 pseudo segundo orden
Alg	0,92	0,99
PVA-Alg#	0,87	0,99
PVA-Alg# _{5B}	0,96	1,00

4. Conclusiones

Los resultados preliminares obtenidos mostraron que la combinación de diversas etapas de gelación iónica mejora significativamente el rendimiento mecánico de la matriz de alginato. Además, la incorporación de rellenos minerales permitió eliminar el 99% del colorante inicial luego de 32 horas de contacto. Finalmente, se determinó que los biorremediadores obtenidos se ajustaron a un modelo de adsorción de pseudo-segundo orden, confirmando que la etapa controlante del proceso es la adsorción química, siendo despreciables los fenómenos de transferencia de masa en la solución.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Nacional de Cuyo (SIIP 06/L006-T1) y al Consejo Nacional de

Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) por el apoyo financiero que hizo posible la realización de este trabajo.

6. Referencias

- Aslam Muhammad, Kalyar Mazhar Ali, Raza Zulfiqar Ali (2018). Polyvinyl alcohol: A review of research status and use of polyvinyl alcohol based nanocomposites. *Polymer Engineering and Science* 58, 2119– 2132. <https://doi.org/10.1002/pen.24855>
- Das Sumistha, Sen Biswarup, Debnath Nitai (2015). Recent trends in nanomaterials applications in environmental monitoring and remediation. *Environmental Science and Pollution Research* 22 18333– 18344. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5491->

- 6
- Documentación Remediación Sierra Pintada - Gobierno de Mendoza. <https://www.mendoza.gov.ar/dpa/documentacion-remediacion-sierra-pintada/>.
- Gonzalez Jimena S., Ponce Alejandra, Alvarez Vera A. (2016). Preparation and characterization of poly (vinylalcohol) / bentonite hydrogels for potential wound dressings. *Advanced Materials Letters* 7(12):979-985. <https://doi.org/10.5185/amlett.2016.6888>
- Gupta Pratima, Diwan Batul (2017). Bacterial Exopolysaccharide mediated heavy metal removal: A Review on biosynthesis, mechanism and remediation strategies. *Biotechnology Reports* 13 58–71. <http://dx.doi.org/10.1016/j.btre.2016.12.006>
- Lin Shihong, Huang Rixiang, Cheng Yingwen, Liu Jie, Lau Boris L.T., Wiesner Mark R. Silver (2013) Nanoparticle-alginate composite beads for point-of-use drinking water disinfection. *Water Research* 47 3959–3965. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.09.005>
- Momina, Ahmad Kafeel (2023). Feasibility of the adsorption as a process for its large scale adoption across industries for the treatment of wastewater: Research gaps and economic assessment. *Journal of Cleaner Production*, 388, 136014. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136014>
- Morant Mónica Alejandra, Horst María Fernanda, Giaroli Maria Carolina, Rodríguez Mario Humberto, Ninago Mario Daniel (2022). Synthesis and Characterization of Alginate/Bentonite Hydrogels. *Macromolecular Symposia* 406, 2100514. <https://doi.org/10.1002/masy.202100514>
- Sanchez Laura M., Alvarez Vera A., Ollier Romina P. (2019) Acid-treated Bentonite as filler in the development of novel composite PVA hydrogels. *Journal of Applied Polymer Science* 136, 47663. <https://doi.org/10.1002/app.47663>
- Voo Wan-Ping, Ooi Chien-Wei, Islam Aminul, Tey Beng-Ti (2016). Calcium alginate hydrogel beads with high stiffness and extended dissolution behavior. *European Polymer Journal* 75, 343-353. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2015.12.029>
- Zain Nor Azimah Mohd, Suhaimi Mohd Suardi, Idris Ani (2011). Development and modification of PVA–alginate as a suitable immobilization matrix. *Process Biochemistry*, 46, 2122-212. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2011.08.010>



Influencia del color de las mallas antigranizo en el estado hídrico de los viñedos y la madurez de *Vitis vinifera* L. en regiones semiáridas

Irene Carbajal Ramos^{1,2*}, Gabriel Nahuel³, Silvia Clavijo^{1,2}, María Silvina Cabeza^{1,2}, Pablo Castro³, Carina Llano^{1,2}

1. Facultad de Ciencias Aplicadas a la Industria (FCAI), Universidad Nacional de Cuyo (UNCuyo), Bernardo de Irigoyen 375, San Rafael, Mendoza, 5600 Argentina.
2. ICAI (CONICET – UNCuyo), Instituto de Ingeniería y Ciencias Aplicadas a la Industria, Bernardo de Irigoyen 375, San Rafael, Mendoza, 5600 Argentina.
3. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Estación Experimental Agropecuaria (EEA) Rama Caída, El Vivero s/n, San Rafael (5600), Mendoza, Argentina.

*E-mail: icarbajal@fcai.uncu.edu.ar

PALABRAS CLAVES

Isótopos Estables
Malbec
Mendoza
Viticultura sustentable

RESUMEN

En regiones semiáridas como Mendoza, Argentina, las condiciones climáticas como la baja precipitación, la distribución irregular de la lluvia, la alta evapotranspiración, el granizo y las temperaturas extremas plantean desafíos significativos para la producción de plantas. El objetivo del presente trabajo es explorar la influencia de dos colores de mallas antigranizo para evaluar el estado hídrico de los viñedos. Se utilizaron como indicadores el $\delta^{13}C$ y la composición fisicoquímica de las uvas durante el período envero-vendimia. La metodología empleada incluyó un muestreo de bayas de vid varietal cv. Malbec, con dos colores de mallas antigranizo (perla y negro) en una parcela ubicada en EEA INTA Rama Caída, San Rafael, Mendoza, Argentina. Los principales resultados reflejaron, por un lado, que el color de la malla antigranizo negra fue más favorable para el estado hídrico de los viñedos y por el otro, respecto del impacto sobre las variables fisicoquímicas se destaca que el color perla genera uvas de mayor tamaño y con valores de concentración de sólidos solubles más elevados. Comprender estos efectos es crucial para optimizar el uso del agua en la viticultura, en particular en regiones áridas donde el agua es escasa y crucial para la producción sostenible.

Influence of the color of anti-hail meshes on the water status of the vineyards and the maturity of *Vitis vinifera* L. in semi-arid regions

KEYWORDS

Stable isotopes
Malbec
Mendoza
Sustainable viticulture

ABSTRACT

In semi-arid regions like Mendoza, Argentina, climatic conditions such as low precipitation, irregular rainfall distribution, high evapotranspiration, hailstorms, and extreme temperatures pose significant challenges to plant production. The objective of this study is to explore the influence of two colors of anti-hail nets on the water status of vineyards. $\delta^{13}C$ and the physicochemical composition of grapes were used as indicators during the ripening-harvest period. The methodology involved sampling berries from Malbec grape vines covered with two colors of anti-hail nets (pearl and black) in a plot located at the INTA Rama Caída Experimental Station, San Rafael, Mendoza, Argentina. The main results showed that the black anti-hail net was more favorable for the vineyards' water status, while the pearl net resulted in larger grapes with higher soluble solids concentration. Understanding these effects is crucial for optimizing water use in viticulture, particularly in arid regions where water is scarce and vital for sustainable production.

1. Introducción

En las regiones semiáridas como Mendoza, existen condicionantes climáticas adversas para la producción vegetal evidenciadas principalmente en la restricción impuesta por los bajos patrones de precipitación, la irregularidad en la distribución de las lluvias, la elevada evapotranspiración y las temperaturas extremas (Flores Asin, 2019). En estos escenarios, los cultivos que mejor se desarrollan son aquellos que pueden convivir con algún grado de déficit hídrico. Un cultivo resiliente en el sur de Mendoza que soporta bajos porcentajes de humedad relativa ambiental, suelos secos, alta irradiancia y temperaturas por sobre el límite óptimo de las plantas es la vid.

En las últimas décadas, los avances en las investigaciones sobre la relación del estado hídrico y el uso de isótopos estables constituyen una herramienta para evaluar la sostenibilidad de los cultivos que está siendo amenazada por la reducción efectiva de los recursos hídricos (Mena Morales et al., 2022). En este sentido, para determinar el estado hídrico de las plantas se utiliza la composición del isótopo de carbono ($\delta^{13}\text{C}$) presente en los tejidos vegetales (Spangenberg et al., 2020, Rienth et al., 2023). Hay dos isótopos de carbono estables en la naturaleza (^{12}C y ^{13}C), la mayor parte de este elemento se encuentra en la forma más ligera ^{12}C (98,93 %), mientras que el ^{13}C más pesado representa el 1,07 % (Hoefs, 2009). Cuando las plantas no tienen limitantes hídricas mantienen sus estomas abiertos, por lo cual la tasa de ingreso de CO_2 a la planta será máxima. Bajo estas condiciones, el CO_2 de la cavidad estomática estará enriquecido en ^{12}C respecto al aire, ya que el isótopo pesado ($^{13}\text{CO}_2$) presenta una menor velocidad de difusión que el liviano ($^{12}\text{CO}_2$) (Farquhar et al., 1989).

