

La poda tardía como estrategia de adaptación al cambio climático en la variedad Malbec (*Vitis vinifera*) en Mendoza, Argentina

Tesis presentada por

Marianela Bustos Morgani

Director: Dr. Jorge A. Prieto

Codirector: Dr. Martín Fanzone

Comisión asesora:

Dr. Jorge Pérez Peña

Dr. Víctor Sadras

Tesis presentada como requerimiento parcial para obtener el grado de:

DOCTORA EN AGRONOMÍA

Universidad Nacional de Cuyo

Facultad de Ciencias Agrarias



UNCUYO
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE CUYO



Saber casi todo, de casi nada

AGRADECIMIENTOS

Las palabras me quedan cortas para agradecer todo el apoyo y la paciencia recibidos durante todos estos años. No quiero caer en lugares comunes, pero realmente sin su motivación constante, no hubiera sido posible llegar a este momento tan especial para mí.

Juanma, mi compañero de ruta, gracias por tu apoyo incondicional, por tu buen humor, por tu admiración y por siempre, siempre animarme a ir por más. **Juliana**, amor mío, tu entusiasmo y esfuerzo diarios me enseñan más que toda la Academia junta. Espero inspirarte la mitad de lo que vos me inspirás a mí.

Papá y mamá: han sido mi camino y mi puerto seguro. Gracias por, además, ser mi gran roca de contención. Sin su apoyo incondicional yo no estaría hoy acá. Realmente son un ejemplo en todo.

Bele, Laly, Juan, Santi: Uno más crack que el otro, los mejores hermanos que me pudo haber tocado. Más que hermanos parecen un club de fans, gracias por creer más en mí que yo misma.

Goly, Martín, Pata: gracias por su apoyo y orientación en cada paso del camino.

Goly, has sido para mí un gran director, perfeccionista al extremo (como para escribirlo en lenguaje formal) pero sobre todas las cosas, un excelente compañero. Con tu oficina disponible a toda hora, y vos abierto a mejorar siempre, has sabido guiarme y contenerme en los momentos más difíciles. Desearía que todos lxs tesistas tuvieran la suerte de tener un Goly de director.

Pata, de pocas palabras pero atento a absolutamente todo: gracias por tu ayuda en este camino y en el que estoy ahora. **Santiago**, gracias por tu paciencia infinita y por ser tan buen compañero.

Al grupo de **becarios del INTA**, también gracias. Ojalá todos tuvieran la suerte de tener un grupo de trabajo tan espectacular.

Agus, amiga mía, gracias por estar codo a codo siempre. Te agradezco el tiempo de charlas, de catarsis, de arenga, de feminismo, de formación, de lucha, de amistad, de enrosques infinitos... Fortuna la mía de haberte tenido como compañera cada día de este camino. **Marcos**, el hermano mayor que la ciencia me dio. Gracias por inspirarme y por motivarme. Espero seas consciente del buen ejemplo que sos para nosotrxs.

Mariano y **Andrés**, gracias por hacer mis días mil veces más divertidos. Que suerte haberlos cruzado por allá en 2017 compartiendo oficina. **Sabri**, gracias por prestar oreja y consejos, que lindo es haber contado con tu compañía. **Mar**, gracias por soportarme en los meses más críticos, te volviste imprescindible en estos días.

Gracias también a **Jorge** y a los genios de mi pasantes: **Nahir, Mati, Anto, Andrés, Facu, Sofi, Nacho, Paula**.

INTA querido, quiero agradecerte todos estos años de trabajo. Realmente voy a extrañarte. Gracias por ser tan hermoso en cualquier época del año y por tener gente tan pero tan copada: **Ine, Sandra, Raúl, Marce, Aníbal, Bocha, Eugenia, Mariana, Ceci, Bernardo** y tantos más...

Gracias a la **educación pública**, de la que soy parte desde los 4 años. Gracias a la **Universidad Nacional de Cuyo**, a la que pertenezco desde los 12 y a la **Facultad de Ciencias Agrarias** por formarme desde el 2009. Gracias a **CONICET**, por permitirme hacer lo que más amo, que es construir a través del estudio y de la transferencia. Gracias también a los **gobiernos que apoyan el desarrollo de la Ciencia y de la Tecnología**.

Gracias al **jurado**. Ha sido un gran desafío haber defendido la tesis frente a ustedes. Les tengo una profunda admiración y quiero que sepan que para mí ha sido como exponer frente a mis rockstars favoritos.

Por último, quiero decir que nada de lo expuesto en esta tesis se logra en solitario. Me llevo el valor del trabajo en equipo (y qué equipo!!) y la satisfacción de haber aportado lo mejor de mí. Realmente me considero una privilegiada por haber compartido estos años con todos ustedes. Una vez más: GRACIAS.

RESUMEN

Las temperaturas más altas en los últimos años han generado un avance en la madurez de las bayas y han reducido el número de días a cosecha. También ha generado un desacople entre la acumulación de azúcar respecto a las antocianinas reduciendo el color del vino. Por otra parte, se espera que la demanda de evapotranspiración aumente y la disponibilidad de agua para riego disminuya, lo que es particularmente crítico en zonas semiáridas. La poda tardía se propone como una herramienta para mitigar los efectos del aumento de la temperatura retrasando la fenología y modificando la maduración en las bayas. El objetivo de esta tesis fue evaluar los efectos de la poda tardía sobre la fenología, el crecimiento vegetativo, el rendimiento, la evapotranspiración del cultivo y la composición de la baya y del vino en el cv. Malbec. El experimento se llevó a cabo en el INTA-EEA Mendoza, durante las temporadas 2017-2018, 2018-2019, y 2019-2020 en un viñedo cv. Malbec (clon 18) implantado a pie franco y regado por goteo. Los tratamientos consistieron en cuatro fechas de poda correspondientes a diferentes estadios fenológicos según la escala de E-L modificada por Coombe(Coombe, 1995)(Coombe, 1995)(Coombe, 1995)(Coombe, 1995)(Coombe, 1995)(Coombe, 1995)(Coombe, 1995): yema en estadio invernal (PI, estadio 1), brotación (Br, estadio 4), 2-3 hojas (2-3H, estadio 9) y 8 hojas desplegadas (8H, estadio 15). Las plantas se cosecharon cuando cada tratamiento alcanzó los 23°Brix. Los tratamientos de poda tardía retrasaron la fenología desde la brotación hasta el envero los tres años del experimento, pero la fecha de cosecha no pudo posponerse. Las plantas podadas con 2-3H y 8H mostraron una disminución en el rendimiento de la vid del 17% y 60%, respectivamente, mientras que las plantas podadas en brotación mostraron el mismo rendimiento que las plantas control. La poda tardía no causó efectos en la formación del rendimiento en la temporada siguiente. Por otra parte, las plantas podadas con 2-3H y 8H redujeron la evapotranspiración anual del cultivo entre un 5-10% principalmente al inicio del ciclo, respecto al control. En 2018, los vinos de las plantas podadas con 8H tuvieron un mayor contenido de fenoles y taninos totales; mientras que la concentración de antocianinas fue mayor en los vinos de 2-3H y 8H. En 2019, los vinos de las plantas provenientes de 8H tuvieron mayor contenido de antocianinas, mientras que el resto de los parámetros fue igual para todos los tratamientos. Nuestro estudio provee evidencia de que la poda tardía es efectiva para retrasar las primeras etapas fenológicas pero no es tan efectiva para retrasar la acumulación de sólidos solubles fijada para la cosecha, en nuestras condiciones. Por otra parte, la poda tardía reduce la evapotranspiración total del cultivo además de ser una herramienta útil para mantener o mejorar la composición fenólica de las bayas y el vino.

Palabras clave: cambio climático, adaptación, fenología, componentes del rendimiento, consumo de agua, madurez de la baya, composición fenólica, Malbec, poda tardía.

ABSTRACT

The higher temperatures in recent years have generated an advance in the maturity of the berries and have reduced the number of days to harvest. It has also generated a decoupling between sugar accumulation and anthocyanins, reducing the color of the wine. On the other hand, the demand for evapotranspiration is expected to increase and the availability of water for irrigation to decrease, which is particularly critical in semi-arid zones. Late pruning is proposed as a tool to mitigate the effects of increased temperature by delaying phenology and modifying berry ripening. The objective of this thesis was to evaluate the effects of late pruning on phenology, vegetative growth, yield, crop evapotranspiration, and berry and wine composition in cv. Malbec. The experiment was carried out at INTA-EEA Mendoza, during the 2017-2018, 2018-2019, and 2019-2020 seasons in a vineyard cv. Malbec (clone 18), own rooted and drip irrigated. The treatments consisted of four pruning dates corresponding to different phenological stages according to the E-L scale modified by Coombe: winter bud (PI, stage 1), budburst (Br, stage 4), 2-3 unfolded leaves (2-3H, stage 9) and 8 unfolded leaves (8H, stage 15). The plants were harvested when each treatment reached 23°Brix. The late pruning treatments delayed the phenology from budburst to veraison for the three years of the experiment, but the harvest date could not be postponed. Plants pruned with 2-3H and 8H showed a decrease in vine yield of 17% and 60%, respectively, while plants pruned at budburst showed the same yield as control plants. Late pruning had no effect on yield formation in the following season. On the other hand, the plants pruned with 2-3H and 8H reduced the annual evapotranspiration of the crop between 5-10%, mainly at the beginning of the cycle, compared to the control. In 2018, the wines from plants pruned with 8H had a higher content of phenols and total tannins; while the concentration of anthocyanins was higher in wines from 2-3H and 8H. In 2019, the wines from plants from 8H had higher anthocyanin content, while the rest of the parameters were the same for all treatments. Our study provides evidence that late pruning is effective in delaying early phenological stages but not as effective in delaying the accumulation of fixed soluble solids for harvest, under our conditions. On the other hand, late pruning reduces the total evapotranspiration of the crop as well as being a useful tool to maintain or improve the phenolic composition of berries and wine.

Keywords: climate change, adaptation, phenology, yield components, water consumption, berry maturity, phenolic composition, Malbec, late pruning.

PRODUCCIÓN CIENTÍFICA

Artículos científicos

BUSTOS MORGANI, Marianela; FANZONE, Martín; PEREZ PEÑA, Jorge E.; SARI, Santiago; GALLO, Agustina; GOMEZ TOURNIER, Mariana; PRIETO, Jorge A. *Late pruning modifies leaf to fruit ratio and shifts maturity period, affecting berry and wine composition in Vitis vinifera L. cv. 'Malbec' in Mendoza, Argentina* SCIENTIA HORTICULTURAE.: ELSEVIER SCIENCE. BV. 2023. vol. 313 n°. p 111861. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.111861>

BUSTOS MORGANI, Marianela; PEREZ PEÑA, Jorge E.; FANZONE, Martín; PRIETO, Jorge A. *Pruning after budburst delays phenology and affects yield components, crop coefficient and total evapotranspiration in Vitis vinifera L. cv. Malbec in Mendoza, Argentina.* SCIENTIA HORTICULTURAE.: ELSEVIER SCIENCE BV. 2022. vol. 296 n°. p - . ISSN 0304-4238. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.110886>

Artículos de divulgación

BUSTOS MORGANI, Marianela; SARI, Santiago; GALLO, Agustina; PEREZ PEÑA, Jorge E.; FANZONE, Martín; PRIETO, Jorge A. *La poda tardía como estrategia vitícola para mejorar la calidad polifenólica de vinos Malbec en zonas cálidas.* Revista IDIA XXI. Buenos Aires: INTA. 2021 vol. n°. p - .ISSN 0018-9081. <https://inta.gob.ar/documentos/revista-idea-21-0>

BUSTOS MORGANI, Marianela; PEREZ PEÑA, Jorge E.; GALLO, Agustina; FANZONE, Martín; SARI, Santiago; PRIETO, Jorge A. *INTA estudia la poda tardía en Malbec para retrasar la brotación y escapar de heladas de primavera.* Revista Enolife. La vida del vino. 2021. Mendoza, Argentina. 2021. <https://enolife.com.ar/es/inta-estudia-la-poda-tardia-en-malbec-para-retrasar-la-brotacion-y-escapar-de-heladas-de-primavera/#:~:text=Los%20resultados%20demostraron%20que%20con,plantas%20pocas%20con%2030%20cm>).

BUSTOS MORGANI, Marianela; FANZONE, Martín; SARI, Santiago; PEREZ PEÑA, Jorge E.; PRIETO, Jorge A. *La poda tardía podría limitar el daño de las altas temperaturas en la calidad del vino.* Revista Campo Andino. 2019. Mendoza. 2019.

Capítulos de libros

PRIETO J.A, GALLO A., GALAT GIORGI E, BUSTOS MORGANI M., GOMEZ TOURNIER M., PEREZ PEÑA J. *El cultivo de la vid en un contexto de cambio*

climático. COSTANTINI, A. (Ed) Impactos del cambio climático sobre el sector agropecuario. En prensa

Eventos científicos tecnológicos

Presentación del "*Estudio e implementación de la poda tardía como estrategia de adaptación al cambio climático*". Junio 2021. Seminario de presentación de resultados de las principales líneas de investigación del proyecto disciplinar de INTA "Adaptación de los cultivos al cambio climático".

Marianela BUSTOS MORGANI, Martín FANZONE, Santiago SARI, Agustina GALLO, Andrés MARTÍNEZ, Jorge PEREZ PEÑA, Jorge A. PRIETO. *La poda tardía aumenta el contenido de fenoles totales y de antocianinas en el vino en cv. Malbec, Mendoza, Argentina*. XVI Congreso latinoamericano de viticultura y enología. Perú, 2019.

Presentación del "*Estudio de la poda tardía como estrategia de adaptación al aumento de la temperatura (cv. Malbec)*". Noviembre 2018. Exposición en Vintage Report – Simposio regional al sector científico y productivo

Índice

RESUMEN.....	3
ABSTRACT.....	6
PRODUCCIÓN CIENTÍFICA	7
Artículos científicos.....	7
Artículos de divulgación.....	7
Capítulos de libros	7
Eventos científicos tecnológicos	8
Lista de tablas	12
Lista de figuras	17
CAPÍTULO I: Introducción.....	25
El cambio climático a nivel regional.....	25
Impacto del cambio climático sobre la viticultura	26
Estrategias de adaptación.....	29
Establecimiento del viñedo.....	29
Estrategias de producción vitícola orientadas a disminuir la temperatura de la canopia.....	32
Técnicas de manejo basadas en el uso de reguladores de crecimiento	33
Técnicas enológicas orientadas a mitigar el efecto del cambio climático en bayas	34
Técnicas vitícolas orientadas a limitar la relación fuente: destino	34
HIPÓTESIS DEL ESTUDIO	37
Hipótesis general	37
Hipótesis específicas	37
OBJETIVOS DEL ESTUDIO	38
Objetivos generales	38
Objetivos específicos	38
CAPÍTULO II: Materiales y métodos	39
Índices bioclimáticos Sitio y material vegetal	39
Diseño experimental y tratamientos	39
Análisis estadístico	42
CAPÍTULO III: Efecto de la poda tardía sobre la fenología, el crecimiento vegetativo, el consumo de agua y los componentes del rendimiento	44
Introducción.....	44
Hipótesis específicas	49
Objetivos específicos	49
Materiales y métodos	49
Datos meteorológicos.....	49

Fenología.....	49
Crecimiento vegetativo.....	50
Área foliar total y peso de poda.....	51
Índice de área foliar	52
Evapotranspiración del cultivo y datos meteorológicos.....	52
Componentes del rendimiento.....	53
Caracterización del racimo.....	53
Análisis estadístico	54
Resultados.....	54
Condiciones de la temporada de crecimiento	54
Desarrollo de la fenología y duración del ciclo	56
Crecimiento vegetativo.....	66
Coeficiente de cultivo (Kc) y evapotranspiración (ETc).....	73
Componentes de rendimiento.....	78
Caracterización del racimo.....	83
Discusión.....	85
La poda tardía retrasa las primeras etapas fenológicas	85
Efectos de la poda tardía sobre la acumulación de azúcar y el peso de las bayas	86
La poda tardía afecta el desarrollo del canopia y reduce el coeficiente de cultivo.....	87
La poda tardía afecta los componentes del rendimiento.....	89
CAPÍTULO IV: Efecto de la poda tardía sobre la evolución de la madurez y la composición fenólica de la baya y del vino.....	93
Introducción.....	93
Hipótesis específicas.....	98
Objetivos específicos	98
Materiales y métodos.....	98
Evolución de la madurez de la uva.....	98
Composición fenólica de la uva y del vino	99
Caracterización de trayectorias de parámetros de madurez.....	101
Composición química del vino	102
Análisis sensorial de los vinos	103
Análisis estadístico	103
Resultados.....	104
Madurez de la baya.....	104
Composición fenólica.....	118
Composición del vino.....	126

Discusión	138
La poda tardía afecta la composición química y fenólica de la baya.....	139
La poda tardía afecta la composición química y fenólica del vino.....	141
CAPÍTULO V: Conclusiones.....	144
Hipótesis específica 1 - Capítulo III	144
Hipótesis específica 2 - Capítulo III	144
Hipótesis específica 3 - Capítulo III	144
Hipótesis específica 4 - Capítulo IV	145
CONSIDERACIONES PRÁCTICAS	146
BIBLIOGRAFÍA.....	148
ANEXOS.....	167
Anexo I: Caracterización agrometeorológica de la época de madurez de baya.....	167
Anexo II: Evolución de la madurez de la baya respecto a los grados días acumulados.....	168
Anexo III: Evolución de los fenoles de la beaya	173

Lista de tablas

Tabla 1. Resumen de las principales determinaciones realizadas durante las tres temporadas del ensayo.

Tabla 2. Tabla adaptada de Poni et al. (2022). Síntesis de la información de trabajos de investigación sobre el impacto de las estrategias de poda tardía en el crecimiento, el rendimiento y la acumulación de sólidos solubles en vid.

Tabla 3. Valores de F de comparando los ajustes de los sólidos solubles respecto a la fecha de muestro. El análisis estadístico se realizó para comparar las fechas de poda sobre la acumulación de sólidos solubles.

Tabla 4. Valores de F de comparando los ajustes de los sólidos solubles respecto a la fecha de comienzo de acumulación y la temperatura acumulada desde ese momento. El análisis estadístico se realizó para comparar las fechas de poda sobre la acumulación de sólidos solubles.

Tabla 5. Parámetros de las curvas ajustadas de la Figura 8 A y C, que describen la acumulación de azúcar para las temporadas 2017-18 y 2018-19 para las plantas podadas en invierno, brotación, 2-3 hojas y 8 hojas. La diferencia significativa entre los tratamientos se indica con letras diferentes ($P < 0.05$ por la prueba de Fisher).

Tabla 6. Duración del ciclo (días), grados día de crecimiento acumulados (GD), grados día diario (GDD, °Cd d-1) para diferentes períodos fenológicos y para toda la temporada para plantas Malbec podadas durante el invierno (PI), en brotación (Br), con 2-3 hojas (2-3H) y con 8 hojas expandidas (8H). 2018-2019 y 2020, Mendoza.

Tabla 7. Área foliar total, primaria, secundaria y peso de poda en plantas de Malbec podadas durante el invierno (PI), en brotación (Br), con 2-3 hojas (2-3H) y con 8 hojas expandidas (8H), en dos temporadas del experimento. En la misma columna, letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos o temporada ($P < 0.05$ por la prueba de Fisher).

Tabla 8. Valores de F de comparando los ajustes del coeficiente del cultivo (Kc) respecto al tiempo térmico (°Cd). El análisis estadístico se realizó para comparar las fechas de poda según la evolución de Kc respecto al tiempo térmico.

Tabla 9. Parámetros de la evolución del coeficiente del cultivo (Kc) respecto al tiempo térmico (°Cd) de la Figura 15 para las temporadas 2017-18 y 2018-19 para las plantas

podadas en invierno, brotación, 2-3 hojas y 8 hojas. La diferencia significativa entre los tratamientos se indica con letras diferentes ($P < 0,05$ por la prueba de Fisher).

Tabla 10. Rendimiento, racimos por planta, peso del racimo, bayas por racimo y peso de la baya para plantas de Malbec podadas durante el invierno (PI), en brotación (Br), con 2-3 hojas (2-3H) y con 8 hojas expandidas (8H) para las tres temporadas del experimento. Dentro de cada columna, letras diferentes indican diferencias significativa entre los tratamientos o temporadas ($P < 0.05$ prueba de Fisher).

Tabla 11 Eficiencia en el uso de agua, expresada en quintales por m^3 de agua aplicada para cada fecha de poda en las temporadas 2017-18 y 2018-19.

Tabla 12. Distribución (%) de los diámetros de bayas de los racimos maduros de cada fecha de poda, para las temporadas 2017-18 y 2018-19. El sombreado gris indica el diámetro modal para cada tratamiento.

Tabla 13. Bayas por racimo (N), longitud de raquis (cm) y compacidad de racimo (bayas/cm de raquis) para cada fecha de poda en las temporadas 2017-18 y 2018-19.

Tabla 14. Tabla adaptada de Poni et al. (2022). Síntesis de la información de trabajos de investigación sobre el impacto de las estrategias de poda tardía en calidad de la baya y del vino.

Tabla 15. Valores de F de comparando los ajustes de los sólidos solubles respecto a los días desde el comienzo del envero y a la acumulación de temperatura. El análisis estadístico se realizó para comparar las fechas de poda sobre la acumulación de sólidos solubles.

Tabla 16. Valores de F de comparando los ajustes del peso de la baya respecto a los días desde el comienzo del envero y a la acumulación de temperatura. El análisis estadístico se realizó para comparar las fechas de poda sobre la evolución del peso de baya.

Tabla 17. Parámetros de las curvas sigmoides de la Figura 27 A y C que describe la evolución del peso de baya para las temporadas 2017-18 y 2018-19 para las plantas podadas en invierno, brotación, 2-3 hojas y 8 hojas. La diferencia significativa entre los tratamientos se indica con letras diferentes ($P < 0,05$ por la prueba de Fisher).

Tabla 18. Valores de F de comparando los ajustes de la acidez titulable respecto a la fecha de muestro, a los días desde el comienzo del envero y a la acumulación de

sólidos solubles. El análisis estadístico se realizó para comparar las fechas de poda sobre la degradación de la acidez titulable.

Tabla 19. Parámetros de las curvas ajustadas de la Figura 25. B y E, y acidez titulable al momento de los 20 y 23 °Brix para las temporadas 2017-18 y 2018-19 para las plantas podadas en invierno, brotación, 2-3 hojas y 8 hojas. La diferencia significativa entre los tratamientos se indica con letras diferentes ($P < 0,05$ por la prueba de Fisher).

Tabla 20. Parámetros de la evolución del pH de la Figura 25. B y E, y pH al momento de los 20 y 23 °Brix para las temporadas 2017-18 y 2018-19 para las plantas podadas en invierno, brotación, 2-3 hojas y 8 hojas. La diferencia significativa entre los tratamientos se indica con letras diferentes ($P < 0.05$ por la prueba de Fisher).

Tabla 21. Parámetros de la evolución del pH respecto a la acidez titulable de la Figura 27 para las temporadas 2017-18 y 2018-19 para las plantas podadas en invierno, brotación, 2-3 hojas y 8 hojas. La diferencia significativa entre los tratamientos se indica con letras diferentes ($P < 0.05$ por la prueba de Fisher).

Tabla 22. Valores de F de comparando los ajustes del pH respecto a la acidez titulable. El análisis estadístico se realizó para comparar las fechas de poda según la evolución de pH respecto a la acidez titulable.

Tabla 23. Peso de baya (g), azúcar por baya (g/baya), acidez titulable (g/L), pH y relación de azúcares/acidez de cada fecha de poda al momento de cosecha de los años 2018, 2019 y 2020. Dentro de cada parámetro y cada temporada, letras diferentes implican diferencias estadísticas para las fechas de poda ($P < 0.05$ por la prueba de Fisher).

Tabla 24. Valores de F de comparando los ajustes del peso de hollejo respecto a los días desde el comienzo del envero. El análisis estadístico se realizó para comparar las fechas de poda según la evolución del peso de hollejo durante la madurez de la baya.

Tabla 25. Valores de F de comparando los ajustes de la concentración de los fenoles totales respecto al tiempo térmico desde el envero. El análisis estadístico se realizó para comparar las fechas de poda según la evolución de los fenoles de hollejo durante la madurez de la baya.

Tabla 26. Valores de F de comparando los ajustes de la cantidad y la concentración de los taninos totales respecto al tiempo térmico desde el envero. El análisis estadístico se realizó para comparar las fechas de poda según la evolución de los taninos de hollejo durante la madurez de la baya.

Tabla 27. Valores de F de comparando los ajustes de la concentración de las antocianinas totales respecto al tiempo térmico desde el envero. El análisis estadístico se realizó para comparar las fechas de poda según la evolución de las antocianinas de hollejo durante la madurez de la baya.

Tabla 28. Fenoles totales, taninos totales y antocianinas totales en miligramos por baya a cosecha para las distintas fechas de poda. Las cosechas corresponden a los años 2018 y 2019.

Tabla 29. Composición química de los vinos durante los años 2018 y 2019, provenientes de las plantas podadas en invierno, en brotación, con 2-3 hojas separadas y con 8 hojas separadas. Los datos se presentan para cada temporada por separado. Dentro de cada temporada, la diferencia significativa entre los tratamientos se indica con letras diferentes ($P < 0.05$ por la prueba de Fisher).

Tabla 30. Pigmentos poliméricos largos (LPP), y cortos (SPP, por sus siglas en inglés) de los vinos 2018 provenientes de plantas podadas en invierno, en brotación, con 2-3 hojas separadas y con 8 hojas separadas. La diferencia significativa entre los tratamientos se indica con letras diferentes ($P < 0.05$ por la prueba de Fisher).

Tabla 31. Parámetros de color CIELAB de los vinos 2018 provenientes de plantas podadas en invierno, en brotación, con 2-3 hojas separadas y con 8 hojas separadas. La diferencia significativa entre los tratamientos se indica con letras diferentes ($P < 0,05$ por la prueba de Fisher).

Tabla 32. Diferencia de color entre vinos de los tratamientos invernal, Br, 2-3H y 8H.

Tabla 33. Cuantificación de antocianinas individuales de vinos cv. Malbec provenientes de plantas podadas en invierno, en brotación, con 2-3 hojas y con 8 hojas ($n=4$). La diferencia significativa entre los tratamientos se indica con letras diferentes ($P < 0.05$ por la prueba de Fisher).

Tabla 34. Atributos sensoriales de vinos Malbec provenientes de plantas podadas en invierno, en brotación, con 2-3 hojas y 8 hojas visibles. Los atributos fueron descriptos por un panel entrenado ($n=13$).

Tabla S1. Valores de F de comparando los ajustes del azúcar por baya respecto a los días desde el comienzo del envero y a la acumulación de temperatura. El análisis estadístico se realizó para comparar las fechas de poda sobre la evolución del azúcar por baya.

Tabla S2. Valores de F de comparando los ajustes de la concentración de los fenoles totales respecto al tiempo térmico desde el envero. El análisis estadístico se realizó para comparar las fechas de poda según la evolución de los fenoles de hollejo durante la madurez de la baya.

Tabla S3. Valores de F de comparando los ajustes de la cantidad y la concentración de los taninos totales respecto al tiempo térmico desde el envero. El análisis estadístico se realizó para comparar las fechas de poda según la evolución de los taninos de hollejo durante la madurez de la baya.

Tabla S4. Valores de F de comparando los ajustes de la concentración de las antocianinas totales respecto al tiempo térmico desde el envero. El análisis estadístico se realizó para comparar las fechas de poda según la evolución de las antocianinas de hollejo durante la madurez de la baya.

Lista de figuras

Figura 1. Diagrama esquemático de la parcela de Malbec donde se instaló el experimento. Cada unidad experimental o parcela estuvo conformada por 15 plantas dispuestas en 3 hileras consecutivas. Las 5 plantas de la hilera del centro correspondieron a la unidad observacional de cada repetición (4 tratamientos x 4 repeticiones= 16 parcelas).

Figura 2. Estadio de yema invernal (A, E-L 1), brotación (B, E-L 4), 2-3 hojas separadas y brotes de 2-4 cm de longitud (C, E-L 9), 8 hojas separadas (D, E-L 15) de las plantas control. Cada estadio determinó el momento de aplicación de cada tratamiento: poda invernal, en brotación (Br), con 2-3 hojas (2-3H) y con 8 hojas (8H).

Figura 3. Diagrama esquemático de la aplicación de los tratamientos sobre las plantas, con la fecha de aplicación para cada temporada. Los mismos tratamientos se aplicaron sobre las mismas plantas, por tres temporadas consecutivas.

Figura 4. Esquema que muestra las dos posiciones de los nudos dentro de un mismo pitón.

Figura 5. Evolución durante las tres temporadas del experimento de la temperatura media diaria (.....), temperatura máxima diaria (—), temperatura mínima diaria (---), grados día acumulados (—) y precipitación (—). Mendoza, Luján de Cuyo.

Figura 6. Día de ocurrencia de las diferentes etapas fonológicas desde la brotación hasta la cosecha en plantas de Malbec con poda invernal (PI, ●), podadas en brotación (Br, ●), con 2-3 hojas (2-3H, ●) y con 8 hojas separadas (8H, ●), para las temporadas 2017-18, 2018-19 y 2019-20. Dentro de cada etapa fenológica, la diferencia significativa entre tratamientos está indicada por * ($P < 0.05$ por la prueba de Fisher). Cada valor representa la media de 4 repeticiones, de 5 plantas cada una, proveniente del promedio de las tres temporadas del experimento.

Figura 7. Progresión de sólidos solubles totales ($^{\circ}$ Brix) de plantas de Malbec podadas en invierno (PI, ●), en brotación (Br, ●), con 2-3 hojas (2-3H, ●) y con 8 hojas desenvueltas (8H, ●) a partir del 1 de enero durante las temporadas 2017-18 y 2018-19. Los valores son medias \pm error estándar. El ▼ indica el comienzo del envero para cada tratamiento.

Figura 8. Regresiones entre sólidos solubles y días transcurridos desde el comienzo de acumulación (A y C) y regresiones entre sólidos solubles y grados día acumulados desde ese momento (B y D) para las temporadas 2017-18 (A y B) y 2018-19 (C y D).

Los valores son medias de 4 repeticiones \pm error estándar de cada fecha de muestreo. Las líneas suavizadas corresponden a las curvas ajustadas para plantas de Malbec podadas en invierno (PI, ●), en brotación (Br, ●), con 2-3 hojas (2-3H, ●) y con 8 hojas desenvueltas (8H, ●). Los gráficos de barra representan los grados día acumulados desde el inicio de acumulación de sólidos solubles y los 23 °Brix.

Figura 9. Regresiones entre la máxima pendiente (A) y la duración de la acumulación de Sólidos solubles (i.e. de 10 a 23°Brix) (B) respecto a la relación de área foliar y rendimiento y regresión entre la duración de la madurez y la pendiente (C), para las temporadas 2017-18 (●) y 2018-19 (■). Los valores son medias de 4 repeticiones. Las líneas suavizadas corresponden a las curvas ajustadas para plantas de Malbec podadas en invierno (PI, ●), en brotación (Br, ●), con 2-3 hojas (2-3H, ●) y con 8 hojas desenvueltas (8H, ●).

Figura 10. Longitud de brotes (cm) de plantas podadas en invierno (PI, ●), en brotación (Br, ●), con 2-3 hojas (2-3H, ●) y con 8 hojas desenvueltas (8H, ●), durante las temporadas 2017-18 y 2018-19 (desde el 1 de octubre). Cada punto representa la media \pm error estándar.

Figura 11. Número de hojas (N) de plantas podadas en invierno (PI, ●), en brotación (Br, ●), con 2-3 hojas (2-3H, ●) y con 8 hojas desenvueltas (8H, ●), durante las temporadas 2017-18 y 2018-19 (desde el 1 de octubre). Cada punto representa la media \pm error estándar.

Figura 12. Longitud de brotes (cm) de plantas podadas en invierno (●), en brotación (●), con 2-3 hojas (●) y con 8 hojas desenvueltas (●), durante las temporadas 2017-18 y 2018-19 (desde el 1 de octubre), respecto a los grados día acumulados(°Cd) para cada tratamiento. Cada punto representa la media \pm error estándar.

Figura 13. Número de hojas de plantas podadas en invierno (●), en brotación (●), con 2-3 hojas (●) y con 8 hojas desenvueltas (●), durante las temporadas 2017-18 y 2018-19 (desde el 1 de octubre), respecto a los grados día acumulados (°Cd) para cada tratamiento. Cada punto representa la media \pm error estándar.

Figura 14. Evolución de la longitud de los brotes (●) y del número de hojas (▲) en función de los grados-día (°Cd) desde brotación durante las temporadas 2017-18 (símbolos vacíos) y 2018-19 (símbolos rellenos) en plantas de Malbec podadas en invierno, en brotación, con 2-3 hojas separadas y con 8 hojas separadas. Cada punto representa la media \pm error estándar. La regresión ajustada para cada tratamiento y

cada año corresponde a la ecuación obtenida con los valores de efectos fijos de cada modelo.