Si bien, estos análisis son prometedores, en el sur de Mendoza otro fenómeno climático condicionante en la producción vitivinícola es el granizo. Este fenómeno climático genera grandes pérdidas económicas en los oasis mendocinos que, si bien constituyen un evento de naturaleza aleatoria, la distribución espacial y los niveles de intensidad (y de daño) adquieren aspectos diferenciales según la zona (Van den Bosch, 2022). Los daños sobre la planta se visualizan desde el rompimiento de las bayas de uvas, lo que facilita los ataques de hongos y la deshidratación, hasta disminución en la floración, foliación lo que causa una pérdida en la eficiencia fotosintética, como así también en los

sarmientos donde queda dañada la corteza provocando riesgo de infecciones (Martín et al., 2023). Para esta inclemencia, las coberturas con malla antigranizo constituyen un método de defensa muy efectivo por lo que se ha incrementado la superficie protegida (Nahuel, 2013; Curetti y Raffo, 2022; Muskaan et al., 2022). Uno de los efectos más importantes que ejercen las mallas, además de la protección física como barrera para el granizo, es la disminución de la radiación fotosintéticamente activa (PAR) (Raffo et al., 2019). Dependiendo del tipo y color de la red, se han medido reducciones en la intensidad de la luz solar del 4 al 9% (PAR), del 25 al 29% (UV) y del 5% (IR), lo que reduce la temperatura en hasta 7°C (Olivares-Soto et al., 2020). Las mallas claras se comportan como superficies traslúcidas (Castejón y Santamaría, 1993) y generan un proceso difusivo de la luz aumentando la radiación recibida en el cultivo (Raffo et al., 2019). Las mallas oscuras producen efecto de sombreado sin modificar la calidad espectral de la radiación (Raffo et al., 2019, Jafary et al., 2022).

Asimismo, la literatura reporta como consecuencia de la presencia de coberturas antigranizo modificaciones de ciertos parámetros tales como el rendimiento, la concentración de azúcares, el peso de baya, la concentración de ácidos y fenoles (Martínez-Lüscher et al., 2018). El rendimiento suele estar influenciado por las condiciones ambientales, las prácticas en el viñedo y la variedad de uva. El contenido de azúcar, en particular la glucosa y la fructosa, se acumula durante el proceso de maduración y es esencial para determinar el contenido potencial de alcohol del vino. El peso de las bayas, otro parámetro clave, afecta la relación uva-jugo, que es importante para la extracción de sabores y taninos. La concentración de ácidos orgánicos, como el ácido tartárico y málico, contribuye a la acidez y al equilibrio general de la uva, lo que influye en el sabor y la vida útil del vino (Yilmaz et al., 2024).

De lo anteriormente expuesto, se propone como objetivo general de este artículo explorar la influencia de dos colores de mallas antigranizo, perla y negro, para evaluar el estado hídrico de los viñedos a través del análisis del $\delta^{13}\text{C}$ y la composición fisicoquímica de las uvas durante el período envero- vendimia.

Este enfoque permitirá comprender cómo las diferentes mallas afectan el estrés hídrico y la calidad del fruto, aportando información valiosa para optimizar el manejo de los recursos hídricos en la

viticultura, particularmente en regiones áridas, donde el agua es un recurso limitado y crucial para la sostenibilidad del cultivo.

2. Materiales y métodos

El ensayo se llevó a cabo en la Estación Experimental Agropecuaria (EEA) de Rama Caída, San Rafael, Mendoza, Argentina. La EEA pertenece al Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). El sitio experimental se encuentra ubicado en calle El Vivero s/N°. Las vides estudiadas pertenecen al varietal cv. Malbec sobre pie franco. La recolección de datos se llevó a cabo durante el verano del 2020. El marco de plantación es de 2,5 m entre hileras con orientación noreste-suroeste y una distancia de 1,50 m entre plantas.

Diseño experimental y modelo estadístico

El diseño experimental se definió de acuerdo con la homogeneidad de las plantas en el viñedo, basado en el peso de poda. El modelo estadístico aplicado es factorial: 1^2+1 nivel (testigo). Este modelo permitió analizar la influencia de los colores perla y negro de malla antigranizo (Figura 1). Para ello se establecieron bloques aleatorios con tres tratamientos, los cuales se enumeran a continuación:

- Tratamiento 1 (TE) constituye el testigo (sin protección antigranizo),
- Tratamiento 2 (N) tiene malla antigranizo Negra,
- Tratamiento 3 (P) tiene malla antigranizo Perla.

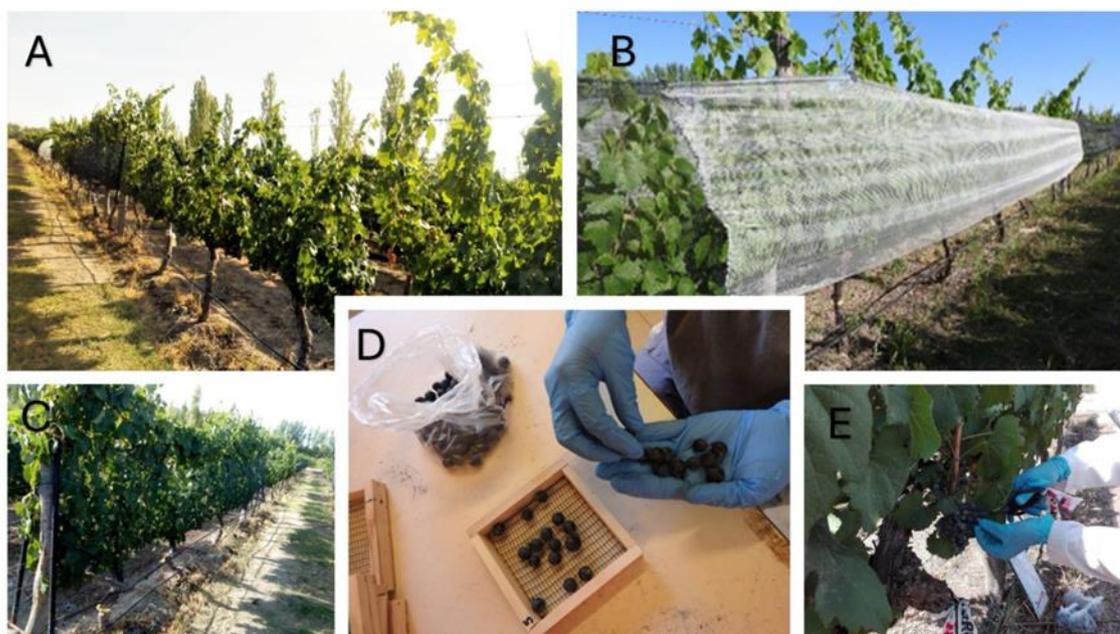


Figura 1. (A). Tratamiento (TE) sin malla antigranizo; (1-B). Tratamiento (P) tiene malla antigranizo Perla; (1-C). Tratamiento (N) tiene malla antigranizo Negra. (1-D). Procesamiento de bayas; (1-E). Muestreo en vendimia para determinación del $\delta^{13}C$.

Todos los tratamientos recibieron la misma cantidad de agua mediante el sistema de riego por goteo. Se aportó una lámina de reposición equivalente al 100% respecto de ETC (tasa de evapotranspiración del cultivo).

Los datos relevados, fueron analizados mediante modelos lineales mixtos, MLM, (Infostat software, versión 1.5; Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina). El color de la red y la época del año fueron considerados como factores fijos; mientras que el bloque fue considerado como un factor aleatorio.

Determinación de $\delta^{13}C$

El muestreo se realizó previo a la vendimia. La muestra de bayas se conformó de 50 unidades extraídas en forma aleatoria de los racimos de 5 plantas por unidad experimental. Se manipuló el material vegetativo con guantes de nitrilo para evitar contaminación cruzada. Se almacenó cada una en bolsas plásticas rotuladas evitando la rotura de los granos en el transporte al laboratorio. Se recortaron los pedúnculos de cada baya, se extrajeron contaminantes sólidos (hojas, tierra, etc.). Se secaron las muestras en horno con flujo forzado a una temperatura de 55°C hasta peso constante y

actividad acuosa promedio de 0.28. Se redujeron las bayas secas mediante molienda y se almacenaron. La determinación de $\delta^{13}\text{C}$, se llevó a cabo en el Laboratorio de Isótopos Estables en Ciencias Ambientales, IDEVEA (UTN-FRSR & CONICET). Para la medición de isótopos estables, se pesó $3 \pm 0,5\mu\text{g}$ de muestra en balanza analítica Mettler Toledo AT20 10/2 μg sobre microcápsula de estaño 6x4 mm de 97,5% de pureza. Las mediciones se obtuvieron con un espectrómetro de masas de flujo continuo Thermo Scientific DELTA V acoplado vía ConFlo IV al Analizador Elemental Flash 2000. Para este equipo la precisión analítica es de 0,1‰ para las relaciones isotópicas de carbono (V-PDB).

Caracterización de bayas

Para controlar el proceso de madurez de los viñedos, se realizaron los análisis de rutina de acuerdo con los procedimientos vigentes (Nazralla et al., 2009). Debido a las características destructivas de los ensayos, se dispusieron cinco cepas por unidad experimental, distintas a las destinadas a medición de isótopos y potencial hídrico foliar, para realizar el seguimiento de bayas. Se llevaron a cabo los muestreos en ocho fechas durante el período envero-vendimia: 23-30/01, 06-13-19-27/02 y 05-10/03. Los ensayos realizados fueron: peso de baya, sólidos solubles, pH y acidez total.

Peso de baya

La muestra de bayas se conformó de 50 unidades, extraídas en forma aleatoria de los racimos de 5 plantas por unidad experimental. Se recortaron los pedúnculos de cada baya. Se pesaron en una balanza digital (Denver Instrument, modelo APX-203, de capacidad de 200 g, precisión 0.001 g, Estados Unidos). Se registraron los pesos de muestras totales y se calculó el peso de cada unidad mediante una planilla de cálculo.

Sólidos solubles

Una vez que se realizó el pesaje y se estimó el peso de baya, se procedió a realizar molienda manual de cada muestra dentro de cada bolsa plástica. Se utilizó un refractómetro autocompensado por temperatura (ATC-1E, ATAGO, Tokio, Japón), con resolución de lectura 0,1.

pH

El pH se determinó mediante un peachímetro digital (827PHLAB, METROHM, Herisau, Suiza). Previo a cada secuencia de mediciones, se calibró el instrumental con las soluciones buffer pH 4 y pH 7. En un vaso de precipitado se molieron los granos de uva, se extrajo el líquido sobrenadante y se introdujo el electrodo para tomar lectura directa de cada ensayo en el visor del equipo.