Figura 15. Evolución del índice de área foliar desde el 1 de octubre a cosecha (A) y evolución del índice de área foliar respecto a los grados días acumulados ($^{\circ}\text{Cd}$) desde brotación para la temporada 2017-18 (B) en plantas de Malbec podadas en invierno (●), en brotación (●), con 2-3 hojas (●) y con 8 hojas desenvueltas (●). Cada punto representa la media \pm error estándar. Las líneas suavizadas corresponden a la regresión de dos tramos con “plateau” ajustada para cada tratamiento.

Figura 16. Evolución estacional del coeficiente de cultivo desde la brotación hasta mediados de febrero durante las temporadas 2017-18 (A) y 2018-19 (B). Los valores son medias de 4 repeticiones \pm error estándar.

Figura 17. Evolución del coeficiente de cultivo desde la brotación hasta mediados de febrero durante las temporadas 2017-18 (A) y 2018-19 (B), respecto a los grados día acumulados ($^{\circ}\text{Cd}$). Las líneas representan la evolución modelada de dos tramos con “plateau” correspondiente al valor máximo. Los valores son medias de 4 repeticiones \pm error estándar.

Figura 18. Evolución del coeficiente de cultivo para cada tratamiento desde la brotación hasta mediados de febrero durante las temporadas 2017-18 (▲) y 2018-19 (■), respecto al tiempo térmico desde brotación. Las líneas representan la evolución modelada de dos tramos con “plateau”, correspondiente al valor máximo. Los valores son medias de 4 repeticiones \pm error estándar. Los gráficos de barra representan la diferencia de GD para llegar al máximo valor de Kc de una temporada a la otra.

Figura 19. Regresión entre el coeficiente de cultivo estimado y el Índice de área foliar. La línea gruesa representa la ecuación de grado dos ajustada para el modelo.

Figura 20. Evapotranspiración acumulada modelada con regresión logarítmica para las temporadas 2017-18 (C) y 2018-19 (D). Los inset representan la evapotranspiración acumulada real para los primeros 40 días desde el 1 de octubre.

Figura 21. Relación entre el rendimiento por planta y el peso seco del tejido foliar removido con la poda tardía para las temporadas 2017-18 (▲), 2018-19 (●) y 2018-19 (■). La línea suavizada corresponde a la regresión ajustada para todos los datos. El gráfico de barras representa la media y su error estándar del tejido foliar removido con las podas tardías a lo largo de las tres temporadas.

Figura 22. Promedio de racimos por brote (A) y promedio de racimos por brotes provenientes de los nudos apical y basal del pitón (B) para las distintas fechas de poda en las temporadas 2017-18 y 2018-19. Los valores corresponden al promedio 96 y 72 yemas de 4 repeticiones por tratamiento el primer y segundo año, respectivamente.

Figura 23. Flores por inflorescencia (A) y peso de las caliptras (C) para cada fecha de poda, para las temporadas 2017-18 y 2018-19. Estos mismos parámetros se encuentran en los paneles B y D discriminados por brotes que provienen del nudo apical y del nudo basal del pitón.

Figura 24. Porcentaje de cuaje de los racimos (A) y relación del porcentaje de cuaje con las flores por inflorescencia (B) y con peso de las caliptras (C) para cada fecha de poda, para las temporadas 2017-18 (▲) y 2018-19 (●). Cada punto de los gráficos B y C representa la media de la unidad experimental \pm error estándar. Las líneas suavizadas corresponden a la regresión ajustada para todos los datos. Los gráficos de barra representan los residuos de las regresiones (media + error estándar), comparando las 4 fechas de poda durante ambas temporadas.

Figura 25. Esquema que resume la extracción de fenoles de los hollejos de las bayas. Los cuadros centrales resumen el producto de cada paso, partiendo del muestreo de 50 bayas por parcela y hasta llegar a la solución fenólica concentrada. Se muestra el instrumental (recuadros celestes) y el procedimiento necesario (columna izquierda) necesarios para cada paso.

Figura 26. Evolución de la concentración de los sólidos solubles respecto a los días (A y C) y al tiempo térmico (B y D) desde el envero hasta la cosecha para las temporadas 2017-18 (paneles de arriba) y 2018-19 (paneles de abajo) para plantas de Malbec podadas durante el invierno (PI, ●), en brotación (Br, ●), con 2-3 hojas (2-3H, ●) y con 8 hojas expandidas (8H, ●). Los puntos representan la media de 4 repeticiones \pm error estándar de cada fecha de muestreo.

Figura 27. Evolución del peso de baya respecto a los días (A y C) y al tiempo térmico (B y D) desde el envero hasta la cosecha para las temporadas 2017-18 (paneles de arriba) y 2018-19 (paneles de abajo) para plantas de Malbec podadas durante el invierno (PI, ●), en brotación (Br, ●), con 2-3 hojas (2-3H, ●) y con 8 hojas expandidas (8H, ●). Los puntos representan la media de 4 repeticiones \pm error estándar de cada fecha de muestreo.

Figura 28. Progresión de acidez titulable (g/L) durante las temporadas 2017-18 (paneles superiores) y 2018-19 (paneles inferiores). La evolución de la acidez se proyecta respecto a la fecha de muestreo, los días desde el comienzo del envero y a los sólidos solubles ($^{\circ}$ Brix). Las líneas suavizadas corresponden a los modelos ajustados de grado dos. Los valores son medias de 4 unidades experimentales \pm error estándar.

Figura 29. Progresión de pH durante las temporadas 2017-18 (paneles superiores) y 2018-19 (paneles inferiores). La evolución de la acidez se proyecta respecto a la fecha de muestreo, a los días transcurridos desde el comienzo del envero y a los sólidos solubles ($^{\circ}$ Brix). Los valores son medias de 4 unidades experimentales \pm error estándar.

Figura 30. Variación pH respecto a la acidez total de las bayas durante las temporadas 2017-18 (A) y 2018-19 (B). Las líneas suavizadas corresponden a las regresiones no lineales ajustadas. Los valores corresponden a los de las bayas de cada unidad experimental a lo largo de la madurez.

Figura 31. Evolución de la concentración del peso de hollejos respecto a los días del año (A y C) y a los días desde el envero, con sus correspondientes ecuaciones ajustadas (B y D) para 2017-18 y 2018-19, registrada para las distintas fechas de poda durante la madurez de la baya. Los valores son promedios \pm error estándar de $n=4$ unidades experimentales.

Figura 32. Peso de hollejos (g) de 20 bayas del diámetro modal de las temporadas 2017-18 (\bullet) y 2018-19 (\blacksquare) para las distintas fechas de poda. El * implica diferencia estadística por la prueba de Fisher $p<0.05$.

Figura 33. Evolución de la concentración de fenoles (mg/g hollejo) en 2017-18 (A) y 2018-19 (B) registradas para las distintas fechas de poda durante la madurez de la baya. Los valores son promedios \pm error estándar de 4 repeticiones por tratamiento, 20 bayas por unidad experimental.

Figura 34. Evolución de la concentración de fenoles (mg/g hollejo) en 2017-18 (A) y 2018-19 (B) registradas para las distintas fechas de poda respecto al tiempo térmico ($^{\circ}$ Cd) por cada tratamiento durante la madurez de la baya. Los valores son promedios \pm error estándar de 4 repeticiones por tratamiento. Las líneas suavizadas representan las ecuaciones ajustadas del modelo.

Figura 35. Evolución de la concentración de taninos (mg/g hollejo) en 2017-18 (A) y 2018-19 (B), registradas para las distintas fechas de poda durante la madurez de la baya. Los valores son promedios \pm error estándar de 4 repeticiones por tratamiento.

Figura 36. Evolución de la concentración de taninos (mg/g hollejo) en 2017-18 (A) y 2018-19 (B) registradas para las distintas fechas de poda respecto al tiempo térmico ($^{\circ}\text{Cd}$) por cada tratamiento durante la madurez de la baya. Los valores son promedios \pm error estándar de 4 repeticiones por tratamiento. Las líneas suavizadas representan las ecuaciones ajustadas del modelo.

Figura 37. Evolución de la concentración de antocianinas (mg/g hollejo) en 2017-18 (A) y 2018-19 (B) registradas para las distintas fechas de poda durante la madurez de la baya. Los valores son promedios \pm error estándar de 4 repeticiones por tratamiento.

Figura 38. Evolución de la concentración de antocianinas (mg/g hollejo) en 2017-18 (A) y 2018-19 (B) registrada para las distintas fechas de poda respecto a los GD acumulados por cada tratamiento durante la madurez de la baya. Los valores son promedios \pm error estándar de 4 repeticiones por tratamiento. Las líneas suavizadas representan las ecuaciones ajustadas del modelo.

Figura 39. Relación de la concentración de antocianinas (mg/g hollejo) y antocianinas por baya (mg/baya) respecto a los sólidos solubles en su fase lineal. Los gráficos de barra representan los residuos de las regresiones (media + error estándar), comparando las 4 fechas de poda durante 2017-18 (\bullet) y 2018-19 (\blacktriangle). Los valores son promedios \pm error estándar de 4 repeticiones por tratamiento. Las líneas suavizadas representan las ecuaciones ajustadas del modelo.

Figura 40. Parámetros fenólicos globales de los vinos para las temporadas 2017-18 (paneles izquierdos) y 2018-19 (paneles derechos) registrados para las distintas fechas de poda. Los valores son promedios \pm error estándar de $n=4$ vinos por tratamiento.

Figura 41. Coordenadas de los vinos obtenidos a partir de las fechas de poda invernal, brotación, 2-3H y 8H en el espacio CIELAB (plano a^*b^*).

Figura 42. Cuantificación de antocianinas totales (A) y caracterización del perfil antociánico de vinos Malbec provenientes de plantas podadas en invierno (PI), brotación (Br), 2-3 hojas (2-3H) y 8 hojas visibles (8H). En la figura se muestra la cuantificación de antocianinas no acetiladas (B), acetiladas (C) y cumariladas (D).

Figura 43. Análisis de componentes principales de vinos Malbec provenientes de plantas podadas en invierno, en brotación, con 2-3 hojas y 8 hojas visibles (2018), con respecto a atributos sensoriales evaluados. Los puntos azules corresponden a las medias de fecha de poda.

Figura S1. Progresión durante las tres temporadas del experimento de la temperatura media diaria (●), temperatura máxima diaria (●), temperatura mínima diaria (●), la humedad relativa media (▲) y el déficit de presión de vapor. Cada punto representa el promedio de 7 días, desde la última semana de diciembre hasta la última semana de febrero. Los valores son medias \pm error estándar.

Figura S2. Progresión de sólidos solubles totales ($^{\circ}$ Brix), peso de baya (g) y azúcar por baya (g) respecto a los grados día acumulados desde envero durante la temporada 2017-18. Los valores son medias \pm error estándar. La línea gris vertical corresponde al momento en el que se alcanza el peso máximo de baya para cada tratamiento.

Figura S3. Progresión de sólidos solubles totales ($^{\circ}$ Brix), peso de baya (g) y azúcar por baya (g) respecto a los grados día acumulados desde envero durante la temporada 2018-19. Los valores son medias \pm error estándar. La línea gris vertical corresponde al momento en el que se alcanza el peso máximo de baya para cada tratamiento.

Figura S4. Evolución del azúcar por baya respecto a los días (A y C) y al tiempo térmico (B y D) desde el envero hasta la cosecha para las temporadas 2017-18 (paneles de arriba) y 2018-19 (paneles de abajo) para plantas de Malbec podadas durante el invierno (PI, ●), en brotación (Br, ●), con 2-3 hojas (2-3H, ●) y con 8 hojas expandidas (8H, ●). Los puntos representan la media de 4 repeticiones \pm error estándar de cada fecha de muestreo.

Figura S5. Regresiones entre azúcar por baya y grados día para la fase de carga rápida de azúcar (desde comienzo del envero hasta el peso máximo de baya) para las temporadas 2017-18 y 2018-19. Los valores son medias de 4 repeticiones \pm error estándar de cada fecha de muestra.

Figura S6 Evolución de la cantidad de fenoles (mg/baya) en 2017-18 (A) y 2018-19 (B) registradas para las distintas fechas de poda durante la madurez de la baya. Los valores son promedios \pm error estándar de 4 repeticiones por tratamiento, 20 bayas por unidad experimental.

Figura S7. Evolución de la cantidad de fenoles (mg/) en 2017-18 (A) y 2018-19 (B) registradas para las distintas fechas de poda respecto al tiempo térmico ($^{\circ}\text{Cd}$) por cada tratamiento durante la madurez de la baya. Los valores son promedios \pm error estándar de 4 repeticiones por tratamiento. Las líneas suavizadas representan las ecuaciones ajustadas del modelo.

Figura S7. Evolución de la cantidad de taninos (mg/baya) en 2017-18 (A) y 2018-19 (B), registradas para las distintas fechas de poda durante la madurez de la baya. Los valores son promedios \pm error estándar de 4 repeticiones por tratamiento.

Figura S8. Evolución de la cantidad de taninos (mg/baya) en 2017-18 (A) y 2018-19 (B) registradas para las distintas fechas de poda respecto al tiempo térmico ($^{\circ}\text{Cd}$) por cada tratamiento durante la madurez de la baya. Los valores son promedios \pm error estándar de 4 repeticiones por tratamiento. Las líneas suavizadas representan las ecuaciones ajustadas del modelo.

Figura S9. Evolución de la cantidad de antocianinas (mg/baya) en 2017-18 (A) y 2018-19 (B) registrada para las distintas fechas de poda durante la madurez de la baya. Los valores son promedios \pm error estándar de 4 repeticiones por tratamiento.

Figura S10. Evolución de la cantidad de antocianinas (mg/baya) en 2017-18 (A) y 2018-19 (B) registrada para las distintas fechas de poda respecto a los GD acumulados por cada tratamiento durante la madurez de la baya. Los valores son promedios \pm error estándar de 4 repeticiones por tratamiento. Las líneas suavizadas representan las ecuaciones ajustadas del modelo.

Figura S11. Evolución de la concentración de antocianinas (mg/g hollejo) y de antocianinas por baya (mg/baya) en 2017-18 (paneles A y C) y 2018-19 (paneles B y D) registradas para las distintas fechas de poda respecto a los GD acumulados por cada tratamiento durante la madurez de la baya. Los valores son promedios \pm error estándar de 4 repeticiones por tratamiento. Las líneas suavizadas representan las ecuaciones ajustadas del modelo.

CAPÍTULO I: Introducción

El cambio climático a nivel regional

Las provincias de Mendoza y San Juan, donde se ubican gran parte de los oasis productivos del centro-oeste de Argentina, deben su desarrollo agrícola al aporte hídrico proveniente de la nieve que se acumula en la cordillera de los Andes en el invierno. En primavera y verano, la fusión de la nieve incrementa los caudales de los ríos, de los que dependen la agroindustria, turismo, hidroelectricidad y consumo poblacional. Por lo tanto, esta región es vulnerable a cambios en los regímenes de temperatura y/o precipitaciones, los cuales tendrán un impacto en los cultivos (Boninsegna 2014).

En esta región, ubicada al este de la cordillera de los Andes, se ha observado una tendencia al aumento de las temperaturas media y mínima de primavera y verano, particularmente a partir de la década del 70 (Boninsegna, 2014; Deis et al, 2015). Este aumento también se ha observado en la cordillera, con un consecuente cambio en el régimen hídrico de los ríos. Las elevadas temperaturas primaverales producen una fusión temprana de la nieve, un adelanto en el tiempo del pico de escorrentía de los ríos y cambios en sus caudales que pueden ocasionar una menor disponibilidad de agua para riego a fines de verano (Boninsegna, 2014; Villalba, 2007). Además de la alteración hidrológica, se ha observado una reducción general en sus caudales desde 1950, con algunos períodos temporales de recuperación (Boninsegna, 2014).

El uso reciente de modelos locales de circulación permite aumentar la resolución y la precisión de las estimaciones para zonas de gran variabilidad espacial como las cordilleras (Boninsegna, 2014). Estos modelos toman en cuenta diferentes escenarios que consideran acciones de mitigación y sus consecuencias sobre las emisiones de gases de efecto invernadero y el calentamiento asociado. Debido a la variabilidad que presentan estas proyecciones, algunos índices pueden ser estimados con mayor confianza que otros. La temperatura y la precipitación en escala regional y estacional pueden ser estimadas con un grado de confianza medio a alto (CIMA, 2015; Hulme y Sheard, 1999). Tomando un modelo local (Cabré et al, 2016) y un escenario moderadamente pesimista (escenario A2), se proyecta para fines de este siglo en la zona de Mendoza y San Juan un aumento en la temperatura media anual de entre 1.5 y 4 °C, con mayor incremento en zonas de cordillera que en los valles (Cabré y Nuñez, 2020; Cabré et al, 2016). Una consecuencia de este calentamiento podría ser una reducción de alrededor del 50% en el área de la cuenca cordillerana con nieve

permanente. Esta variación tendría mayor impacto en las cuencas del sur de Mendoza debido a su menor altura (Boninsegna, 2014).

En los próximos 70 años las precipitaciones de verano aumentarían considerablemente en el llano y el piedemonte de Mendoza y San Juan y se reducirían en la Cordillera. Estas simulaciones son consistentes con las tendencias observadas durante el siglo XXI y representan un estrés adicional para esta región (Hulme y Sheard, 1999; Villalba, 2007). No obstante, otros estudios estiman variaciones en las precipitaciones del orden del 10% que podrían no ser significativas y serían ocasionadas por la variabilidad propia de este factor (CIMA, 2015).

Impacto del cambio climático sobre la viticultura

La vid (*Vitis vinifera* L.) es el cultivo frutal más importante a nivel global, con alrededor de 7 millones de ha cultivadas (OIV, 2021). Presenta una gran diversidad genética, con más de 5000 variedades conocidas (Wolkovich et al. 2018). Su producción y su calidad están determinadas por fuertes interacciones entre factores genéticos, climáticos y edáficos como así también con las prácticas humanas y la cultura de cada región. Esto convierte a la viticultura en una cadena de interés para evaluar los impactos del cambio climático, por la variabilidad de escenarios donde se cultiva y por el posible desarrollo de estrategias de mitigación y adaptación en el corto, mediano y largo plazo (Wolkovich et al., 2018). Los cambios observados en su ciclo fenológico en diferentes regiones son indicadores del cambio climático (Cabré et al., 2016; Mosedale et al., 2016). Por este motivo, la viticultura ha sido objeto de estudio para los cambios climáticos históricos y contemporáneos (Mosedale et al., 2016). En Argentina, la vid también es el cultivo frutal más importante, abarcando 214798 ha que representan el 38% de la superficie cultivada con frutales (Sanchez, 2020). El 91.5% de esta superficie se concentra en Mendoza (con 151233 ha) y San Juan (con 44923 ha) (Instituto Nacional de Vitivinicultura, 2020).

El aumento de temperatura puede ser perjudicial para algunas zonas y beneficioso para otras. De manera general, tomando datos de distintas estaciones meteorológicas de nuestro país, se ha observado que el Índice de Winkler ha aumentado entre 1970 y 2001 (Quénol et al. 2015; Deis et al. 2015). El cambio en la temperatura para ese período ha sido mayor en algunas zonas de la Patagonia, donde se observa un aumento de las temperaturas mínimas y máximas, tanto del invierno como del verano (Rusticucci y Barrucand 2004; Quénol et al. 2015). En la misma línea, Jones y Schultz (2016) señalan un aumento de 0.7 °C en la temperatura media durante la estación de crecimiento en Río Negro para el período 1952-2015. Esto podría beneficiar ciertas

zonas del sur que actualmente no son aptas para el cultivo de la vid y que en un futuro podrían ser cultivadas, en particular aquellas con noches frías durante la maduración (Quénot et al. 2015). El calentamiento medio de 1.5 a 4 °C proyectado para las zonas de los oasis cultivados de Mendoza y San Juan, podría implicar una mayor demanda hídrica del cultivo, un adelanto en el ciclo fenológico con una mayor exposición a heladas primaverales y cambios en la composición de la uva que podrían afectar negativamente su calidad para vinificar (Mira de Orduña, 2010; Petrie y Sadras, 2008; Sadok et al., 2021). Sin embargo, zonas próximas a la cordillera y a mayor altitud (al oeste de Mendoza y San Juan y valles cordilleranos de otras provincias, como La Rioja y Catamarca), o zonas actualmente demasiado frías para el cultivo de la vid, podrían verse beneficiadas, permitiéndose el cultivo de mayor diversidad de variedades, tanto actuales como nuevas. Por el contrario, y tal como se señaló anteriormente, los modelos climáticos indican que las áreas actualmente cálidas pueden evolucionar hacia condiciones climáticas más desfavorables poniendo en riesgo su sostenibilidad en el largo plazo (Mosedale et al., 2016; Santillán et al., 2019). Acorde a esta tendencia, la viticultura se ha desplazado estos últimos años de los márgenes que tradicionalmente se consideraban óptimos para la especie (entre 4-51° latitud N y 6-44° latitud S). Actualmente se encuentran viñedos en el paralelo 57° en Suecia y Dinamarca y hacia el Sur, en el paralelo 45° tanto en Argentina como en Nueva Zelanda (Jones y Schultz 2016).

Otro de los aspectos a considerar es el cambio en las precipitaciones, tanto en su magnitud como en la distribución estacional. Pese a los resultados variables que hay en torno a las proyecciones, la disminución de las precipitaciones nibeas a nivel local perjudicará el cultivo de la vid ya que habrá menos agua disponible para la agricultura y para las demás actividades humanas. Esto podría ocasionar un estrés hídrico en el cultivo que, si no es controlado en el tiempo o moderado en su intensidad, puede afectar el rendimiento, la calidad y la sostenibilidad del viñedo (Chaves et al., 2010; Flexas et al., 2010; Medrano et al., 2015). Por otro lado, un cambio en el régimen espacial de las precipitaciones, con mayor ocurrencia de lluvias en el llano, generará una menor capacidad de control del estado hídrico de los viñedos por medio del riego que también podría impactar en los rendimientos y la calidad. Por lo tanto, es prioritario en zonas vulnerables como Mendoza o San Juan un aumento en la eficiencia en el uso del agua y en su distribución tanto a nivel de oasis o cuenca, como de cultivo. Un aumento en la eficiencia en el uso del agua puede tener un elevado impacto positivo a nivel regional, debido a la gran área que ocupan los viñedos y al volumen de agua que se les destina. En cuanto a la variación estacional, el incremento

de precipitaciones estivales afectaría la producción de uva al favorecer el desarrollo de enfermedades criptogámicas y comprometer el rendimiento y la calidad de la uva.

Mientras que las proyecciones en cuanto a temperatura son más consistentes a nivel global, indicando un aumento, las proyecciones de precipitaciones difieren mucho más entre distintas regiones y es muy difícil proponer generalizaciones. Además, la enorme variabilidad espacial e interanual observada puede enmascarar las tendencias a largo plazo (Schultz y Hoffman, 2014). En el mismo sentido, si bien se asume que el cambio climático generará un aumento de la evapotranspiración, existen pocos estudios y antecedentes que lo confirmen. La evapotranspiración está determinada por la temperatura y por otras variables como la radiación, la velocidad del viento, o la humedad relativa cuya variación a futuro es menos clara. Algunos antecedentes han mostrado que la evapotranspiración ha aumentado en algunas zonas y en otras no (como Napa en USA) a pesar de la disminución de las precipitaciones (Schultz 2019). Esto puede estar relacionado a cambios en los niveles de radiación e intensidad del viento. En el mismo estudio se observa que en zonas vitícolas secas como Napa (USA) y Adelaide Hills (Australia), se han observado más cambios en las precipitaciones que en la evapotranspiración mientras que zonas húmedas como Burgundy (Francia) o Geisenheim (Alemania), se han observado más cambios en la evapotranspiración que en las precipitaciones. Por el contrario, otro trabajo reciente en Australia ha puesto en evidencia un aumento de la evapotranspiración desde 1970, tendencia que se acentuaría en el futuro (Phogat et al. 2020). Asimismo, las necesidades de riego calculadas por los mismos autores indican un aumento entre el 3.5 y el 5.8% en el futuro próximo (simulado para el período 2018-2050) respecto al histórico. Es notorio que este aumento en cuanto a mayor necesidad de riego es mayor (alrededor del 18%) al comienzo del ciclo, en los meses de octubre y noviembre mientras que en los meses desde enero hasta cosecha se observan pocos cambios (Phogat et al. 2020). Esto es importante ya que el mayor incremento no se daría en los meses de mayor demanda, en pleno verano. En cuanto a las necesidades de riego, es indispensable a nivel local (i) evaluar las tendencias y evolución de ET_0 a través de registros históricos en distintas zonas y proyectar a futuro su posible evolución, (ii) determinar las necesidades de riego para distintas regiones vitícolas (incluyendo su clima, suelo, manejo y destino de su producción) y, (iii) evaluar a nivel regional la capacidad y la eficiencia de la infraestructura instalada en las principales zonas vitícolas para abastecer la demanda a futuro.

Estrategias de adaptación

La producción de vid tiene como objetivo lograr el máximo rendimiento de uva para un determinado tipo de vino. El ambiente influye directamente no sólo en estos dos atributos, sino también en los costos de producción. La elección del cultivar y portainjerto, el sitio de plantación, las prácticas culturales y el estilo de vinificación son algunos de los factores que se deben tener en cuenta a la hora de manejar la relación entre rendimiento y calidad (Van Leeuwen et al., 2019).

En un contexto de cambio climático, marcado por el aumento de la temperatura y por años más secos, es necesario tomar decisiones para mantener producciones sostenibles en cuanto a cantidad y calidad. En este sentido, la adaptación al cambio climático implica un conjunto de acciones que deberían realizarse para limitar los impactos negativos (Naulleau et al. 2021). Es por ello que una mayor comprensión de los efectos de un aumento de temperatura sobre la fotosíntesis, la eficiencia en el uso del agua, la madurez y la composición de la uva es fundamental para tomar las decisiones que permitan garantizar la sostenibilidad del viñedo en las condiciones pronosticadas.

Las estrategias de adaptación pueden ser de corto, mediano y largo plazo. Según Palliotti et al (2014), las estrategias de adaptación incluyen cambios (1) en el establecimiento del viñedo; (2) en el material vegetal y (3) en las técnicas culturales. Mientras que las 2 primeras son estrategias de largo plazo, las técnicas culturales son aplicables en el corto plazo sobre viñedos establecidos. Las mismas se basan en: retrasar los estadios fenológicos, alterar la relación hoja/fruto para limitar la acumulación de azúcares en la baya (Gutierrez-Gamboa et al. 2021a) o disminuir la temperatura de la canopia (Sadras y Morán 2012a). Es importante remarcar que para que las estrategias de adaptación sean adoptadas, en primer lugar, deben ser aplicables y aceptadas por los productores; y en segundo, deben tener en cuenta el producto final y su aceptación por parte de los consumidores (Naulleau et al. 2021). Por lo tanto, es difícil pensar que un solo factor permitirá disminuir los efectos negativos; es necesario pensar en una serie de factores que deberán ser ajustados y puestos en sintonía para poder adaptarse a las nuevas condiciones.

Establecimiento del viñedo

(Re)Localización del viñedo. Búsqueda de nuevas zonas

La elección del sitio de implantación reviste una especial importancia en cuanto a que determina la oferta energética, la cual es necesaria para una completa maduración de

la uva (Gutiérrez-Gamboa et al., 2021a). Las zonas vitícolas del oeste del país se destacan por un relieve montañoso hacia el oeste. Considerando que la temperatura disminuye con la altitud, la variación de relieve es una oportunidad a la hora de elegir sitios de plantación. Las estadísticas de plantación muestran una relocalización de los viñedos en la provincia de Mendoza. La superficie implantada con vid en el Valle de Uco (de 900 a 1200 msnm) ha aumentado un 117% en los últimos 20 años. Al contrario, la superficie ha disminuido en el oasis Este (-5%) y Sur (-21%) en particular, en los departamentos de Maipú, San Martín y San Rafael (INV, 2020). Existe en la actualidad una búsqueda de nuevas zonas y con especial atención en la búsqueda de valles en altura para las nuevas plantaciones (por ej. Uspallata a 2039 msnm).

Material Vegetal

La vid es una especie que cuenta con mucha riqueza genotípica. En el mundo, existen entre 6000 y 10000 genotipos diferentes de *Vitis vinífera* (Wolkovich et al. 2018). Sin embargo, el mercado mundial de vinos está acotado a pocas variedades, lo que ha causado una pérdida de variedades locales o minoritarias, por ser algunas de ellas consideradas de baja calidad enológica. Aún existe un 30% de superficie cultivada con variedades criollas y las variedades tintas más cultivadas (Malbec y Bonarda) no están dentro del grupo de estas 13 variedades. Algunos esfuerzos por rescatar y valorizar variedades minoritarias se han llevado a cabo en distintos lugares del mundo estos últimos años (España, Grecia, Francia y Argentina), buscando variedades locales que se adapten al cambio climático (Aliquó et al. 2017; Bota et al. 2016).

Además, dentro de cada variedad existe cierto grado de variabilidad. Estudios en Mendoza, han observado en clones de Malbec, variabilidad en el momento del cuaje, la duración del periodo cuaje-madurez, días entre floración y envero y en componentes del rendimiento, como peso del racimo y número de bayas (van Houten et al., 2020). La selección clonal deberá estar orientada los próximos años a clones que toleren condiciones de sequía y mayor temperatura, es decir, clones que bajo estas condiciones estresantes varíen poco su rendimiento y síntesis de compuestos fenólicos.

Si bien existe una gran superficie implantada en nuestro país sin injertar, el uso de portainjertos es fundamental en situaciones donde alguna limitante biótica o abiótica lo requiere. Existen algunos trabajos de evaluación de distintos portainjertos a nivel local, tendientes a una mayor resistencia a salinidad y a sequía (Lucero et al. 2017).

Orientación de hileras

La orientación de hileras contempla cuestiones prácticas, como la forma de la parcela, la pendiente, el largo de las hileras, la dirección del viento predominante, la sistematización del riego, entre otros. En Argentina, la orientación predominante es la Norte-Sur, que permitía en el pasado una adecuada sistematización del riego por superficie y que favorece la interceptación lumínica en ambas caras de la espaldera. En un estudio realizado en EEA Mendoza sobre Malbec, las orientaciones Este-Oeste y Noroeste-Sureste (poco implementadas en la región) favorecieron la obtención de uvas y vinos con mayor concentración de compuestos fenólicos. La menor exposición de los racimos a la radiación y a la temperatura evitó la degradación de los compuestos químicos de importancia sensorial responsables del color y de atributos en boca en el vino. Independientemente de la madurez de las bayas, los vinos de las distintas orientaciones de plantación mostraron niveles similares de acidez y pH.

Sistemas de conducción

El sistema de conducción tiene como objetivo conseguir un equilibrio entre hojas y frutos y lograr un buen microclima a nivel de racimos que asegure la calidad de la uva. Pero además en el sistema de conducción pueden realizarse modificaciones para mitigar los efectos del aumento de temperatura. Estas modificaciones están relacionadas a: (i) retrasar la madurez, (ii) reducir la tasa de acumulación de azúcar, (iii) reducir la radiación en la zona de racimos y (iv) mejorar la eficiencia en el uso del agua (Santos et al. 2020). Trabajos a nivel de planta entera han demostrado que la eficiencia en el uso del agua de distintos sistemas de conducción está determinada en gran medida por la cantidad de hojas a la sombra y su relación respecto a la superficie foliar expuesta (Prieto et al. 2013).

En este sentido, la poda mínima es un sistema retrasa la madurez, disminuye los azúcares en baya, aumento de acidez y disminución del pH además de la disminución de costos (Clingeffer 2009). También se han desarrollado sistemas en los cuales la canopia se desarrolla de manera libre, como el cordón libre, boxpruning (i.e. box pruning) o el “seto con poda semi-mínima” (Semi-minimal Pruned Hedge; Intrieri et al. 2011). Este último sistema es una adaptación de la poda mínima, pero permite un mayor control de la producción. Se ha observado recientemente que genera racimos más sueltos, con menor incidencia de podredumbre (Intrieri et al. 2011). Los resultados en cuanto al atraso en la acumulación de azúcares son más variables, y parecen depender de la variedad. El cordón libre está actualmente siendo probado en Mendoza, y evaluado para determinar la relación hoja/fruto más adecuada a distintas

situaciones y su impacto en el rendimiento y la composición química de la uva y vino (Ahumada et al. 2021).