Acidez total

Se tomaron 10 ml del jugo de uvas con pipeta doble aforo, y se colocó en un Erlenmeyer. Se agregó 40 a 50 ml de agua destilada, y 2 o 3 gotas de azul de bromotimol. Se llenó y enrasó una bureta con solución de NaOH N/10. Se tituló hasta viraje del indicador (verde azulado), y se registró el volumen de NaOH utilizado y se calculó la acidez total.

3. Resultados y Discusión

Los resultados se centraron en dos ejes que permitieron analizar el efecto de los colores de las protecciones de mallas antigranizo (perla y negro). En primera instancia, se determinó la composición isotópica de carbono, $\delta^{13}\text{C}$ para evaluar el estado hídrico de los cultivos. En segundo lugar, se hace referencia a las características fisicoquímicas de las bayas, las cuales posibilitaron determinar su evolución en el período envero-vendimia.

Composición isotópica de carbono $\delta^{13}\text{C}$

Se determinó diferencias para los tres tratamientos, existiendo diferencias significativas entre medias con $p\text{-valor}=0,008<0,05$. En la Figura 2 se muestra la clasificación de medias, los valores de composición isotópica que indican mejor estado hídrico de las cepas. El color de malla antigranizo negra con un valor medio de -27,31‰; y las condiciones de mayor estrés hídrico en el color perla, con media igual a -26,86‰. Las cepas testigo tuvieron un comportamiento intermedio.

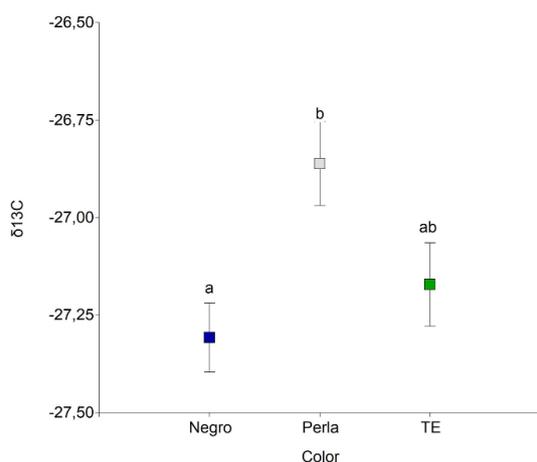


Figura 2. Clasificación de medias por tratamiento de composición isotópica en función del factor color. Medias con una letra común son significativamente diferentes (p -valor= 0,008).

Así mismo, para todos los valores de composición isotópica, quedaron establecidos entre el rango -27,63 ‰ y -26,27‰, correspondientes a la escala de estrés hídrico débil o nulo (Santesteban et al., 2015; Brillante et al., 2020). Resultados similares se reportaron en experiencias previas con los varietales Chasselas y Pinot Noir bien irrigados, los que tuvieron valores de composición isotópica en bayas de -27,26 ‰ y -26,47‰, indicando que las cepas se habían desarrollado en el período envero-vendimia sin estrés hídrico (Spangenberg y Zufferey, 2018). Para una experiencia en función de la poda y frecuencia de riego con el varietal Tempranillo en parcelas regadas 2 y 3 veces por semana, se obtuvieron valores de $\delta^{13}C$ -26,94‰ y -27,44‰ (Santesteban et al., 2017a). En un estudio de mapeo mediante imágenes de alta resolución obtenidas por vehículos no tripulados se obtuvieron valores entre -27,9‰ (sin estrés hídrico) y -24,1‰ (con estrés severo) (Santesteban et al., 2017b). Teniendo en cuenta que es el primer estudio de estado hídrico reportado en Malbec, sería fundamental analizar la influencia del tipo de varietal y fenología en los valores de $\delta^{13}C$, tales como los analizados por Plantevin y colaboradores (2022) en 48 variedades cultivadas en Francia.

Composición fisicoquímica de bayas

Se determinaron ensayos de rutina tales como: peso de baya, composición de sólidos solubles, pH y acidez

titulable total, para estimar la afectación de las protecciones antigranizo en la calidad de las uvas.

Evolución de peso de bayas

Se obtuvieron diferencias significativas entre las medias, Perla= 1,37 g (a); Negro=1,32 g (b) y Testigo= 1,23 g (c). De acuerdo con la Figura 3, durante las fechas en que se realizó muestreo, las curvas de evolución muestran un comportamiento diferenciado. Los valores mínimos para todas las determinaciones corresponden al tratamiento testigo (curva verde). Levemente superior, se ubicaron las parcelas bajo cobertura de color negro. La evolución máxima de peso se registró para las bayas bajo telas de color perla, alcanzando los máximos rendimientos productivos.

Las bayas del tratamiento TE fueron las de menor peso durante toda la temporada, estos resultados son coherentes de acuerdo con Mirás-Avalos e Intrigliolo (2017). El tratamiento P marcó el máximo en tamaño de fruto, con un valor medio de 1,37 gramos. Esto se debe a que, a diferencia de las bayas previas al envero, las bayas posteriores al envero están protegidas de los cambios en el estado hídrico de la vid y son en gran medida insensibles al marchitamiento inducido por la sequía (Keller et al., 2015; Gambetta et al., 2020). Además, la incidencia de luz difusa aumenta la actividad fotosintética y la generación de fotoasimilados (Dayer et al. 2020) y se modifica la composición química (Olivares-Soto et al., 2020). Pallotti y colaboradores (2023) sugieren que el mayor peso de baya registrado frente a vides sin mallas de protección se debe a la menor deshidratación de los frutos. La influencia del color de la malla antigranizo sobre las vides también ha sido reportada por Jafary et al. (2022), donde las uvas del varietal Rishbaba registraron mayor peso bajo mallas color perla, seguidas de aquellas desarrolladas con cobertura negra y, por último, el tratamiento testigo sin protección. En estudios similares aplicados a manzanas, el empleo de mallas afectó en forma positiva el tamaño de los frutos en el cv. Cripp's Pink (Raffo et al., 2019), mientras que el análisis de López et al. (2018) presentó peor estado hídrico, adelanto en la maduración de la fruta restando tiempo para su crecimiento y aumento de la fotoinhibición.

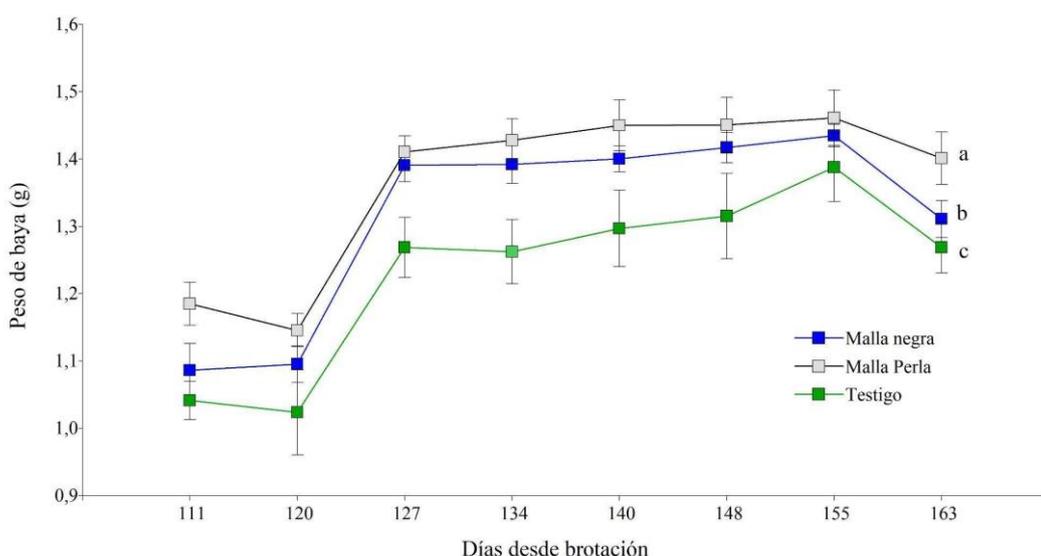


Figura 3. Evolución del peso de una baya (g) registrada, en los distintos tratamientos cv. Malbec, desde 23-01-2020 hasta 13-03-2020. Las barras indican error estándar.

Evolución de sólidos solubles ($^{\circ}$ Brix)

La evolución del nivel de sólidos solubles en baya se muestra en la Figura 4. El análisis de datos mostró diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos. Consistentemente con el mayor tamaño de baya se reportaron los mayores valores de concentración de sólidos solubles en las bayas bajo cobertura color perla

y los menores en las vides sin protección antigranizo (TE). Esto también se visualiza en la alta correlación entre ambas variables (coeficiente de Pearson= 0,66). Los valores promedio máximos de $^{\circ}$ Bx para el tratamiento P, fue de 21,31 $^{\circ}$ Bx (valor medio ajustado de la temporada); frente al mínimo obtenido en TE de 20,03 $^{\circ}$ Bx. Estos valores son congruentes dado que las bayas de uva acumulan una cantidad alta de azúcares (Gambetta et al., 2020).