Estrategias de producción vitícola orientadas a disminuir la temperatura de la canopia

Utilización de telas media sombra y/o redes

El uso de telas o redes para generar sombra sobre la canopia se ha evaluado en distintos lugares. La sombra tendría dos efectos, por un lado, disminuir la temperatura de la canopia, y por el otro, al disminuir la radiación que llega a la canopia, reducir la fotosíntesis y ralentizar la maduración. Reduciendo la radiación entre un 35 y 60% mediante tela media sombra en la zona de racimos a partir de grano pimienta, la temperatura de la baya disminuyó 4 °C lo que evitó la pérdida de acidez y de compuestos fenólicos (Lobos et al. 2015, Martínez-Lüscher et al. 2017). Algunos trabajos en curso en San Rafael, Mendoza con tela antigranizo de distintos colores y estructuras, han mostrado una mejora en el estado hídrico de las plantas bajo tela antigranizo (Nahuel, tesis doctoral en curso). En nuestra zona, el uso de tela antigranizo podría en el futuro tener algunas aplicaciones complementarias. Por ejemplo, tejidos de distinta densidad para disminuir la temperatura o el uso de telas fotoselectivas, que absorban una longitud de onda determinada (Martínez-Lüscher et al. 2017) podría generar algunos beneficios en la composición química de la uva, arquitectura hidráulica de la planta o eficiencia en el uso del agua (Gonzalez et al. 2021).

Agrivoltaismo, sistema de producción agrícola y energía solar

El agrivoltaismo es un sistema que combina la producción agrícola con la generación de energía renovable en el mismo espacio para mejorar la eficiencia de uso de los recursos. Consiste en la instalación de paneles fotovoltaicos por encima del cultivo (Proctor et al. 2021). Este sistema agrícola-energético aparece como otra estrategia alternativa para enfrentar el cambio climático y los desafíos de disponibilidad de energía en el futuro (Elamri et al. 2018) y puede ser una alternativa de diversificación para productores agrícolas (Cuppari et al. 2021, Winkler et al. 2018). Un sistema agrivoltaico modifica las condiciones ambientales para el cultivo, generalmente la temperatura ambiente al nivel del cultivo y la del suelo es menor debido a la radiación solar interceptada por los paneles (Marrou et al. 2013a) y es también menor el consumo de agua (Marrou et al. 2013b). Actualmente, en la EEA Mendoza se conduce un estudio que combina dos técnicas de mitigación al aumento de la temperatura:

paneles solares y orientación de hileras (Mariana Gomez Tournier, tesis doctoral en curso).

Aspersión de agua (enfriamiento por evaporación)

Otra técnica para disminuir la temperatura es el enfriamiento por evaporación, que consiste en la aspersión o microaspersión de agua sobre la canopia durante los momentos de mayor temperatura del día. La evaporación del agua asperjada requiere de calor latente, parte del cual proviene de los órganos vegetales, disminuyendo su temperatura. Los primeros estudios se realizaron con aspersión por encima de la canopia mientras que recientemente se ha evaluado un sistema nebulizador que rocía el interior de la canopia utilizando bajos volúmenes de agua (Caravia et al. 2017). El sistema puede encenderse cuando la temperatura excede cierto umbral preestablecido, haciendo frente de esta manera a olas de calor. Si bien no se han detectado diferencias en el contenido de sólidos solubles totales, el azúcar por baya fue mayor en las plantas tratadas debido a un aumento en la masa de la baya. La composición química y fenólica de la baya y del vino no fueron afectadas (Caravia et al., 2017).

Técnicas de manejo basadas en el uso de reguladores de crecimiento

Dentro de las revisiones bibliográficas sobre técnicas de mitigación al cambio climático, Palliotti et al. (2014) resume los principales reguladores de crecimiento utilizados por su capacidad de interactuar con el proceso de maduración y también inducir una maduración más lenta. Dentro de los reguladores más utilizados, se encuentran las auxinas, las cuales pueden retrasar el inicio de la maduración si se aplican antes del envero (Böttcher et al., 2011, Davis et al., 1997). Algunos inhibidores de hormonas también han resultado eficaces para retrasar la maduración de las bayas (Palliotti et al., 2014). Este es el caso de los inhibidores de síntesis de brasinosteroides, como el brassinazol, que ha mostrado efectividad para retrasar la maduración en Cabernet Sauvignon (Symons et al., 2006). La vid es un frutal cuyo fruto es considerado no climatérico y, como tal, no responde al etileno durante la maduración. No obstante, el etileno puede tener algunas implicaciones en la maduración cuando interactúan con el ácido abscísico (ABA), incluso en bajas concentraciones (Chervin et al. 2004, Sun et al. 2010, Moran, 2019). La pulverización luego de floración de un inhibidor específico del etileno, como el 1-metilciclopropeno (1-MCP) ha mostrado efectividad para retrasar el aumento del diámetro de la baya, así como la disminución de la acidez y la acumulación de antocianinas (Palliotti et al.,

2014, Chervin et al., 2004). Tal como dice Palliotti et al. en su revisión (2014), en una fruta no climatérica como la uva, un compuesto liberado por etileno como CEPA (ácido 2-cloroetilfosfónico) retrasó la maduración cuando se aplicó temprano en el desarrollo de la uva (Hale et al., 1970; Böttcher et al., 2013a), lo cual parece estar relacionado con la manipulación de la fecha de envero y, por lo tanto, el tiempo de cosecha en ambientes cálidos (Böttcher et al., 2013b). El Ethrel, compuesto orgánico que libera etileno induciendo procesos de maduración en frutas climatéricas. Sin embargo, Böttcher et al. (2013a, 2013b) han demostrado recientemente, a diferencia de lo que se ha encontrado en frutos climatéricos, que la aplicación de Ethrel retrasó la maduración y este resultado podría deberse a una mayor concentración de auxina en las bayas de premaduración.

Técnicas enológicas orientadas a mitigar el efecto del cambio climático en bayas

La aceleración de la maduración tecnológica por el aumento de la temperatura no siempre va acompañada de la madurez fenólica o aromática. Retrasar la cosecha conduce a una mayor concentración de azúcar y una menor acidez del mosto. Esto da como resultado vinos con mayor grado alcohólico, menor acidez y variaciones en la composición aromática y características organolépticas (Mira de Orduña 2010). Los enólogos han adoptado varias estrategias para mitigar estos efectos del cambio climático, como la dilución y el *blending*, la ósmosis inversa, la desalcoholización y el uso de levaduras menos eficientes en la transformación de azúcares en etanol (Castrillo et al., 2019).

Técnicas vitícolas orientadas a limitar la relación fuente: destino

Deshoje apical

El deshoje “apical”, consiste en la eliminación de las hojas de unos 5 ó 6 nudos justo por encima del último racimo (Palliotti et al. 2014). Esta práctica se realiza entre envero y madurez, cuando la baya tiene unos 12-15 °Brix, con el objetivo de disminuir la relación hoja/fruto y ralentizar la madurez. En esta época, las hojas de los dos tercios superiores de la canopia ya han alcanzado su máxima expansión y están lejos de su senescencia, por lo que constituyen las hojas fotosintéticamente más activas (Palliotti et al., 2014). La remoción de estas hojas alrededor del envero disminuye la relación hoja / fruto y ha demostrado ser efectiva en retrasar la madurez unas dos semanas en distintos estudios. Por otra parte, al estar lejos de la zona de los racimos,

su mecanización es fácil de realizar (Pallioti et al. 2013). Si bien es efectiva para ralentizar la acumulación de sólidos solubles y disminuir el contenido de alcohol en vinos (Caccavello et al. 2017), los resultados obtenidos con respecto a la concentración de compuestos fenólicos (y relación azúcares: antocianinas) son variables. Se ha observado que el deshoje postenvero puede disminuir (Buesa et al. 2019), aumentar (Caccavello et al. 2017) o mantener (Pallioti et al. 2013) la concentración de compuestos fenólicos. Los resultados parecen depender de la intensidad y momento del deshoje, siendo necesario evitar deshojes demasiado severos, eliminando hasta un 30% del área foliar total (Pallioti et al. 2013; Caccavello et al. 2017).

Despampanado severo

El despampanado es una técnica de manejo que se realiza comúnmente con el objetivo de permitir el paso de la maquinaria, mejorar la eficacia de tratamientos fitosanitarios y adecuar la forma de la canopia al sistema de conducción. Consiste en eliminar la porción de pámpanos por encima del último alambre y dejar unos 15-20 cm por encima del mismo. La cantidad de operaciones que se realizan depende del vigor, del sitio, etc. El despampanado severo, consiste en la eliminación de una porción mayor del pámpano, dejando entre 7 a 15 nudos por brotes. Esta técnica se ha evaluado en postcujaje (Martínez de Toda et al. 2014, Parker et al. 2016) o luego del envero cuando la baya tiene cerca de 15 °Brix (Filippetti et al. 2015, Caccavello et al. 2017). Realizada en postcujaje, esta técnica demostró ser efectiva para atrasar la acumulación de azúcar, aumentar o mantener la acidez (Parker et al. 2016) y aumentar la concentración de antocianinas (Martínez de Toda et al. 2014). Realizada en envero, puede también favorecer o mantener la composición química de la uva y reducir la concentración de sólidos solubles a cosecha (Filippetti et al. 2015, Caccavello et al. 2017).

Aplicación de antitranspirantes

La limitación de la fuente no consiste simplemente en la reducción del área foliar, sino que también se puede lograr limitando la fotosíntesis de hojas funcionales (Gutiérrez-Gamboa et al., 2021). La aplicación de antitranspirantes tiene como finalidad la inducción de un cierre estomático parcial. Por lo tanto, ha sido ampliamente usado para reducir la pérdida de agua y el estrés por calor (Gale and Poljakoff-Mayber, 1967, Pallioti et al., 2010, Pallioti et al., 2014). No obstante, el cierre estomático es un factor limitante para la fotosíntesis, por lo que se han utilizado los antitranspirantes como insumo para retrasar la madurez, al reducir la acumulación de sólidos solubles en

bayas. La aplicación post envero de antitranspirantes que forman film protectores, han demostrado ser eficientes para reducir la acumulación de SST en bayas, además de ser fácil aplicación (Di Vaio et al., 2019; Alberto Palliotti et al., 2013) . Al mismo tiempo, este método no tuvo ningún otro impacto negativo sobre los compuestos fenólicos, los ácidos orgánicos o el pH en las uvas y los vinos. (Di Vaio et al., 2019). Por otra parte no compromete las reservas de carbohidratos y compuestos nitrogenados (Palliotti et al., 2013, 2014).

Forzado de yemas

El forzado de yemas es una técnica propuesta para atrasar la madurez en zonas extremadamente cálidas (Gu et al. 2012). Consiste en un despampanado severo por encima del último racimo algunos días después del cuaje, dejando unos 6 ó 7 nudos, y la eliminación simultánea de todas las hojas, feminelas y racimos presentes. Esto genera una detención de la dormición, “forzando” la brotación de las yemas francas. De esta manera, la brotación y desarrollo posterior de estos brotes se retrasan. Una desventaja es que esta técnica puede reducir el rendimiento un 20% o más (Gu et al. 2012, Martínez de Toda 2020, Martínez Moreno et al. 2019). Además, es difícil convencer a los productores de que se eliminan todos los racimos al comienzo de la temporada confiando que luego las yemas forzadas generarán una nueva cosecha (Poni et al. 2020). En consecuencia, recientemente se ha propuesto una alternativa (llamada double-cropping o doble cosecha) que facilita su aplicación y adicionalmente permitiría aumentar del rendimiento. Tanto Poni et al. (2020) como Martínez de Toda (2021) han demostrado que es posible forzar el desarrollo de las yemas con solo el despampanado y eliminación de las feminelas, pero sin eliminar los racimos. Así es posible obtener una segunda cosecha a partir de las yemas forzadas con pH más bajo, mayor acidez, y mayor contenido de antocianinas y fenoles, que se suma a la cosecha de los racimos primarios (Martínez de Toda 2021; Poni et al. 2021). Esta segunda cosecha puede representar cerca del 30% (Martínez de Toda 2021) o del 40-50% de la cosecha primaria (Poni et al. 2021).

Poda tardía

La poda invernal es una práctica rutinaria en casi todos los frutales de hoja caduca y tiene como función mantener el balance entre el crecimiento vegetativo y reproductivo. En cambio, la poda tardía se aplica para retrasar el desarrollo de las yemas basales. Esta práctica ha sido usada para escapar de las heladas tardías (Howell y Wolpert, 1978) y para aumentar el cuaje en variedades con tendencia al corrimiento (Friend y Trought, 2007). La vid, al ser una liana, presenta una marcada acrotonía; las yemas de

la parte distal del sarmiento son las que brotan primero mientras que las basales permanecen en dormición. Esta diferencia a lo largo del sarmiento se denomina inhibición correlativa y permite que, al podar luego de la brotación, la planta retrase el desarrollo de las yemas basales. La poda realizada después de la brotación elimina las reservas que ya han sido movilizadas por la planta y ubicadas en los órganos de crecimiento vegetativo, y las plantas probablemente se pueden debilitar (Hidalgo, 2011). Sin embargo, la vid tiene una mayor capacidad de recuperación ante el calentamiento global, por lo que esta debilidad no es una gran preocupación en viticultura (Keller, 2020, Gutierrez Gamboa et al., 2021). En los últimos años, debido al cambio climático, la poda tardía está siendo estudiada en diferentes regiones del mundo como técnica para retrasar la fenología y llevar la madurez de la baya hacia una época más fresca (Allegro et al., 2020; Frioni et al., 2019; Gatti et al., 2018; Moran et al., 2018; Palliotti et al., 2017; Petrie et al., 2017). En este trabajo, nos propusimos evaluar la manipulación de la fecha de poda como una estrategia de adaptación al cambio climático. De todas las alternativas antes descritas, se optó por la poda tardía ya que la misma puede aplicarse en el corto plazo y además no requiere un costo adicional, al ser la poda una tarea de rutina de la viña. Por otra parte, permitiría una descompresión del uso de mano de obra durante el invierno.

HIPÓTESIS DEL ESTUDIO

Hipótesis general

La poda tardía produce un retraso en el ciclo fenológico de vides del cv. Malbec en Mendoza, llevando el periodo de madurez hacia condiciones de temperatura más favorables, para alcanzar un balance entre la síntesis y acumulación de los distintos compuestos de la uva.

Hipótesis específicas

1. La poda tardía, realizada luego de brotación, produce un atraso en el ciclo fenológico en cv. Malbec. (Capítulo III)
2. La poda tardía, realizada luego de brotación, produce una disminución en el consumo en agua total durante el ciclo, debido a un menor crecimiento vegetativo y a un ciclo más corto. (Capítulo III)
3. La poda tardía, aplicada en varias estaciones sucesivas, produce una alteración de los componentes del rendimiento. Mientras más tardía es la poda,

más componentes del rendimiento se afectan y en mayor magnitud (Capítulo III).

4. La poda tardía afecta la madurez de la baya de dos maneras: Por un lado, atrasando la fenología, generando que la madurez de la baya ocurra en épocas más frescas, por lo conserva niveles mayores de acidez titulable y aumenta el contenido de polifenoles en uvas y en vino. Por otro lado, alterando el equilibrio vegetativo-reproductivo (Capítulo IV).

OBJETIVOS DEL ESTUDIO

Objetivos generales

1. Generar conocimientos sobre la poda tardía como una estrategia de adaptación al cambio climático a través de un atraso del ciclo fenológico y de la madurez en vides de cv. Malbec, Mendoza, Argentina.
2. Generar conocimientos sobre los efectos que tiene la poda tardía en cv. Malbec para guiar la toma de decisiones respecto del momento de aplicación.

Objetivos específicos

1. Determinar el efecto de la fecha de poda sobre los principales estados fenológicos y el crecimiento vegetativo.
2. Estimar el coeficiente de cultivo y el consumo hídrico de la planta.
3. Determinar el efecto de la fecha de poda sobre los componentes del rendimiento, la evolución de la madurez y la composición química de la uva y del vino.

CAPÍTULO II: Materiales y métodos

Sitio y material vegetal

El experimento se realizó durante tres temporadas consecutivas (2017-18, 2018-19 y 2019-20) en un viñedo ubicado en el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Estación Experimental Mendoza (33 ° 0'15"S; 68 ° 51'56"O), en Luján de Cuyo, Mendoza, Argentina.