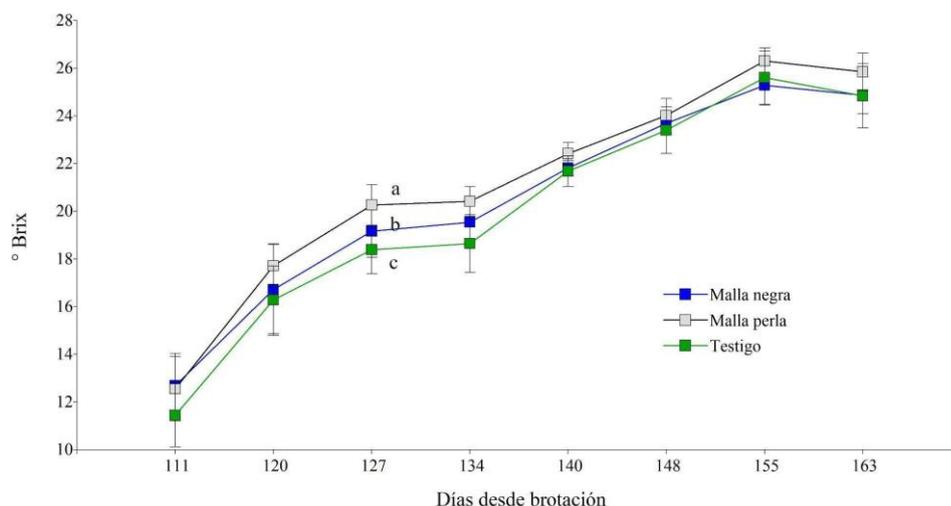


Figura 4. Evolución del contenido de sólidos solubles en baya ($^{\circ}$ Brix) registrada, en los distintos tratamientos cv. Malbec, desde 23-01-2020 hasta 13-03-2020. Las barras indican error estándar.

La relación entre un aumento de tamaño asociado a mayor concentración de azúcares con buena disponibilidad de agua también ha sido informado por Vilanova et al. (2018), Yuste y Martínez-Porro

(2018), van Leeuwen et al. (2019). En bayas, el efecto de la malla blanca, también se reflejó en índices de sabor (Jafary et al., 2022). Sin embargo, Villalobos et al. (2021) en un ensayo de vides cv. Moscatel de

Alejandría presentó mayor concentración de sólidos solubles en uvas bajo coberturas de color negro frente a las bayas desarrolladas bajo protecciones de color blanca. Además, estudios similares en manzanas, asociaron la presencia de mallas a un efecto positivo en la tasa de fotosíntesis por una menor fotoinhibición que generalmente ocurre en horas del mediodía con altos valores de temperatura. Esto se traduce en una mayor acumulación de carbohidratos que pueden producir tanto un mayor crecimiento vegetativo como un mayor tamaño de los frutos (Raffo et al., 2019).

La evolución del pH no mostró diferencias significativas entre tratamientos para la temporada envero-vendimia. Igualmente, en las curvas de seguimiento de la temporada envero-vendimia (Figura 5), pueden observarse tendencias de las bayas desarrolladas sin protección a menores valores de pH para todo el período de estudio. Las bayas bajo cobertura tuvieron comportamiento similar hasta mediados de febrero. A partir de allí, el TP presentó mayores valores frente al TN.

Evolución de pH

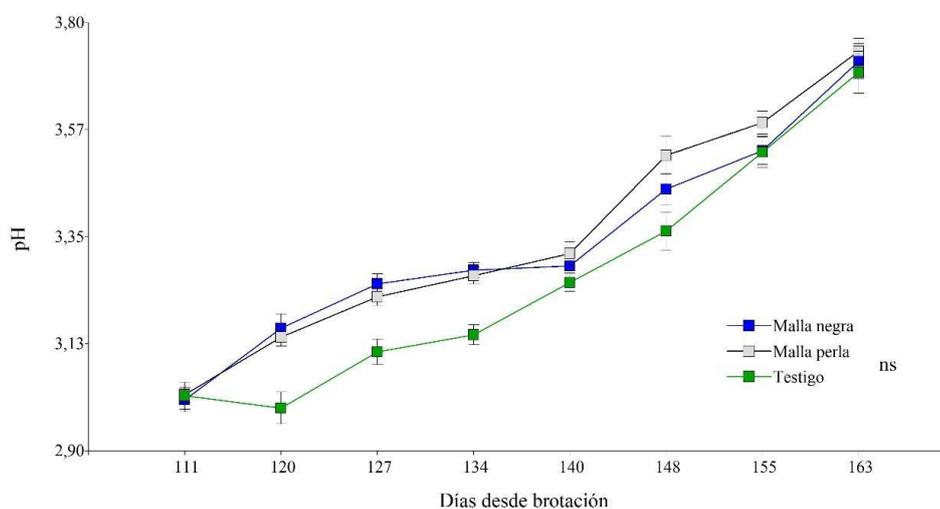


Figura 5. Evolución del pH registrado en los distintos tratamientos cv. Malbec, desde 23-01-2020 hasta 13-03-2020.

Si bien los resultados no mostraron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos, las curvas de las variables peso de baya y brix tuvieron comportamientos similares en el período envero-vendimia. Este análisis es consistente con los valores de correlación de Pearson observado entre pH con peso de baya y °brix (0,56 y 0,88). El $\delta^{13}\text{C}$ no presentó relación con el pH. Estas correlaciones también se reflejan en resultados obtenidos por Santesteban et al. (2017a). Estos valores también podrían estar influenciados por las condiciones climáticas propias de la temporada como los registrados por Urvieta et al. (2021).

Evolución de acidez total (g/L ácido tartárico)

La evolución de la acidez total mostró diferencias significativas entre las medias de los tratamientos para la temporada 2020 (Figura 6). Al inicio del envero, se observaron variaciones en los contenidos de ácido tartárico de las bayas, con valores más elevados en las cepas testigo, y menor cantidad en los tratamientos de las vides con mallas de color perla. A mediados del mes de febrero, el proceso madurativo de los frutos se unificó hasta alcanzar los 4,4 g/L en promedio de acidez total en cosecha.

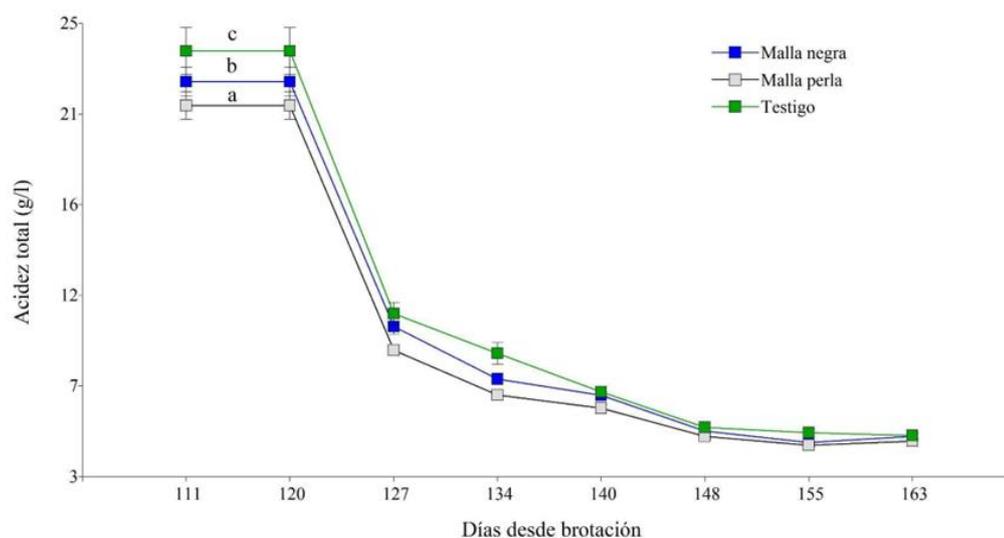


Figura 6. Evolución del contenido de acidez total, expresada en g/L de ácido tartárico, en los distintos tratamientos cv. Malbec, desde 23-01-2020 hasta 13-03-2020. Las barras indican error estándar.

Similares resultados fueron obtenidos en ensayos de riego por Junquera y colaboradores (2012) y Valentini y colaboradores (2019). Se evidenciaron valores extremos de medias ajustadas, donde el TE tuvo el valor máximo de 10,92 g/L; y el TP el mínimo de 9,34 g/L. Los datos responden a los análisis reportados por Trigo-Córdoba y colaboradores (2015), Uriarte y colaboradores (2015), Mirás-Avalos e Intrigliolo (2017), Santesteban y colaboradores (2017a), Vilanova y colaboradores, (2018) que indicaron que los azúcares y los ácidos orgánicos se correlacionan negativa y positivamente respecto al estado hídrico de los viñedos; también demostrado por van Leeuwen (2010), donde el ácido málico de las bayas disminuyó por el déficit hídrico y se correlacionó negativamente con el $\delta^{13}\text{C}$. Sin embargo, ensayos similares en vides Cabernet Sauvignon con diversas estrategias de riego y sombreado no presentaron diferencias significativas para la variable acidez total, reportados por Martínez-Luscher et al., (2020). Por otro lado, Ghiglieno et al., (2020), determinaron que la presencia de mallas antigranizo ralentizó la evolución del contenido de acidez titulable total y málica en bayas.

4. Conclusiones

En este trabajo se propuso analizar la influencia de dos colores de mallas antigranizo, perla y negro, para evaluar la eficiencia del uso de agua de riego y la

composición fisicoquímica de las uvas. Los resultados reflejaron, por un lado, que el color de la malla antigranizo negra fue más favorable para el estado hídrico de los viñedos, que los obtenidos bajo la cobertura color perla. En vendimia, las bayas desarrolladas bajo este tratamiento presentaron los menores valores de $\delta^{13}\text{C}$, que, de acuerdo con las escalas vigentes, se interpreta una temporada envero-vendimia sin estrés hídrico.

Por el otro, respecto del impacto sobre las variables fisicoquímicas se destaca que el color perla genera uvas de mayor tamaño y con valores de concentración de sólidos solubles más elevados. Esto indicaría un mejor rendimiento productivo. Sin embargo, la acidez total en estos tratamientos fue menor, lo cual se interpreta como menor calidad enológica de la materia prima para su vinificación.

Este trabajo evidencia la importancia de analizar el impacto que produce el sistema de protección con malla plástica sobre el estado hídrico de las cepas y la calidad de las uvas dada la relevancia a nivel provincial de esta técnica de mitigación sobre los daños producidos por el granizo.

5. Agradecimientos

Se agradece a INTA-EEA Rama Caída, San Rafael, Mendoza que facilitó la parcela del ensayo y brindó asesoramiento técnico en el desarrollo del proyecto de investigación. Este trabajo se realizó en el marco del programa de becas de posgrado de la Secretaría de Investigación, Internacionales y Posgrado, SIIP UNCuyo.

6. Referencias

- Brillante, L., Martínez-Lüscher, J., Yu, R., & Kurtural, S. K. (2020). Carbon isotope discrimination ($\delta^{13}\text{C}$) of grape musts is a reliable tool for zoning and the physiological ground-truthing of sensor maps in precision viticulture. *Frontiers in Environmental Science*, 8, 561477.
- Castejón, A., Santamaría, G. (1993). Tecnología eléctrica. Mc Graw-Hill. Interamericana de España, S. A.
- Curetti, M. y Raffo, D. (2022). Manzanas: cuando el color es sinónimo de calidad. *Revista INTA*, N90, pág. 23-29. Alto Valle. Argentina. 107
- DACC. (Dirección de Agricultura y Contingencias Climáticas), 2023. Estadísticas 1993-2023 [en línea]. [https://www.mendoza.gov.ar/contingencias/riesgo-agricola/] [Consulta: 22 de noviembre, 2023].
- Dayer, S.; Gowdy, M.; van Leeuwen, C.; Gambetta, G. (2020). Potenciar la respuesta de la vid a la sequía para incrementar la sostenibilidad del viñedo. *IVES Technical Reviews - published September 2020* https://doi.org/10.20870/IVES-TR.2020.4482
- Farquhar, G. D., Ehleringer, J. R., & Hubick, K. T. (1989). Carbon isotope discrimination and photosynthesis. *Annual review of plant physiology and plant molecular biology*, 40(1), 503-537.
- Flores Asin, J. E. (2019). Tecnologías verdes en zonas áridas: Diseño y evaluación energético-ambiental de sistemas de vegetación de aplicación en cubiertas edilicias.
- Gambetta, G. A.; Herrera, J. C.; Dayer, S.; Feng, Q.; Hochberg, U.; Castellarin, S. D. (2020). The physiology of drought stress in grapevine: towards an integrative definition of drought tolerance. *Journal of Experimental Botany*, 71,16:4658–4676. doi:10.1093/jxb/eraa245.
- Ghiglieno, I.; Mattivi, F.; Cola, G.; Trionfini, D.; Perenzoni, D.; Simonetto, A.; Gilioli, G. y Valenti, L. (2020). The effects of leaf removal and artificial shading on the composition of Chardonnay and Pinot noir grapes. *OENO One*, 54(4), 761–777. https://doi.org/10.20870/oeno-one.2020.54.4.2556
- Hoefs, J. (2009). *Geoquímica de isótopos estables* (Springer-Verlag: Berlín, Alemania).
- Jafary, L.; Kavooosi, B.; Zare, H. (2022). Response of some Vegetative, Qualitative and Quantitative Traits of Grape Vine (*Vitis vinifera* L. Cv. Rishbaba) to Type of Color and Percentage of Shading in Netting System. *L. Journal of Horticultural Science*. DOI: 10.22067/jhs.2021.73470.1105.
- Junquera, P.; Lissarrague, J. R.; Jiménez, L.; Linares, R. y Baeza, P. (2012). Long-term effects of different irrigation strategies on yield components, vine vigour, and grape composition in cv. Cabernet-Sauvignon (*Vitis vinifera* L.). *Irrigation Science*, 30(5), 351–361. https://doi.org/10.1007/s00271-012-0348-y
- López, G.; Boinia, A.; Manfrinia, L.; Torres-Ruiza, J.M.; Pierpaolia, E.; Zibordia, M.; Loscialeb, P.; Morandia, B.; Corelli-Grappadellia, L. (2018). Effect of shading and water stress on light interception, physiology and yield of apple trees. *G. Agricultural Water Management* 210 140–148.
- Martín, V. M.; Gallego-Nicasio, B.; Pulido Lería, C. (2023). *Elaboración de vinos, otras bebidas alcohólicas, aguas cafés e infusiones*. Editorial IC. ISBN: 978-84-1103-425-8.
- Martínez-Lüscher, J.; Chen, C.C.; Brillante, L.; Kurtural, S.K. (2017). La exclusión parcial de la radiación solar con redes de sombra de color reduce la degradación de los ácidos orgánicos y flavonoides de la baya de la uva (*Vitis vinifera* L.). *Journal of Agricultural and food chemistry*. 65, 10693-10702. Doi: 10.1021/acs.jafc.7b04163.
- Mena Morales, A.; Martínez Gascueña, J.; Chacón Vozmediano, J.L.; Izquierdo Cañas, P.M.; Muñoz Organero, G. y Grupo MINORVIN. (2022). Evaluación del estado hídrico de variedades minoritarias de vid de diferentes zonas vitícolas de España por medidas de la relación isotópica del carbono ($\delta^{13}\text{C}$). IV Jornadas del Grupo de Viticultura. Sociedad Española de Ciencias Hortícolas pág. 184-209. Editores: Gonzaga Santesteban, Nazareth Torres. Pamploma/Iruña. España.
- Mirás-Avalos, J.M.; Intrigliolo, D.S. (2017). Grape composition under abiotic constraints: water stress and salinity. *Frontiers in Plant Science* 8, 851.
- Muskaan, R.; Aggarwal, R. K.; Bhardwaj, S. K. (2022). Effect of anti-hail net installations on microclimate around apple plants in orchards

- of Himachal Pradesh. *Journal of Agrometeorology*. ISSN: 0972-1665. Vol. No. 24 (1): 83-85 (March 2022). <https://journal.agrimetassociation.org/index.php/jam>.
- Nahuel, C.G. (2013). Tesis Magister Scientiae Comportamiento agronómico de la vid (*Vitis vinifera*, L.) var. Merlot bajo tres sistemas de protección con malla plástica antigranizo. Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza. Argentina.
- Nazralla, J.J.B.; Paladino, S. C.; Vila, H. F.; Lucero, C.C. (2009). Manual de técnicas analíticas para mostos y vinos. 1era Edición Ediciones INTA. Luján de Cuyo. ISBN 978-967-1623-41-9.
- Olivares-Soto, H.; Bastías, R. M.; Calderón-Orellana, A.; and López, M. D. (2020). Sunburn control by nets differentially affects the antioxidant properties of fruit peel in 'gala' and 'Fuji' apples. *Hortic. Environ. Biotechnol.* 61, 241–254. doi: 10.1007/s13580-020-00226-w
- Pallotti, L.; Silvestroni, O.; Dottori, E.; Lattanzi, T.; Lanari, V. (2023). Effects of shading nets as a form of adaptation to climate change on grapes production: a review. *OENO One* 57:2. DOI: <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2023.57.2.7414>.
- Plantevin, M.; Gowdy, M.; Destrac-Irvine, A.; Marguerit, E.; Gambetta, G. A., van Leeuwen, C. (2022). Using $\delta^{13}\text{C}$ and hydroscares for discriminating cultivar specific drought responses. *Vine and wine Open Access Journal*, July 3-8, 2022. XIVth International Terroir Congress. DOI:10.20870/oeno-one.2022.56.2.5434. Bordeaux, France.
- Raffo, D., Curetti, M. (2022). Manzanas: cuando el color es calidad. *Revista INTA Alto Valle*, 90. Río Negro. Argentina.
- Raffo, M., Rodríguez, A., Cureyi, M., Calvo, G. Muñeco, L. (2019). Experiencias en el uso de mallas antigranizo para la protección de manzanos en el Alto Valle de Río Negro y Neuquén, Argentina. INIA Las Brujas. Seminario de actualización técnica en frutales de pepita. Uruguay.
- Rienth, M., Laurent, C., Scholasch, T. (2023). Cuáles son los métodos basados en la planta para evaluar el estado hídrico de la vid. *Enolife*, <https://enolife.com.ar/es/cuales-son-los-metodos-basados-en-la-planta-para-evaluar-el-estado-hidrico-de-la-vid/>
- Santesteban, L.G., Miranda, C., Barbarin, I. y Royo, J.B. (2015). Stable isotopes in viticulture: a review. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 21: 157-167. <https://doi.org/10.1111/ajgw.12124>.
- Santesteban, L. G., Di Gennaro, S.F., Herrero-Langreo, A., Miranda, C., Royo, J.B., Matese, A. (2017a). High-resolution UAV-based thermal imaging to estimate the instantaneous and seasonal variability of plant water status within a vineyard. *Agric Water Manag.* 2017; 183:49-59.
- Santesteban, L.G., Miranda, C., Urrestarazu, J., Loidi, M., Royo, J.B. (2017b). Severe trimming and enhanced competition of laterals as a tool to delay ripening in Tempranillo vineyards under semiarid conditions. *OENO One*. 2017;51(2):191-203. doi:10.20870/oeno-one.2016.0.0.1583.
- Spangenberg, J. E; Schweizer, M.; Zufferey, V. (2020). Shifts in carbon and nitrogen stable isotope composition and epicuticular lipids in leaves reflect early water-stress in vineyards. *Science of the Total Environment* 739 (2020) 140343
- Spangenberg, J.E., Zufferey, V., (2018). Changes in soil water availability in vineyards can be traced by the carbon and nitrogen isotope composition of dried wines. *Sci. Total Environ.* 635, 178–187.
- Trigo-Córdoba, E., Bouzas-Cid, Y., Orriols-Fernández, I., & Mirás-Avalos, J. M. (2015). Effects of deficit irrigation on the performance of grapevine (*Vitis vinifera* L.) cv. "Godello" and "Treixadura" in Ribeiro, NW Spain. *Agricultural Water Management*, 161, 20–30. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.07.011>
- Uriarte, D., Intrigliolo, D. S., Mancha, L. A., Valdés, E., Gamero, E., & Prieto, M. H. (2016). Combined effects of irrigation regimes and crop load on "Tempranillo" grape composition. *Agricultural Water Management*, 165, 97–107. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.11.016>
- Urvieta, R., Gregory, J., Buscema, F., Bottini, R., Fontana, A. (2021). Terroir and vintage discrimination of Malbec wines based on phenolic composition across multiple sites in Mendoza, Argentina. *Scientific Reports* (11:2863). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-82306-0>
- Valentini, G., Allegro, G., Pastore, C., Colucci, E., Magnanini, E., & Filippetti, I. (2019). Climate