El índice de Winkler (IW) (Winkler, 1974) es un índice bioclimático definido como la integral térmica por encima de 10 °C entre el 1 de octubre y el 30 de abril (en el hemisferio sur)

$$IW = \sum_{1 \text{ de octubre}}^{30 \text{ de abril}} (\text{Temperatura media mensual} - 10 \text{ } ^\circ\text{C}) * \text{días del mes}$$

Las unidades en que se expresa son “Grados días de crecimiento” (GDD, por sus siglas en inglés). Según el Índice de Winkler, las zonas son clasificadas como: Región muy fría (i.e. IW<1111), región I (i.e. IW entre 1111 y 1389), región II (IW entre 1389 y 1667), región III (IW entre 1667 y 1944), región IV (IW entre 1944 y 2222), región V (IW entre 2222 y 2500), región VI (IW entre 2500 y 2778) y región muy cálida (IW >2778). El sitio está clasificado como Zona III (Cabré et al., 2016), según el índice de Winkler (Winkler, 1974).

La media histórica de los grados días de crecimiento (GDD; base 10 °C) acumulados de octubre a abril es 1917.1 °Cd y la precipitación anual es de 245 mm, concentrada en verano (del 21 de diciembre al 21 de marzo para el hemisferio sur). Las temperaturas medias de los meses más cálido (enero) y frío (julio) son de 22,5°C y 7,0°C, respectivamente.

El viñedo se plantó en 2011 con plantas de Malbec (clon 18 de INTA), sobre pie franco, conducidas en espaldero alto con brotes posicionados verticalmente (VSP) y podadas en cordón bilateral pitoneado con una media de 26 yemas por planta. Las hileras están orientadas de norte a sur y la distancia de plantación es de 2,5 m entre hileras y de 1,5 m entre plantas. El viñedo se riega por goteo.

Diseño experimental y tratamientos

Los tratamientos correspondieron a cuatro fechas de poda, definidas según la escala fenológica de Eichorn y Lorenz (E-L) modificada por Coombe (1995). Se compararon plantas podadas durante el invierno (estadio E-L 1, control), con plantas podadas en

diferentes estadios fenológicos: en brotación (estadio E-L 4, tratamiento Br), con 2-3 hojas separadas (estadio E-L 9, tratamiento 2-3H) y con 8 hojas separadas (estadio E-L 15, tratamiento 8H). El experimento se instaló en un diseño de bloques completos al azar con cuatro repeticiones. El bloqueo se realizó considerando el peso de poda de las plantas del viñedo determinado la temporada anterior al comienzo del experimento. Cada repetición correspondió a 15 plantas cada una, distribuidas en tres hileras adyacentes (Figura 1).

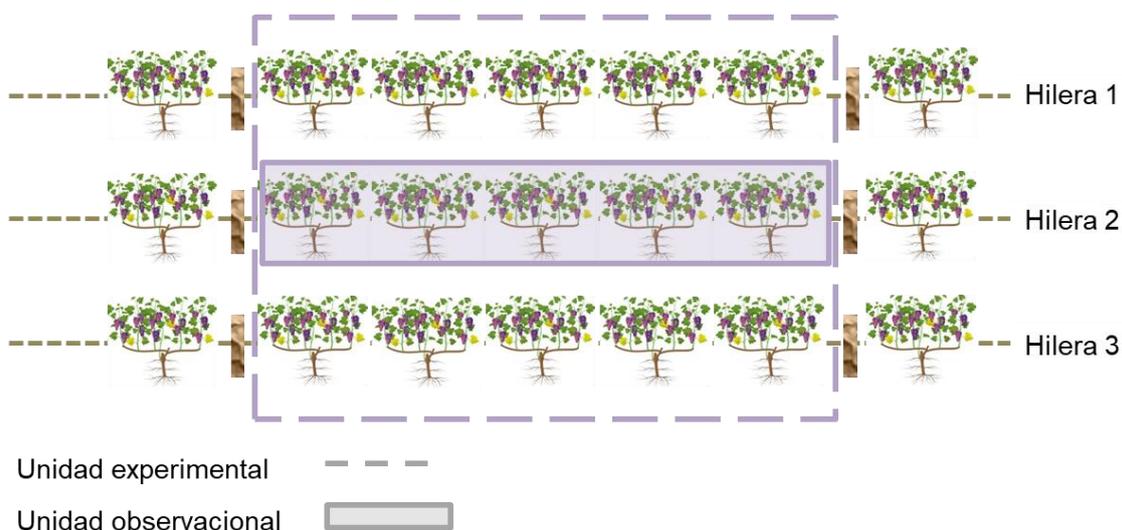


Figura 1 Diagrama esquemático de la parcela de Malbec donde se instaló el experimento. Cada unidad experimental o parcela estuvo conformada por 15 plantas dispuestas en 3 hileras consecutivas. Las 5 plantas de la hilera del centro correspondieron a la unidad observacional de cada repetición (4 tratamientos x 4 repeticiones= 16 parcelas).

El momento de la poda para los tres tratamientos de poda tardía (Br, 2-3H y 8H) se decidió de acuerdo con la fenología de las plantas del tratamiento control para evitar diferencias en el desarrollo de las yemas de las plantas sin podar debido a la posición de los nudos (Figura 2). Es decir, los tratamientos de poda tardía se aplicaron cuando el 50% de las yemas de las plantas control alcanzaron la etapa que correspondía a la definida para cada uno de ellos.

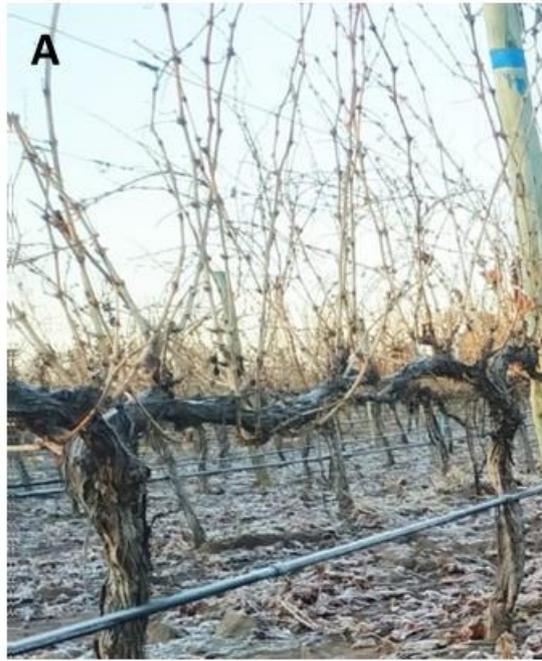


Figura 2. *Estadio de yema invernal (A, E-L 1), brotación (B, E-L 4), 2-3 hojas separadas y brotes de 2-4 cm de longitud (C, E-L 9), 8 hojas separadas (D, E-L 15) de las plantas control. Cada estadio determinó el momento de aplicación de cada tratamiento: poda invernal, en brotación (Br), con 2-3 hojas (2-3H) y con 8 hojas (8H).*

Los tratamientos se aplicaron por tres temporadas consecutivas, en las mismas plantas (Figura 3). La diferencia de días de aplicación de poda en brotación y de 2-3 hojas desplegadas (i.e. de 2 a 5 días) es más pequeña que la de 2-3H y 8 hojas desplegadas (i.e. de 9 a 19 días) (Figura 3).

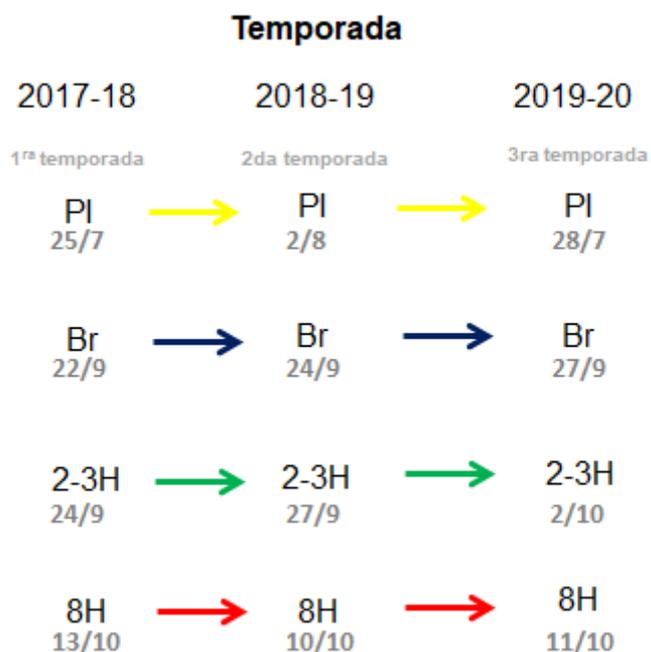


Figura 3. Diagrama esquemático de la aplicación de los tratamientos sobre las plantas, con la fecha de aplicación para cada temporada. Los mismos tratamientos se aplicaron sobre las mismas plantas, por tres temporadas consecutivas.

En la Tabla 1 se resumen las principales mediciones realizadas en los años del experimento, discriminadas por temporada.

Tabla 1. Resumen de las principales determinaciones realizadas durante las tres temporadas del ensayo

		Temporada		
		2017-18	2018-19	2019-20
Fenología		X	X	X
Longitud de brotes, número de hojas, área foliar		X	X	
$K_c - E_{tc}$		X	X	
Peso de poda		X	X	X
Componentes del rendimiento	Número de flores- Porcentaje de cuaje	X	X	
	Rendimiento por planta, número de racimos, peso racim	X	X	X
Composición de uva	Evolución madurez (SST, peso de baya, acidez titulable,	X	X	
	Evolución polifenólica (fenoles, taninos, antocianinas)	X	X	
	Perfil antocianinas		X	
Composición cosecha		X	X	X
Determinaciones sobre vino	Composición química	X	X	
	Composición polifenólica	X	X	
	Análisis sensorial	X		
	Perfil antocianinas		X	
Componentes de color		X		

Análisis estadístico

Los resultados se analizaron con el software Infostat (versión 1.5; Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina) utilizando modelos lineales mixtos, que incluyeron la temporada y la fecha de poda como efectos fijos y sus interacciones; y el

bloque como efecto aleatorio. En los datos de medidas repetidas en el tiempo, se agregó la unidad experimental al modelo como un efecto aleatorio para indicar correlación. Las variables repetidas en el tiempo se analizaron considerando los grados-día como una covariable para evaluar si las diferencias observadas entre tratamientos o entre temporadas fueron atribuibles a la fecha de poda o a otra variable que pudiera causar un retraso en el desarrollo de las plantas (Sadras y Moran, 2012a). Las regresiones no lineales se ajustaron con el software R (R Core Team), usando el paquete “nlme” de modelos no lineales mixtos (Pinheiro, J; Bates D; DebRoy, S; Sarkar, 2022). Las medias se compararon mediante la prueba múltiple de Fisher ($p \leq 0.05$). Para comparar los efectos de la fecha de poda y de la temporada en regresiones no lineales se utilizó una prueba de F. Esta prueba realiza comparaciones de a pares, contrastando la suma de cuadrados de residuos (SCR) de ajustes globales con la SCR de ajustes individuales, según los efectos que se desean comparar. El estadígrafo de prueba F se calcula según la ecuación:

$$F = \frac{(SCR_f - \sum SCR_i) / [(n - 1)k]}{\sum SRS_i / [(N_{data} - 1)k]} \text{ con } gl = n - k$$

donde SCR es la suma de cuadrados de residuos del ajuste global (f) o individual (i), n es el número de regresiones individuales, k es el número de parámetros a ajustar y N_{data} es el número de observaciones (Lebon et al., 2006). Los grados de libertad para cada SCR se calcularon como $N_{data} - k$. La prueba de F permite realizar comparaciones de a pares. El nivel de significancia para todos los análisis estadísticos fue $\alpha = 0.05$.

CAPÍTULO III: Efecto de la poda tardía sobre la fenología, el crecimiento vegetativo, el consumo de agua y los componentes del rendimiento

Introducción

Las técnicas de manejo de canopia son interesantes porque se pueden aplicar en viñedos ya instalados, mitigando a corto plazo algunos de los efectos negativos del aumento de la temperatura (Martínez de Toda, 2021). Estas técnicas se pueden clasificar según su modo de acción, dependiendo de si alteran la relación hoja-fruto, si cambian el momento de las etapas fenológicas críticas o si disminuyen el aporte de energía a la canopia (Palliotti et al., 2014; Sadras et al., 2012). Algunas de estas técnicas incluyen el deshoje tardío (Buesa et al., 2018), el forzado de yemas (Martínez-Moreno et al., 2019; Parker et al., 2015) y la poda tardía (Allegro et al. 2020; Petrie et al. 2017). Entre ellos, la poda tardía es muy atractiva ya que no requiere ningún costo adicional, se puede implementar con una prepoda mecánica y es fácil de realizar.

La poda tardía se utilizó por primera vez para evitar las heladas primaverales (Coombe, 1964; Howell y Wolpert, 1978) y para mejorar el cuaje (Friend y Trought, 2007). Más recientemente, se propuso como una herramienta de bajo costo para retrasar la fenología y así adaptarse al cambio climático (Palliotti et al., 2014). Sin embargo, se ha señalado que la poda tardía es más efectiva para retrasar las etapas entre brotación y envero; mientras que, desde el envero hasta la cosecha, los efectos sobre la acumulación de sólidos solubles y la cosecha no son concluyentes. Mientras algunos estudios muestran un retraso en la acumulación de azúcar (Frioni et al., 2016; Palliotti et al., 2017; Petrie et al., 2017), otros trabajos obtuvieron un retraso o un adelanto según las características del año y el momento de poda (Gatti et al., 2016; Moran et al., 2017). Del mismo modo, estudios recientes han observado múltiples y contradictorios efectos sobre los componentes del rendimiento, dependiendo principalmente de la fecha de poda, la variedad y el ambiente (Moran et al., 2017; Palliotti et al., 2017; Silvestroni et al., 2018), nivel de carga y características de la temporada (Moran et al., 2018b; Petrie et al., 2017). Muchos estudios observaron que cuanto más se pospone la poda, mayores son las pérdidas de rendimiento y el retraso en la maduración (Frioni et al., 2016; Gatti et al., 2016; Palliotti et al., 2017; Silvestroni et al., 2018). Sin embargo, el umbral a partir del cual no se observan pérdidas de rendimiento no está muy claro en la literatura y probablemente dependa de las

condiciones específicas del viñedo (Friend y Trought, 2007; Frioni et al., 2019; Petrie et al., 2017). Petrie et al. (2017) señala la importancia de definir un umbral de fecha de poda a partir del cual se compromete el rendimiento. Encontraron que este umbral para el cv. Syrah está antes de la etapa de ocho hojas desplegadas. Se obtuvieron resultados similares para el cv. Sangiovese (Frioni et al., 2016), mientras que, para otras fechas de poda tardía, se han informado respuestas más variables (Allegro et al., 2020; Moran, Petrie y Sadras, 2018). Uno de los componentes del rendimiento que se ve afectado con mayor frecuencia por la poda tardía es el peso del racimo, debido a la reducción del peso de bayas o a la menor cantidad de bayas por racimo. También se ha informado una reducción en el número de racimos por planta en plantas podadas con aproximadamente 7-8 hojas separadas (Allegro et al., 2020; Gatti et al., 2018; Palliotti et al., 2017; Silvestroni et al., 2018). La disminución de rendimiento parece estar relacionada con el agotamiento de las reservas debido a que la poda tardía produce una doble brotación, las cuales se producen en una etapa en la cual el nivel de carbohidratos es mínimo (es decir, desde la brotación hasta la floración). Se desconoce si la causa de la disminución en el número de bayas se debe a una disminución en el número de flores o a un menor porcentaje de cuaje. Por lo tanto, se necesitan experimentos a largo plazo para determinar las posibles causas de la reducción del rendimiento causada por la poda tardía y las interacciones con las condiciones estacionales y la fecha de poda (Petrie et al. 2017).

Para finalizar, una revisión bibliográfica reciente sobre los trabajos de poda tardía (Poni et al. 2022), cuyos resultados se muestran en la Tabla 2, da cuenta de la consistencia en el retraso en los primeros estadios fenológicos, principalmente en brotación. En cuanto al rendimiento, si bien la tendencia es a que disminuya mientras más tardía es la poda, existen algunas excepciones. Respecto a la madurez, en la mayoría de los casos la poda tardía retrasa la madurez de la uva, aunque existen trabajos en los que el retraso en la fenología va disminuyendo a lo largo del ciclo. Las causas fisiológicas de este comportamiento no son fáciles de elucidar ya que, por un lado, al formarse la canopia un mes más tarde de lo habitual, la formación de hojas, el crecimiento y la senescencia, así como todas las etapas del desarrollo de la baya, tienen lugar bajo diferentes condiciones ambientales. Por otra parte, debido a lo anterior mencionado, se produce una alteración del equilibrio vegetativo/reproductivo de la planta (Poni et al. 2022).

En consecuencia, considerando los resultados contrastantes observados en la literatura, especialmente en cuanto a su efectividad para retrasar la madurez, son necesarios estudios de campo locales para establecer los efectos de la poda tardía en

determinadas condiciones ambientales, así como los efectos acumulativos a largo plazo.

El objetivo de este capítulo fue evaluar los efectos de la poda tardía sobre la fenología, los componentes del rendimiento, el desarrollo y crecimiento de la canopia y el consumo de agua durante tres años consecutivos.

Tabla 2: Tabla adaptada de Poni et al. (2022). Síntesis de la información de trabajos de investigación sobre el impacto de las estrategias de poda tardía en el crecimiento, el rendimiento y la acumulación de sólidos solubles en vid.

Pais/Varietal	Tipo de poda/condiciones de crecimiento	Fecha de poda	Efecto en la fecha de brotación	Respuesta del rendimiento ^a	Retraso en acumulación de sólidos solubles ^b	Referencia
Italia / Pinot noir	Larga/Ensayo a campo	Brotos de unos 10 cm	Retraso de 9-23 días	Reducción del 35%	< SST	Gatti et al. (2018)
Australia / Cabernet Sauvignon y Shiraz	Corta / Ensayo a campo	2-3 y 8 hojas desenvueltas	Retraso de 25 días, aproximadamente	Reducción del 10 y del 55%	3 semanas – Shiraz; 2 semanas - Cabernet Sauvignon	Petrie et al. (2017)
Italy / Sangiovese	Corta / Ensayo a campo	Brotos de 10 y 20 cm	Retraso de 24-29 días	Reducción del 22 y del 43%	< SST	Palliotti et al. (2017)
Australia / Shiraz	Corta / Ensayo a campo	Brotación y 2-3 hojas desenvueltas	Retraso de 14-28 días	Según la temporada y la fecha de poda, mantiene, aumenta o disminuye	<SST en 2 temporadas y mantiene en otra	Moran et al. (2018)
Australia / Shiraz	Corta / Ensayo a campo	2-3 hojas desenvueltas	Retraso de 14-28 días	No reportado	> antocianinas, fenoles, perfil frutal de vino, cuerpo	Moran et al. (2018)
Italia / Sangiovese	Corta / Ensayo a campo	4-5 hojas desenvueltas	N/A	Reducción del 55%	< SST	Frioni et al. (2016)
Australia / Shiraz	Corta / Ensayo a campo	2-3 hojas desenvueltas	Retraso de 14-28 días	Sin cambios	< SST	Moran et al (2017)
España / Maturana tinta	Corta / Ensayo a campo	Inflorescencias desenvueltas	Retraso de 10-54 días	Sin cambios	< SST	Zheng et al. (2017)
Nueva Zelanda / Merlot	Corta / Ensayo a campo	Brotos de unos 5 cm	Retraso de 24-56 días	Aumento de 63 a 93%	< SST	Friend and Trought (2007)
Italia / Sangiovese	Corta / Ensayo en maceta	2-3 y 6-8 hojas desenvueltas	Retraso de 17 y 31 días	Reducción del 28% y del 92%	> SST	Gatti et al. (2016)
Italia / Sangiovese	Corta / Ensayo a campo	3-4 y 7-8 hojas desenvueltas	Retraso de 30-47 días	Reducción del 34% y del 62%	3 a 9 días de retraso para SST de 20 °Brix	Silvestroni et al. (2018)
Italia / Merlot	Corta / Ensayo a campo	3-4 y 7-8 hojas desenvueltas	Retraso de 24-56 días	Reducción del 40% y del 71%	<SST	Allegro et al. (2020)
España / Bobal y Tempranillo	Corta / Ensayo a campo	1 y 2-3 hojas desenvueltas	Retraso de 15-20 días	Reducción del 10%	<SST al comienzo	Buesa et al. (2021)
Brasil / Chardonnay	Corta / Ensayo a campo	7, 14 y 21 días luego de la poda invernal (25 de agosto)	N/A	Mantiene o reduce un 58%	Varía según la fecha de poda	Brighenti et al. (2017)

USA / Lemberger y Riesling	Corta / Ensayo a campo	1 hoja desenvuelta	Retraso de 10-11 días	Aumento del 61% y del 36%	Despreciable	Persico et al. (2021)
Italia / Pinot noir	Corta / Ensayo a campo	2-3 hojas desenvueltas	Retraso de 11 días	Reducción del 5% al 47%	<SST	Frioni et al. (2019)
Argentina / Malbec	Corta / Ensayo a campo	2-3 y 8 hojas desenvueltas	Retraso de 15-29 días	Reducción del 17% y del 60%	>SST	Bustos Morgani et al.(2022)
Nueva Zelanda / Chardonnay	Corta / Ensayo a campo	21 y 41 días después de poda invernal (5 de Julio)	N/A	Aumento del 38%	N/A	Friend et al. (2011)
Australia / Cabernet Sauvignon	Corta / Ensayo a campo	48 días después de poda invernal (5 de julio)	Retraso de 5 días aproximadamente	N/A	< SST	Martin and Dunn (2000)
Australia / Zante Currant	Corta / Ensayo a campo	Brotos de unos 5 cm	N/A	Se reduce la primera temporada; Se mantiene en la segunda temporada	N/A	El-Zeftawi and West (1970)
US / Perlette	Corta / Ensayo a campo	1, 2 y 3 semanas después de brotación	N/A	Se reduce	N/A	Jensen and Dokoozian (1991)
Italia / Sangiovese	Corta / Ensayo a campo	2-3 hojas desenvueltas	Retraso de 15-20 días	Aumento del 53 y del 100%	No varía	Despoina et al. (2021)

^a Se refiere al porcentaje de variación (%) respecto a la poda invernal.

^b Se refiere a la diferencia significativa de algunas variables respecto a la poda invernal.

Hipótesis específicas

1. La poda tardía, realizada luego de brotación, produce un atraso en el ciclo fenológico en cv. Malbec.
2. La poda tardía, realizada luego de brotación, produce una disminución en el consumo en agua total durante el ciclo, debido a un menor crecimiento vegetativo y a un ciclo más corto.
3. La poda tardía, aplicada en varias estaciones sucesivas, produce una alteración de los componentes del rendimiento. Mientras más tardía es la poda, más componentes del rendimiento se afectan y en mayor magnitud.

Objetivos específicos

1. Determinar el efecto de la fecha de poda sobre los principales estados fenológicos y el crecimiento vegetativo.
2. Estimar el coeficiente de cultivo y el consumo hídrico de la planta.
3. Determinar el efecto de la fecha de poda sobre los componentes del rendimiento.

Materiales y métodos

Datos meteorológicos

La temperatura diaria (media, máxima y mínima), precipitaciones, velocidad del viento y otros parámetros se registraron con una estación meteorológica automática (METOS Compact D96, Pessl Instruments, Viena, Austria) ubicada cerca del viñedo. La ET_0 diaria se estimó utilizando un software de programación y manejo de los recursos hídricos CROPWAT 8.0 (Smith, 1992). Se utilizó la temperatura diaria para calcular la acumulación de grados día de crecimiento (GD) para cada tratamiento considerando una temperatura base de 10 °C.

$$\text{Grados día } (^{\circ}\text{C}) = \sum_{\text{Brotación}}^{\text{Cosecha}} \text{Temperatura media } (^{\circ}\text{C}) - 10^{\circ}\text{C}$$

Fenología

El desarrollo fenológico se registró semanalmente utilizando el sistema E-L modificado (Coombe 1995) en tres plantas por unidad observacional. En cada planta, se seleccionaron al azar tres pitones con dos nudos cada uno (18 yemas por repetición)

para registrar la fenología. Dos veces por semana se registraron los estadios de brotación (E-L 4), 2-3 hojas separadas (E-L 9), 5 hojas separadas (E-L 12), 8 hojas separadas (E-L 15), floración (E-L 23) y comienzo de envero (E-L 35). Cada estadio fenológico se registró una vez que el 50% de los nudos alcanzó cada etapa. Los estadios de floración y de comienzo de envero se registraron a través del seguimiento de 40 racimos previamente marcados. Para establecer la madurez de la uva (E-L 38) de manera cuantitativa, se realizó el seguimiento de sólidos solubles de envero a cosecha, estableciendo el punto de cosecha a los 23°Brix.

La evolución de sólidos solubles respecto al tiempo se caracterizó con un modelo logístico (i.e. un modelo sigmoide cuya curva es simétrica respecto al punto de inflexión)

$$SST = \frac{SSmax}{1 + e^{\left(-\frac{x-x_0}{b}\right)}}$$

Donde $SSmax$ es la máxima concentración de sólidos soluble, x_0 es el valor de x en el punto de inflexión de la curva y b es la pendiente alrededor del punto de inflexión. En base a los parámetros obtenidos, se calculó el comienzo de acumulación de azúcar (i.e. a los 10 °Brix), y se estimó la velocidad de acumulación como la relación entre la diferencia de $SSmax*0.75$ y $SSmax*0.25$ y el tiempo transcurrido entre estos dos momentos.

Crecimiento vegetativo

Para realizar el seguimiento de la longitud de brotes y del número de hojas, se marcaron pámpanos correspondientes al primer y segundo nudo de los pitones seleccionados al azar durante las temporadas de crecimiento 2017-18 y 2018-19 (Figura 4). En 2017-18 se marcaron cinco brotes por repetición, dos del primer nudo del pitón y tres del segundo, mientras que en 2018-19 se marcaron 12 brotes por unidad experimental, seis del 1^{er} nudo del pitón y seis del 2^{do}. Entre la brotación y la floración se midió la longitud de los brotes y se contaron sus hojas dos veces por semana y una vez por semana desde la floración hasta finales de diciembre cuando se realizó el despunte.

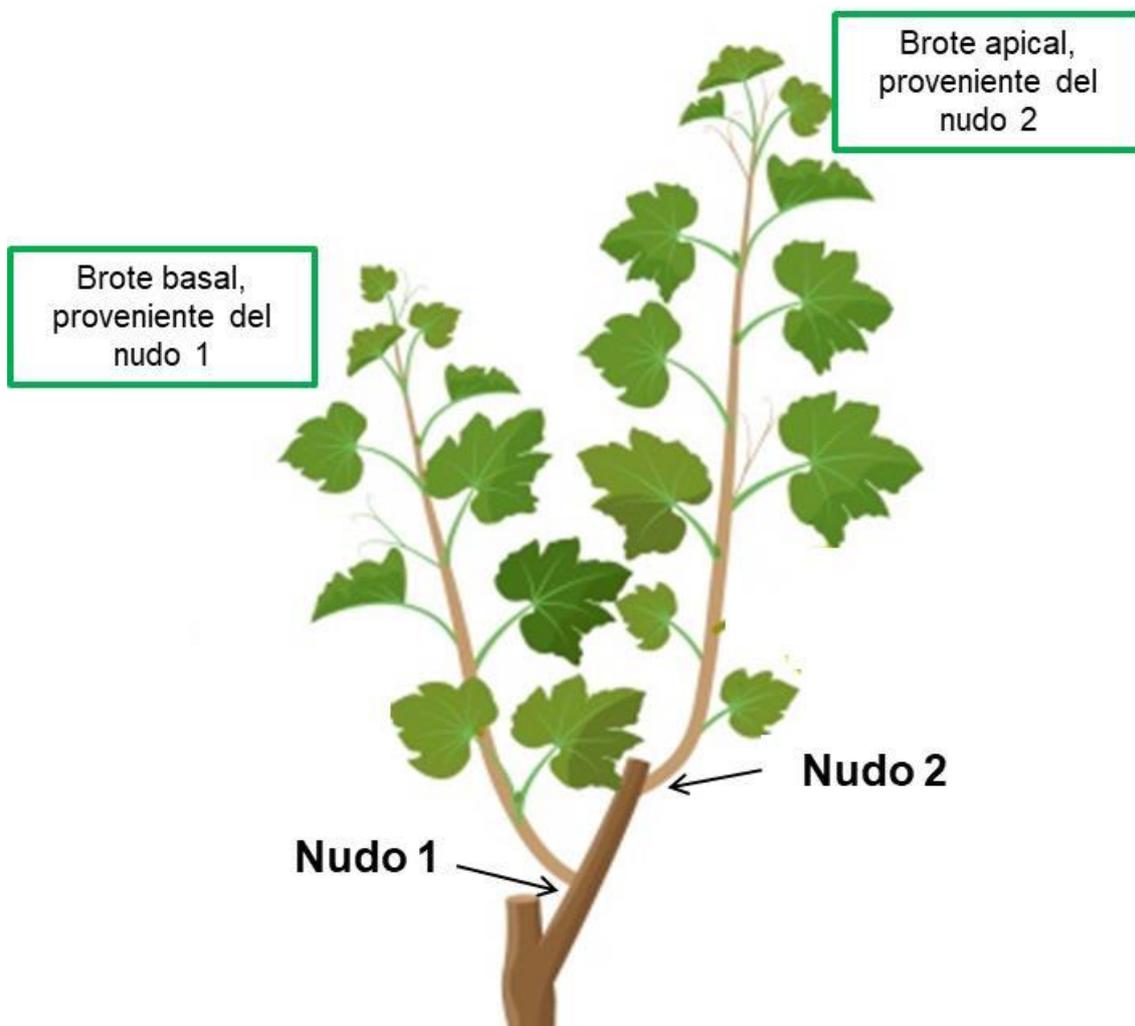


Figura 4. Esquema que muestra las dos posiciones de los nudos dentro de un mismo pitón.

Área foliar total y peso de poda

Se determinó el área foliar primaria, secundaria y total (AFT) después de la cosecha y antes de la caída de las hojas mediante un procedimiento de dos pasos. Primero, se defolió completamente una planta por repetición (en 2018 sólo en 2 repeticiones por tratamiento), separando las hojas primarias y secundarias. Se registró su peso fresco y luego se midió el área foliar primaria y secundaria a través del análisis de imágenes digitales de las hojas colocadas sobre una superficie blanca, sin superponerlas entre sí. Las imágenes se analizaron con un editor de imágenes (GIMP 2.8.22, the GIMP Development Team, 2017) y se estableció una regresión entre el peso fresco y el área foliar para cada tratamiento de forma individual. En segundo lugar, se defolió otra planta por repetición y se utilizó la regresión para calcular su área foliar.

El peso de la poda se registró en cinco plantas por repetición en las tres temporadas del experimento. Dado que la poda se realizó con diferente contenido de agua de brotes, el material de poda se secó para poder comparar los pesos de poda entre los tratamientos de poda con un contenido de agua de brotes similar. El peso de la poda en seco se midió en dos plantas por repetición, colocando sarmientos y tejido verde (si lo hubiera) en un horno a 105 °C durante dos días. Además, luego de tres temporadas del ensayo, se determinó el peso de poda invernal en cinco plantas por repetición.

La capacidad de la planta, que es la materia seca total producida por planta en un año, se calculó en las tres temporadas, según Martínez de Toda y Sancha (1999). Brevemente, se calculó la materia seca total por planta (excepto raíces y tronco) mediante la suma del peso seco de los racimos, el peso de la poda y las hojas. El peso seco de las hojas se calculó como el producto del área foliar total por planta • 65; el peso seco de la poda se determinó como el peso de la poda • 0,47 y el peso seco de los racimos fue el resultado del producto del rendimiento por planta • 0,23.

Índice de área foliar

El índice de área foliar (IAF) representa el área foliar por unidad de área de suelo (Jonckheere et al. 2004). El IAF se determinó mediante el uso de la aplicación para teléfonos móviles, Viticanopy (De Bei et al., 2016). Se tomaron fotografías de dos plantas por repetición con la cámara frontal del teléfono, usando un soporte que permitiera mantener el dispositivo paralelo al suelo. Las fotografías se tomaron debajo de la canopia a una distancia de 75-85 cm al cordón, perpendicular a la hilera, de tal manera que el cordón quedara en el centro de la imagen. Las fotografías se tomaron cada 10-15 días, desde brotación a cosecha.

Evapotranspiración del cultivo y datos meteorológicos

El coeficiente de cultivo (K_c) se estimó mediante el porcentaje de sombra proyectada por la canopia sobre una superficie conocida (Williams y Ayars, 2005). Brevemente, el área sombreada debajo de la canopia se calculó a través de fotografías digitales registradas al mediodía solar desde la brotación hasta la cosecha, cada 10-15 días. Se registraron dos imágenes por unidad experimental, las cuales se convirtieron a una escala en blanco y negro, y se calculó el área sombreada separando los píxeles con el mismo software de edición gratuito que se utilizó para la medición del área foliar (GIMP 2.8.22). El K_c se calculó como indica la siguiente ecuación (Williams y Ayars, 2005):

$$K_c = \%sombra\ proyectada * 0.017 - 0.008$$

La evapotranspiración del cultivo (ET_c) se calculó como $ET_0 \times K_c$.