- change and vine training systems: the influence different spatial distribution of shoots may have on sugar accumulation in Sangiovese grapevines. *BIO Web of Conferences*, 13, 04006. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20191304006>
- Van den Bosch, M. E. (2022). Evaluación económica de las pérdidas por granizo en los oasis de la provincia de Mendoza e identificación de eventos extremos. Copyright: Facultad de Ciencias Económicas, Universidad de Buenos Aires. ISSN: 2250-687X - ISSN (En línea): 2250-6861. Argentina.
- van Leeuwen, C. (2010). Terroir: the effect of the physical environment on vine growth, grape ripening and wine sensory attributes. DOI:10.1533/9781845699284.3.273. ENITA - Université de Bordeaux, France.
- van Leeuwen, C.; Pieri, P.; Gowdy, M.; Ollat, N.; Roby, J.-P. (2019). Reduced density is an environmental friendly and cost effective solution to increase resilience to drought in vineyards in a context of climate change. *OENO One* 53, 129–146 (2019). <https://doi.org/10.20870/oenone.2019.53.2.2420>.
- Vilanova, M., Rodríguez-Nogales, J. M., Vila-Crespo, J., Yuste, J. (2018). Influence of water regime on yield components, must composition and wine volatile compounds of *Vitis vinifera* cv. Verdejo. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 25(1), 83-91. <https://doi.org/10.1111/ajgw.12370>
- Yilmaz, T.; Ates, F.; Turan, M.; Hatterman-Valenti, H.; Kaya, O. (2024). Dynamics of Sugars, Organic Acids, Hormones, and Antioxidants in Grape Varieties 'Italia' and 'Bronx Seedless' during Berry Development and Ripening. *Horticulturae*, 10(3), 229.
- Yuste, J., Vicente, A., & Martínez-Porro, D. (2018). La dosis de riego en cv. Verdejo: Estado hídrico, efectos fisiológicos y repercusión agronómica en la D.O. Rueda. Instituto Tecnológico Agrario de Castilla y León. CN Riegos XXXVI, Valladolid. <https://doi.org/10.25028/cnriegos.2018.a02>.



Mejora de las características finales de películas biodegradables de almidón, mediante el uso de un diseño multifactorial

Héctor Alejandro Anzorena^{1,2}, Ignacio Noguero¹, Olivia Valeria López^{3,4}, Mario Daniel Ninago^{1,2*}

1. Facultad de Ciencias Aplicadas a la Industria. Universidad Nacional de Cuyo (FCAI-UNCuyo), Bernardo de Irigoyen 375, San Rafael, 5600, Mendoza, Argentina.
2. Instituto de Ingeniería y Ciencias Aplicadas a la Industria (ICAI-UNCuyo-CONICET), Bernardo de Irigoyen 375, San Rafael, 5600, Mendoza, Argentina.
3. Planta Piloto de Ingeniería Química (PLAPIQUI-CONICET), Camino La Carrindanga Km 7 (8000), Bahía Blanca, Argentina.
4. Departamento de Química, Universidad Nacional del Sur, Av. Alem 1253, Bahía Blanca 8000, Argentina

*E-mail: mninago@fcai.uncu.edu.ar

PALABRAS CLAVES

Almidón
Propiedades radiométricas
Mantos protectores

RESUMEN

El empleo de películas biodegradables como mantos protectores de suelo ha despertado interés, debido a su capacidad para incrementar la productividad agrícola al funcionar como una barrera física que ayuda a disminuir la evaporación del agua de riego, reduce el contacto directo de las hortalizas con el suelo, además de controlar el crecimiento de malezas que puedan competir por los nutrientes presentes en el mismo. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo consistió en evaluar el efecto que produce la incorporación de aditivos (glicerol, bórax y bentonita) sobre las propiedades mecánicas y ópticas de películas de almidón, obtenidas por gelatinización térmica. Para ello, se prepararon suspensiones de almidón de mandioca al 5% (m/v), se incorporaron tres aditivos en concentraciones variables (fijadas según un diseño experimental de 3 factores en 3 niveles): glicerol como plastificante (15 a 30% m/m), bórax como entrecruzante (3 a 6% m/m) y bentonita como agente de refuerzo (0 a 10% m/m). Las propiedades radiométricas se evaluaron mediante espectrofotometría UV-vis y la resistencia mecánica se determinó mediante el ensayo de punción. Los resultados revelaron que la presencia de bentonita y bórax incrementaron la capacidad de barrera a la radiación en los rangos UV y visible, respecto a la matriz sin rellenos, mientras que las interacciones entre el glicerol, bentonita y bórax, impactaron significativamente sobre la elasticidad y la fuerza máxima de punción.

Improvement of the final characteristics of biodegradable starch films using a multifactorial design

KEYWORDS

Starch
Radiometric properties
Mulch films

ABSTRACT

The use of biodegradable films as soil mulches has gained interest due to their ability to increase agricultural productivity by acting as a physical barrier that helps reduce irrigation water evaporation, reduces direct contact of vegetables with the soil, and controls the growth of weeds that may compete for nutrients in the soil. Therefore, the objective of this work was to evaluate the effect of the incorporation of additives (glycerol, borax, and bentonite) on the mechanical and optical properties of starch films obtained by thermal gelatinization. For this purpose, suspensions of 5% (m/v) cassava starch were prepared, and three additives were incorporated at variable concentrations (fixed according to a 3-factor, 3-level experimental design): glycerol as a plasticizer (15 to 30% m/m), borax as a cross-linker (3 to 6% m/m), and bentonite as a reinforcing agent (0 to 10% m/m). Radiometric properties were evaluated by UV-vis spectrophotometry, and mechanical resistance was determined by the puncture test. The results revealed that the presence of bentonite and borax increased the barrier capacity to radiation in the UV and visible ranges, compared to the matrix without fillers, while the interactions between glycerol, bentonite, and borax significantly impacted elasticity and maximum puncture force.

1. Introducción

En las últimas décadas, la preocupación por la sostenibilidad y la reducción de residuos plásticos ha llevado al desarrollo de materiales biodegradables como alternativas a los plásticos convencionales. Particularmente, las películas biodegradables a base de polímeros se presentan como una solución prometedora para sustituir los plásticos sintéticos en aplicaciones específicas, tales como el envasado o la producción sostenible de alimentos (Briassoulis et al., 2004). Tradicionalmente, los plásticos de polietileno (PE) han sido utilizados como mantos protectores de suelos (mulching), debido a las excelentes propiedades mecánicas y de barrera (agua y radiaciones UV-vis) incrementando la producción y el rinde de cultivos, principalmente en hortalizas de hoja (Johnston et al., 2016). Sin embargo, una vez finalizado el ciclo de cultivo, las películas de PE persisten en el medio ambiente, siendo necesario su reciclaje o correcta disposición final, además de generar micro plásticos que resultan difíciles de eliminar del suelo. Por lo tanto, se están evaluando y estudiando, alternativas más sostenibles que permitan reemplazar los plásticos de origen sintético por materiales menos contaminantes (Feng et al., 2021).

Biopolímeros como el almidón, emergen como materiales viables para este tipo de aplicación debido a su abundancia, bajo costo y capacidad formadora de película, además de ser obtenidos de fuentes renovables como raíces y/o tubérculos. A pesar de sus ventajas ambientales, las películas de almidón presentan limitaciones significativas en términos de propiedades mecánicas y resistencia a la humedad que condicionan su aplicación final (Anzorena et al., 2024). Para superar estos obstáculos, es necesario incorporar aditivos que permitan mejorar las propiedades mecánicas y de barrera. Así, plastificantes como el glicerol aumentan

la flexibilidad del material; rellenos naturales como la bentonita refuerzan la matriz polimérica; y agentes entrecruzantes como el bórax incrementan la estabilidad dimensional, reduciendo la hidrofiliidad de las películas. Por otro parte una vez finalizado el ciclo de cultivo, los materiales biodegradables pueden ser incorporados al suelo y degradados en sustancias simples como dióxido de carbono, agua y biomasa, eliminando así la necesidad de removerlos (Bandopadhyay et al., 2018), siendo ésta su principal ventaja frente a las películas obtenidas a partir de productos de petroquímicos de origen no renovable.

2. Materiales y métodos

Para la realización de este trabajo, se utilizó almidón de mandioca (Grandiet), glicerol (Biopack), tetraborato de sodio (Biopack) y bentonita natural (San Rafael, Mendoza).

Preparación de la arcilla

La bentonita utilizada fue donada por la Familia Peñazco, quienes son propietarios de una cantera ubicada en el distrito Cuadro Benegas, Paraje "Los Jilgueros" del departamento de San Rafael. Inicialmente, el mineral fue sometido a un proceso de molienda y tamizado para reducir su tamaño inicial. El proceso involucró la trituration de la arcilla hasta lograr su división en partículas pequeñas mediante el uso de un molinillo de cuchillas. Luego, se realizaron lavados con agua destilada y posterior centrifugación y filtración para eliminar impurezas (principalmente restos de arena y cuarzo), presentes en la arcilla de cantera. Finalmente, las partículas obtenidas fueron secadas hasta peso constante, molidas y tamizadas, obteniéndose partículas con tamaño promedio entre 74 y 420 micrones (Figura 1).



Figura 1. (a) Molienda, (b) Tamizado y (c) bentonita final (B)

Optimización de las formulaciones

Para llevar a cabo la optimización de las formulaciones de almidón, se trabajó con un diseño de tipo Box-Behnken el cual permite minimizar el número de ensayos experimentales a realizar, proponiendo formulaciones que ayuden a describir el efecto de cada aditivo sobre las películas de

almidón. Para esto, se definieron previamente los niveles máximos y mínimos de concentración de los factores experimentales que afectan la propiedad a analizar, y se obtuvieron las distintas combinaciones a ensayar, las cuales se resumen en la Tabla 1. Así, se obtuvieron 12 formulaciones más el punto central (F2) que debe ensayarse por triplicado, obteniéndose en total 15 formulaciones.

Tabla 1. Formulaciones propuestas a partir del diseño de experimento Box-Behnken

Formulaciones	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12	F13*
Glicerol (x_1)	15	30	30	22,5	15	15	22,5	22,5	15	30	30	22,5	22,5
Bentonita (x_2)	10	10	5	10	0	5	0	0	5	5	0	10	5
Bórax (x_3)	4,5	4,5	6	43	4,5	6	6	3	3	3	4,5	6	4,5

*F13, punto central que se realiza por triplicado.

Películas por gelatinización térmica

Para obtener las películas, se prepararon suspensiones acuosas de almidón de mandioca al 5% (m/v), las cuales fueron gelatinizadas a 90°C por 10 minutos, manteniendo agitación constante. Luego, se agregaron los aditivos en las concentraciones indicadas por el diseño de experimento (Tabla 1). Posteriormente, se volcaron 30 g de suspensión gelatinizada sobre placas Petri de 9 cm de diámetro, manteniendo la relación masa:área constante. Finalmente, las formulaciones se secaron en estufa a 45°C hasta peso constante. Una vez obtenidas las películas, se conservaron en humidificador a temperatura ambiente y una humedad relativa del 65% hasta el momento de su caracterización mecánica y óptica.

Caracterización de las películas

Para confirmar la homogeneidad en el espesor se midió el mismo con un medidor digital de espesores (CM-8812) tomando 10 medidas aleatorias en cada película. La resistencia mecánica de las películas se evaluó a través de ensayos de punción, utilizando un analizador de texturas (TA-XT2i). Estos ensayos se realizaron empleando una probeta cilíndrica de 2mm con una velocidad de ensayo de 1 mm/s, registrando los valores de fuerza máxima para producir la ruptura por punción de la película de acuerdo con la metodología reportada por García et al., (2004).

Para evaluar la capacidad de barrera a la radiación en los rangos ultravioleta y visible, se realizaron barridos espectrales en un espectrofotómetro (DR 6000) en el rango de 200 y 700 nm. A partir de los espectros de absorbancia, se cuantificó la capacidad de bloqueo mediante el índice de transmitancia PAR (entre 400 a 700nm), región de fotosíntesis, y transmisión de la radiación UV (300 a 380nm) definidos por la norma ISO 9050:2012(E), siguiendo la metodología publicada en trabajos previos del grupo (Anzorena et al., 2024, Passaretti et al., 2022).

3. Resultados y Discusión

Optimización de las formulaciones

Para cada una de las formulaciones se calcularon los valores de índice PAR, capacidad de transmitancia (UV) y fuerza máxima de punción. A partir de estos resultados, y mediante el uso del software, Statgraphics, se obtuvieron diagramas de Pareto, para poder determinar cuál o cuáles de las variables estudiadas (bentonita, bórax y glicerol) mejoran, perjudican o no impactan de manera significativa sobre el desempeño final de la matriz de almidón. De esta forma se busca optimizar el uso de los aditivos a incorporar a la matriz de almidón para mejorar las propiedades mecánicas y ópticas que esperamos obtener.

Tabla 2. Resumen de las propiedades medidas sobre las películas.

Formulación	Índice PAR	Transmitancia UV	Punción
F1	0,685±0,02	0,565±0,05	2,77±0,7
F2	0,665±0,09	0,530±0,04	10,17±1,34
F3	0,719±0,01	0,607±0,08	15,03±3,4
F4	0,713±0,03	0,587±0,03	7,36±0,8
F5	0,820±0,20	0,741±0,03	2,15±0,4
F6	0,784±0,07	0,682±0,04	3,35±0,8
F7	0,783±0,05	0,740±0,06	2,76±0,6
F8	0,850±0,06	0,784±0,09	20,48±0,78
F9	0,797±0,09	0,708±0,07	4,3±0,51
F10	0,807±0,08	0,714±0,06	5,99±0,09
F11	0,859±0,09	0,785±0,08	3,91±0,12
F12	0,697±0,01	0,596±0,04	4,58±0,32
F13	0,738±0,03	0,686±0,04	13,45±1,2
F14*	0,764±0,04	0,682±0,01	7,94±1,24
F15*	0,778±0,03	0,643±0,02	4,58±0,78

*F14 y F15 corresponden al punto central (F13).

Los diagramas de Pareto muestran aquellos efectos de los aditivos que son significativos sobre las propiedades finales de las películas de almidón. En el primer diagrama analizado (Figura 3), se muestra el impacto de los mismos sobre la capacidad de transmitancia de radiación UV. Como puede observarse, la adición de bentonita es el único factor que produce un efecto estadísticamente

significativo. Esto indica que la bentonita incrementa la capacidad de las películas para bloquear la radiación en el rango UV. Por otra parte, para las concentraciones de los otros factores ensayados (glicerol y bórax, o combinación de ellos) no se observaron efectos estadísticamente significativos en las propiedades UV.

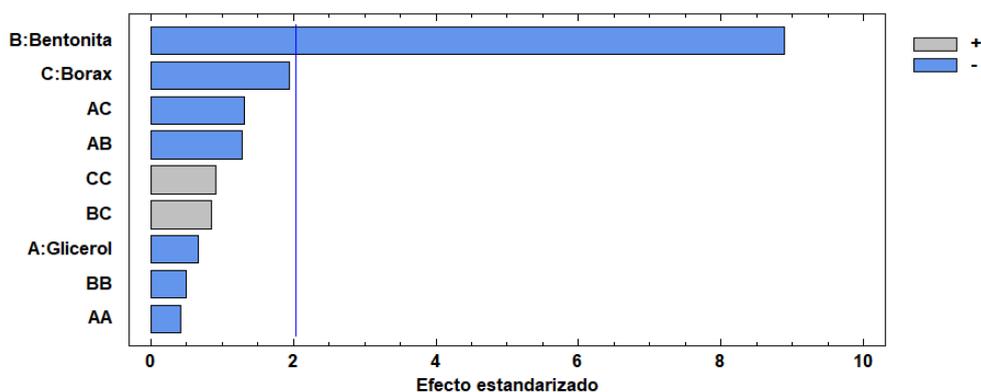


Figura 3. Diagrama de Pareto obtenido para la propiedad Barrera a la radiación UV.

A partir de los resultados arrojados por el software Statgraphic se obtuvo una ecuación por regresión polinomial, la cual presentó un valor de R de 86,12%, valor que permite explicar la relación entre las variables independientes y la propiedad analizada. Además, en la figura 4, se representan las superficies

de respuesta arrojadas por el software, las cuales se obtienen para la variable trasmisión de radiación UV en las películas, para las formulaciones con concentraciones fijas de bentonita y bórax para 5% y 4,5%, respectivamente.

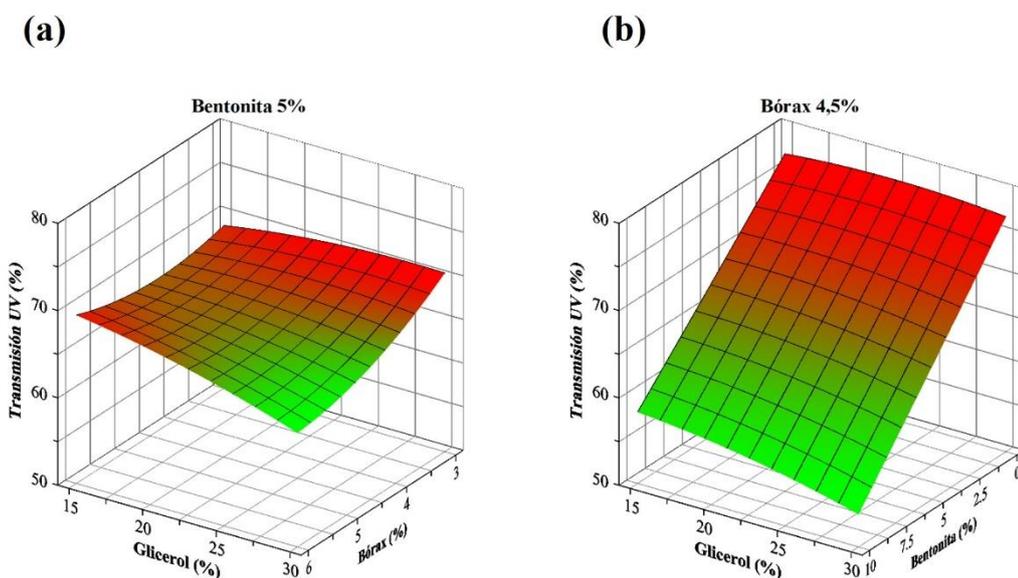


Figura 4. Superficies de respuesta para diferentes concentraciones de (a) bórax y (b) bentonita para la propiedad trasmisión de radiación UV en las películas.

En el segundo diagrama de Pareto (Figura 5) se analizan los efectos sobre el índice PAR, el cual mide la radiación en el rango visible utilizada por los vegetales para realizar el proceso de fotosíntesis. En este caso, se observó que la bentonita y bórax producen efectos significativos sobre esta propiedad, disminuyendo sus valores. Esto sugiere

que ambos aditivos mejoran las propiedades de las películas en términos de su capacidad para bloquear la radiación fotosintéticamente activa, propiedad buscada para impedir o reducir el crecimiento de malezas debajo del manto una vez aplicado sobre el suelo de cultivo.

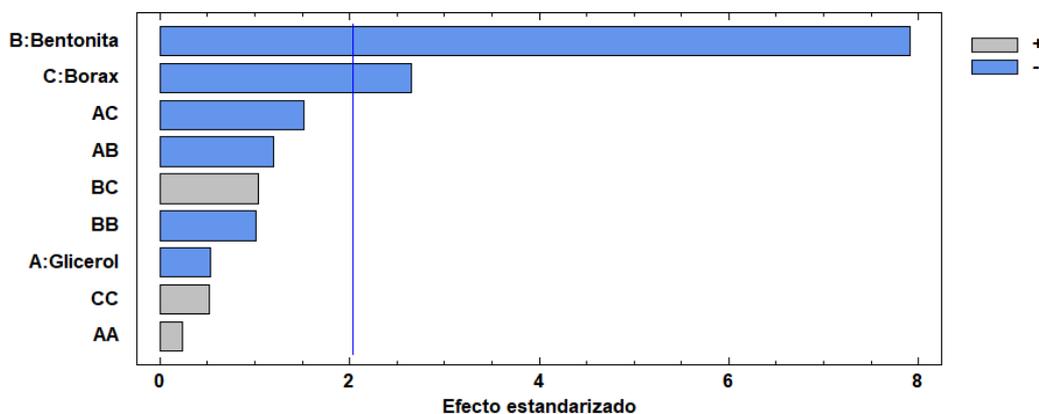


Figura 5. Diagrama de Pareto para la propiedad índice PAR.

A partir de los resultados arrojados por el software Statgraphic se obtuvo una ecuación por regresión polinomial, cuyo ajuste indica que el modelo

obtenido permite explicar hasta en un 85,62% la relación entre las variables independientes y la propiedad analizada.

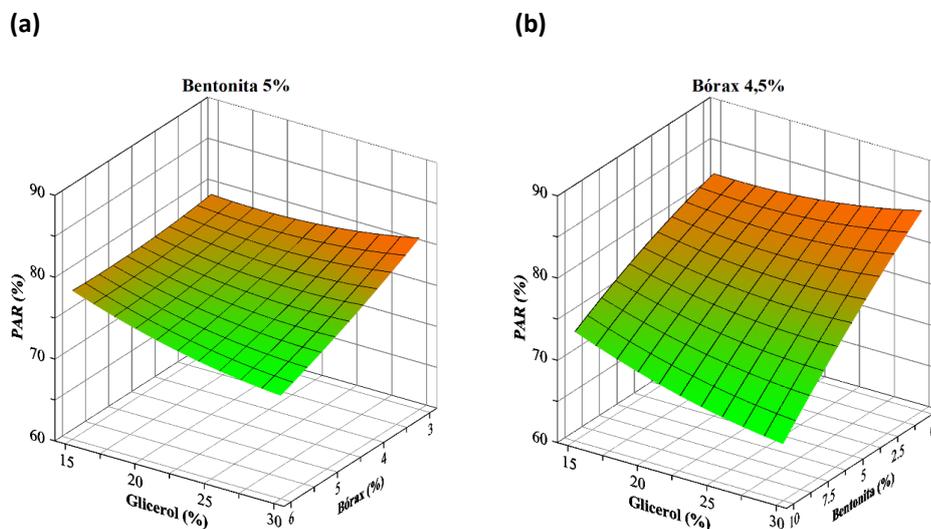


Figura 6. Superficies de respuesta para diferentes concentraciones de (a) bórax y (b) bentonita para la propiedad índice PAR expresado en forma porcentual.

En la figura 6 se representan las superficies de respuesta arrojadas por el software, las cuales se obtienen para la variable índice PAR, empleando concentraciones fijas de bentonita y bórax de 5% y 4,5%, respectivamente. Los efectos observados en las figuras 4 y 6 pueden atribuirse a la presencia de las partículas, las cuales obstaculizan el pasaje de la

radiación UV y visible a través de la matriz de almidón, incrementando estas propiedades. Resultados similares se han reportado en trabajos previos del grupo y en la literatura para compuestos poliméricos reforzados con partículas minerales (Mbey 2012; Ninago et al., 2017, Anzorena et al., 2024).

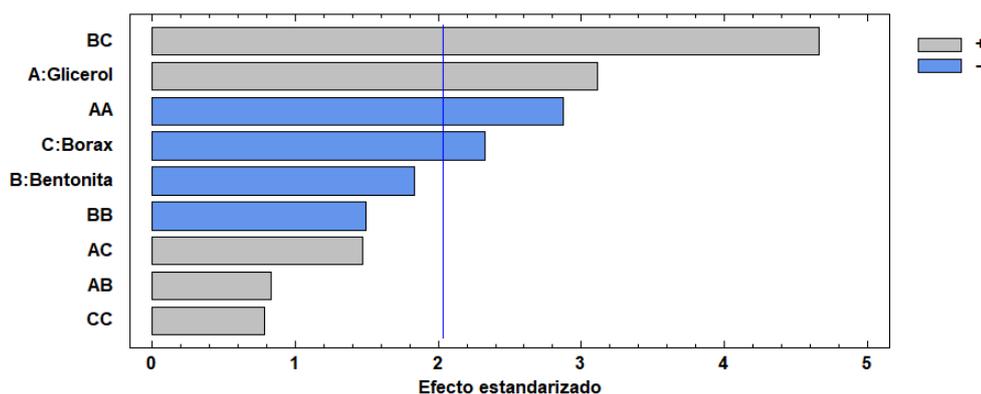


Figura 7. Diagrama de Pareto para la propiedad Fuerza máxima de punción

Finalmente, la Figura 7 muestra el efecto de los aditivos sobre la fuerza máxima de punción requerida para producir la rotura de la película. Si bien en el mismo se observa que son varios los

efectos los que afectan de manera significativa esta propiedad, el coeficiente de regresión, R arrojó un valor muy bajo (49,99 %) esto indica que el modelo no es adecuado para ajustar los valores

experimentales con los obtenidos mediante la regresión polinomial, y por lo tanto no podría emplearse para predecir de manera correcta los efectos y la interacción de los diferentes aditivos analizados sobre la fuerza máxima de punción.

4. Conclusiones

Mediante gelatinización térmica y el agregado de diferentes aditivos fue posible obtener películas de almidón de mandioca íntegras y de fácil manipulación. Por otra parte, mediante el uso de un software estadístico fue posible trabajar con un modelo matemático para evaluar el efecto de la concentración de los aditivos sobre el espesor y las propiedades radiométricas de las películas. La elección del diseño tipo Box-Behnken permitió reducir significativamente la cantidad de ensayos experimentales a realizar. Por lo tanto, se puede concluir que los resultados de este estudio no solo expanden nuestra comprensión sobre el impacto que producen los factores sobre las propiedades de las películas, sino también podrían ser empleados durante la optimización de propiedades de estos materiales.

Así, este análisis puede considerarse como punto de partida para futuras investigaciones, continuando la búsqueda constante de mejoras en las propiedades y el mejor desempeño de las películas que puedan ser potencialmente empleadas como mantos protectores de suelos.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Nacional de Cuyo (SIIP 06/L006-T1) y al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) por el apoyo financiero que hizo posible la realización de este trabajo.

6. Referencias

- Anzorena, H. A., López, O. V., & Ninago, M. D. (2024). Sprayable starch films as mulching for organic agriculture. *Organic Agriculture*, 1-17. <https://doi.org/10.1007/s13165-024-00463-8>
- Bandopadhyay, S., Martin-Closas, L., Pelacho, A. M., & DeBruyn, J. M. (2018). Biodegradable plastic mulch films: impacts on soil microbial communities and ecosystem functions. *Frontiers in microbiology*, 9, 819. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.00819>
- Briassoulis, D., Aristopoulou, A., Bonora, M., & Verlodt, I. (2004). Degradation characterisation of agricultural low-density polyethylene films. *Biosystems engineering*, 88(2), 131-143. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2004.02.010>
- Feng, S., Lu, H., & Liu, Y. (2021). The occurrence of microplastics in farmland and grassland soils in the Qinghai-Tibet plateau: Different land use and mulching time in facility agriculture. *Environmental Pollution*, 279, 116939. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116939>
- García, M. A., Pinotti, A., Martino, M. N., & Zaritzky, N. E. (2004). Characterization of composite hydrocolloid films. *Carbohydrate polymers*, 56(3), 339-345. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2004.03.003>
- Johnston, P., Freischmidt, G., Easton, C. D., Greaves, M., Casey, P. S., Bristow, K. L., ... & Adhikari, R. (2017). Hydrophobic-hydrophilic surface switching properties of nonchain extended poly (urethane) s for use in agriculture to minimize soil water evaporation and permit water infiltration. *Journal of Applied Polymer Science*, 134(45), 44756. <https://doi.org/10.1002/app.44756>
- Mbey JA, Hoppe S, Thomas F. Cassava starch-kaolinite composite film. Effect of clay content and clay modification on film properties. *Carbohydr Polym*. 2012;88:213–222. doi: 10.1016/j.carbpol.2011.11.091.
- Ninago MD, López OV, Gabriela Passaretti M, Fernanda Horst M, Lassalle VL, Ramos IC, Di Santo R, Ciolino AE, Villar MA (2017) Mild microwave-assisted synthesis of aluminum-pillared bentonites: thermal behavior and potential applications. *J Therm Anal Calorim* 129(3):1517–1531. doi.org/10.1007/s10973-017-6304-6

Passaretti, M. G., Ninago, M. D., Villar, M. A., & López, O. V. (2022). Thermoplastic starch and mica clay composites as biodegradable mulching films. *Journal of Polymers and the Environment*, 30(10), 4394-4405. <https://doi.org/10.1007/s10924-022-02518-x>