Al proyectar el coeficiente de cultivo en escala térmica, se ajustaron regresiones en dos tramos con plateau:

$$K_c = a + b * TT \quad \text{si } TT \leq TT_x$$

$$K_c = a + b * TT_x \quad \text{si } TT > TT_x$$

En donde, a es la ordenada al origen (i.e. el valor del K_c al comienzo del tiempo térmico), b es la pendiente (i.e. el aumento del K_c por cada GD en la fase lineal) y TT_x es el punto del tiempo térmico a partir del cual el K_c es máximo.

La eficiencia en el uso del agua (EUA) se calculó considerando la relación entre la producción de uva y la evapotranspiración acumulada por planta durante la estación de crecimiento.

Componentes del rendimiento

Antes de la floración, se seleccionaron y marcaron 9 inflorescencias por repetición sobre las cuales se colocó una bolsa de tul para recoger las caliptras caídas durante la floración. Se determinó el número de flores por inflorescencia contando las caliptras recolectadas (Keller et al., 2010). Luego sobre los mismos racimos, en el estado de baya tamaño de arveja, se determinó el número de bayas por racimo, lo cual permitió calcular de manera directa el porcentaje de bayas cuajadas (Keller et al. 2010). Las inflorescencias consideradas fueron las primeras del brote; 6 de ellas de brotes apicales y 3 de brotes basales (Figura 4). Además, se determinó la fertilidad por brote de 24 pitones por repetición contando la cantidad de inflorescencias en brotes apicales y en brotes basales. En la cosecha, se registró el rendimiento (kg/planta), el número de racimos y el peso de las bayas, y se calculó el peso del racimo (rendimiento/racimos por planta) y el número de bayas por racimo (peso racimo/ peso de baya). Se calculó la relación entre el área foliar y el rendimiento (relación hoja/fruta) y el índice de Ravaz (luego de tres años de aplicados los tratamientos) como índices de equilibrio vegetativo/reproductivo de las plantas.

Caracterización del racimo

Al momento de cosecha, se muestrearon 20 racimos en 2018 y 30 racimos en 2019 en cada repetición para determinar la compacidad de los mismos. La mitad de los racimos provinieron del nudo 1 y la otra mitad del nudo 2, ambos años. A cada racimo se le

midió la longitud del raquis y se contó el número de bayas, para calcular la compacidad como el número de bayas por centímetro de raquis.

Para determinar el diámetro modal de cada tratamiento, las bayas que se usaron para determinar la compacidad del racimo se pasaron por un juego de tamices para clasificar las bayas por su diámetro e identificar la clase modal. Posteriormente se apartaron 50 bayas de la clase modal y se conservaron en freezer de -20 °C para su posterior procesamiento y determinación de compuestos fenólicos.

Análisis estadístico

Los resultados se analizaron con el software Infostat (versión 1.5; Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina) utilizando modelos lineales mixtos, que incluyeron la temporada y la fecha de poda como efectos fijos y sus interacciones; y el bloque como efecto aleatorio. En los datos de medidas repetidas en el tiempo, se agregó la unidad experimental al modelo como un efecto aleatorio para indicar correlación. La longitud de los brotes, el número de hojas, el índice de área foliar y el coeficiente de cultivo se analizaron considerando los grados-día acumulados desde brotación y la acumulación de sólidos solubles considerando los grados-día acumulados desde comienzo de envero, para evaluar si las diferencias observadas entre tratamientos o entre temporadas fueron atribuibles a la fecha de poda o a otra variable que pudiera causar un retraso en el crecimiento de las plantas (Sadras y Moran, 2012a). Además, se realizaron regresiones para establecer la relación entre el K_c y el IAF. Las regresiones no lineales se ajustaron con el software R (R Core Team), usando el paquete “nlme” de modelos no lineales mixtos (Pinheiro, J; Bates D; DebRoy, S; Sarkar, 2022). Las medias se compararon mediante la prueba múltiple de Fisher ($p \leq 0.05$).

Resultados

Condiciones de la temporada de crecimiento

Las precipitaciones totales durante las tres estaciones (2017-18, 192.6 mm, 2018-19, 202.8 mm y 2019-20, 197.4 mm) fueron típicas de Mendoza en el período del 1 de septiembre al 31 de marzo. En 2019-20, más de la mitad de las precipitaciones totales se concentró en enero y febrero, mientras que en 2017-18 y 2018-19 se concentró en noviembre y diciembre. Las temperaturas máxima y media diarias del aire fueron similares durante las tres temporadas (Figura 5). Las temperaturas medias máximas fueron 25,6 °C, 25,3 °C y 25,8 °C, mientras que las temperaturas medias fueron 17,2 °C, 17,3 °C, 18,1 °C para las temporadas 2017-18, 2018-19 y 2019-20,

respectivamente. Para las mismas temporadas, los días con temperatura mayor a 30 °C fueron 45, 48 y 66, respectivamente. Durante las temporadas 2017-18 y 2018-19, aproximadamente el 80% de los días con temperatura mayor a 30 °C se concentraron en diciembre, enero y febrero. Por otra parte, durante la temporada 2019-20, más calurosa que las dos anteriores (principalmente por el mes de marzo, que acumuló más de 100°Cd respecto a los dos anteriores) el 66% de estos días se concentraron en los meses diciembre, enero y febrero, mientras que los meses noviembre y marzo contaron con 10 (15%) y 12 días (18%) con temperaturas mayores a 30°C. Además, se registraron 4 días durante 2017-18 y 2 días en las temporadas 2018-19 y 2019-20 con temperatura mayor a los 35°C. La acumulación de temperatura expresada como grados-día de crecimiento (GD, cuyas unidades son °Cd) desde el 1 de septiembre al 31 de marzo (Figura 5), fue mayor en la temporada 2019-20 (1720,8 °Cd) que en las temporadas 2017-18 (1530,3 °Cd) y 2018-19 (1558,3 °Cd).

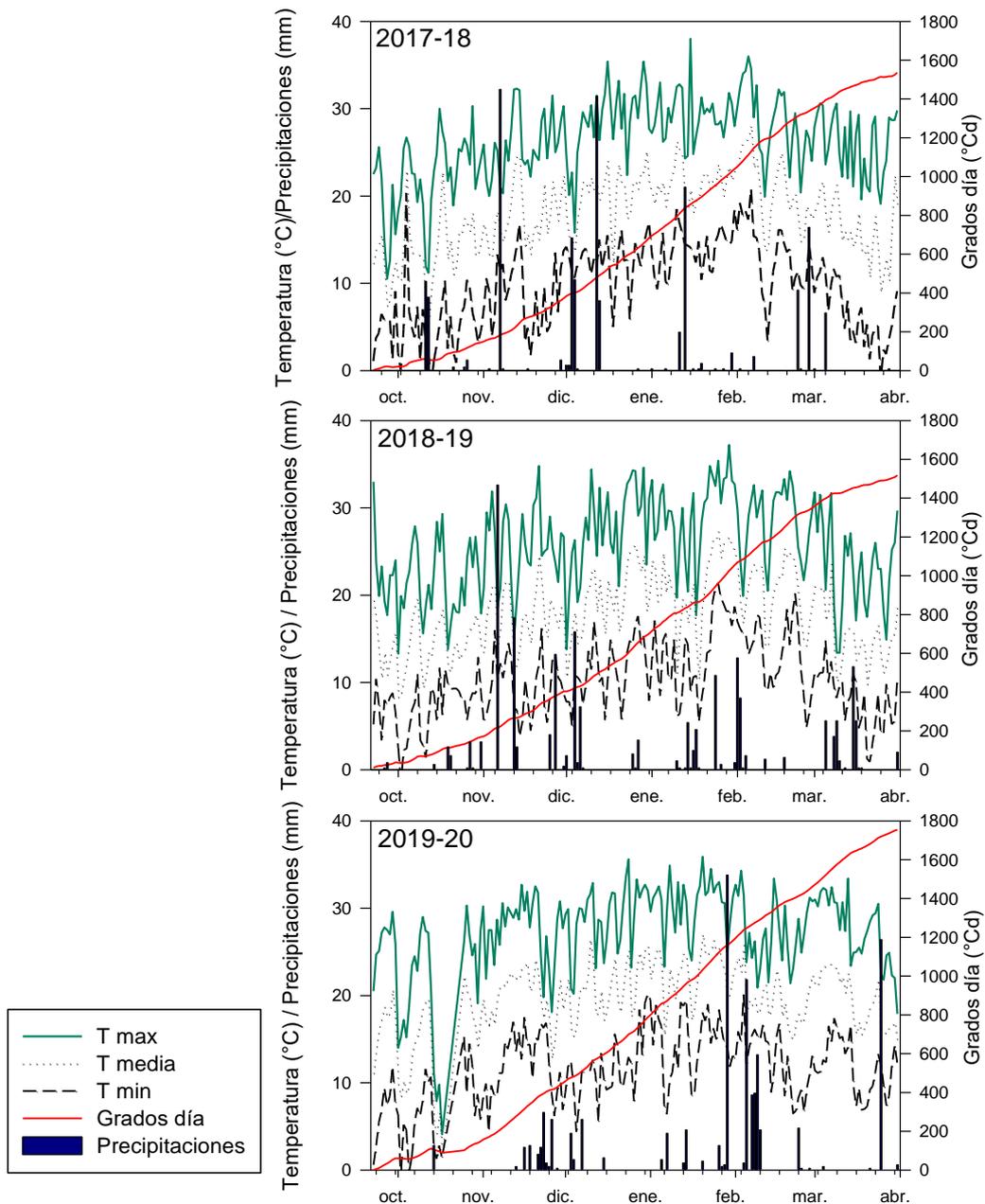


Figura 5. Evolución durante las tres temporadas del experimento de la temperatura media diaria (.....), temperatura máxima diaria (—), temperatura mínima diaria (---), grados día acumulados (—) y precipitación (■). Mendoza, Luján de Cuyo.

Desarrollo de la fenología y duración del ciclo

Para determinar el efecto de la poda tardía sobre la fenología, se registraron las principales etapas fenológicas desde la brotación hasta la madurez, determinada a través de la concentración de sólidos solubles. La poda tardía retrasó todas las etapas fenológicas desde la brotación hasta el envero, las tres estaciones del experimento (Figura 6). El retraso en la fenología fue mayor en la brotación y fue decreciendo a lo largo del ciclo para todos los tratamientos hasta el envero. Cuanto más tardía fue la

poda, mayor fue el retraso en todas las etapas hasta el envero. La brotación se retrasó 11 días para las plantas podadas en brotación (Br), 15 días para las plantas podadas con 2-3 hojas separadas (2-3H) y 29 días para las plantas podadas con 8 hojas separadas (8H). Por otro lado, el envero se retrasó 5 días, 9 y 14 días para los mismos tratamientos, respectivamente (Figura 6). Este atraso en el envero, llevó a que la madurez se retrasara, como máximo, mediados de enero (i.e. 15-20 de enero). Esta magnitud de retraso no necesariamente implica trasladar la madurez hacia condiciones más frescas, ya que las semanas más cálidas suelen ser las de finales de enero y principio de febrero (Figura S1). El atraso en la brotación generó una compresión en la ocurrencia de los primeros estadios fenológicos hasta floración en los tratamientos de poda tardía, especialmente en el más tardío (8H).

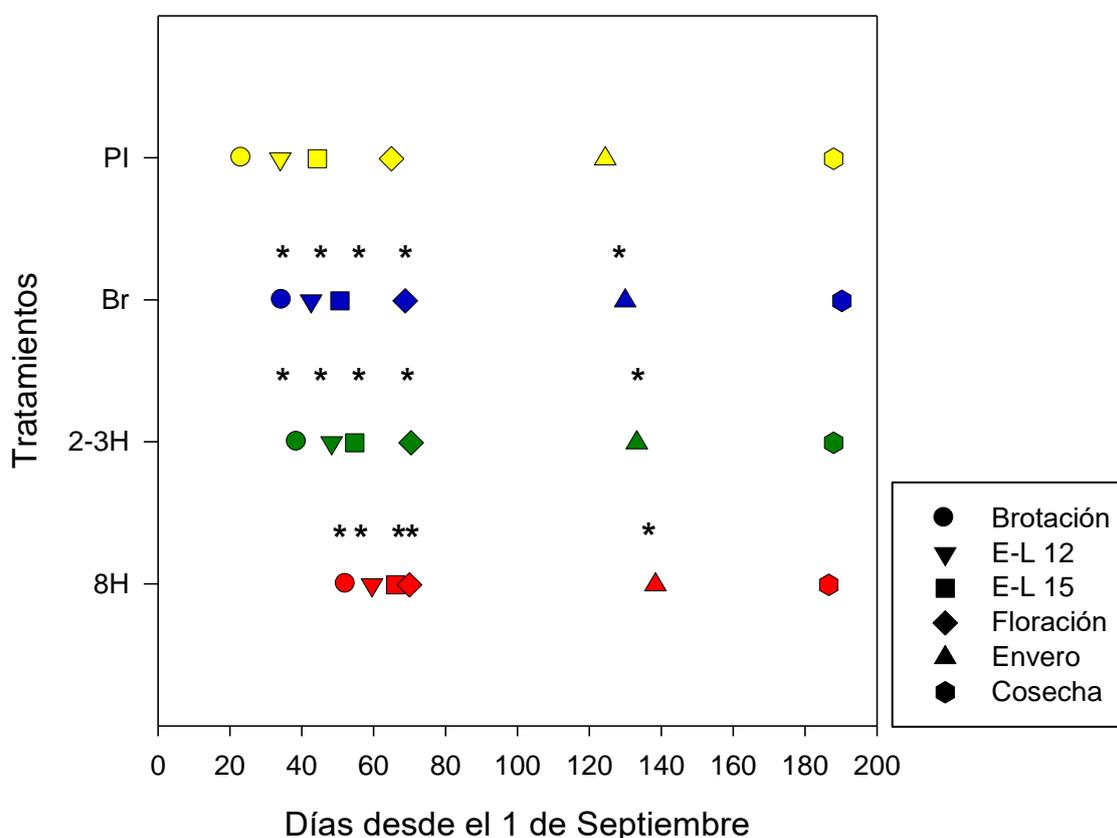


Figura 6. Día de ocurrencia de las diferentes etapas fenológicas desde la brotación hasta la cosecha en plantas de Malbec con poda invernal (PI, ●), podadas en brotación (Br, ●), con 2-3 hojas (2-3H, ●) y con 8 hojas separadas (8H, ●), para las temporadas 2017-18, 2018-19 y 2019-20. Dentro de cada etapa fenológica, la diferencia significativa entre tratamientos está indicada por * ($P < 0.05$ por la prueba de Fisher). Cada valor representa la media de 4 repeticiones, de 5 plantas cada una, proveniente del promedio de las tres temporadas del experimento.

La fecha de cosecha, estimada a través de la concentración de sólidos solubles en la baya (SST), sólo se modificó en el tratamiento más tardío (8H). Las plantas podadas

en 2-3H se cosecharon el mismo día que las plantas podadas en invierno durante los tres años. Las plantas podadas en Br también se cosecharon el mismo día en 2018 y 2020, pero se retrasó 7 días en 2019 respecto al testigo. Finalmente, las plantas podadas en 8H presentaron una mayor variabilidad ya que se cosecharon antes (2018), después (2019), y el mismo día (2020) que las plantas de control. Estos resultados se relacionaron con las diferencias en la tasa de acumulación de azúcar de las bayas y la duración del período entre el envero y la cosecha. La acumulación de sólidos solubles respecto a la fecha de muestreo varió con la fecha de poda y con la temporada (Figura 7). Para distinguir entre las curvas, se ajustaron con una función de tipo sigmoide y se compararon utilizando una prueba de F (Tabla 3). Como puede verse, todos los tratamientos fueron diferentes al testigo. Los parámetros de la curva se utilizaron para estimar el inicio de acumulación de sólidos solubles (i.e. 10 °Brix). La duración de la madurez de las bayas (i.e. tiempo transcurrido entre 10 y 23 °Brix) fue menor para las plantas podadas tardíamente, mientras que el inicio de acumulación de SS se retrasó sólo la segunda temporada (p -valor <0.0001). Si bien en la temporada 2018-19 el tratamiento 8H mostró un retraso en el inicio de la acumulación de SST (Figura 7), estas plantas presentaron una pendiente más alta, lo que les permitió alcanzar el resto de los tratamientos.

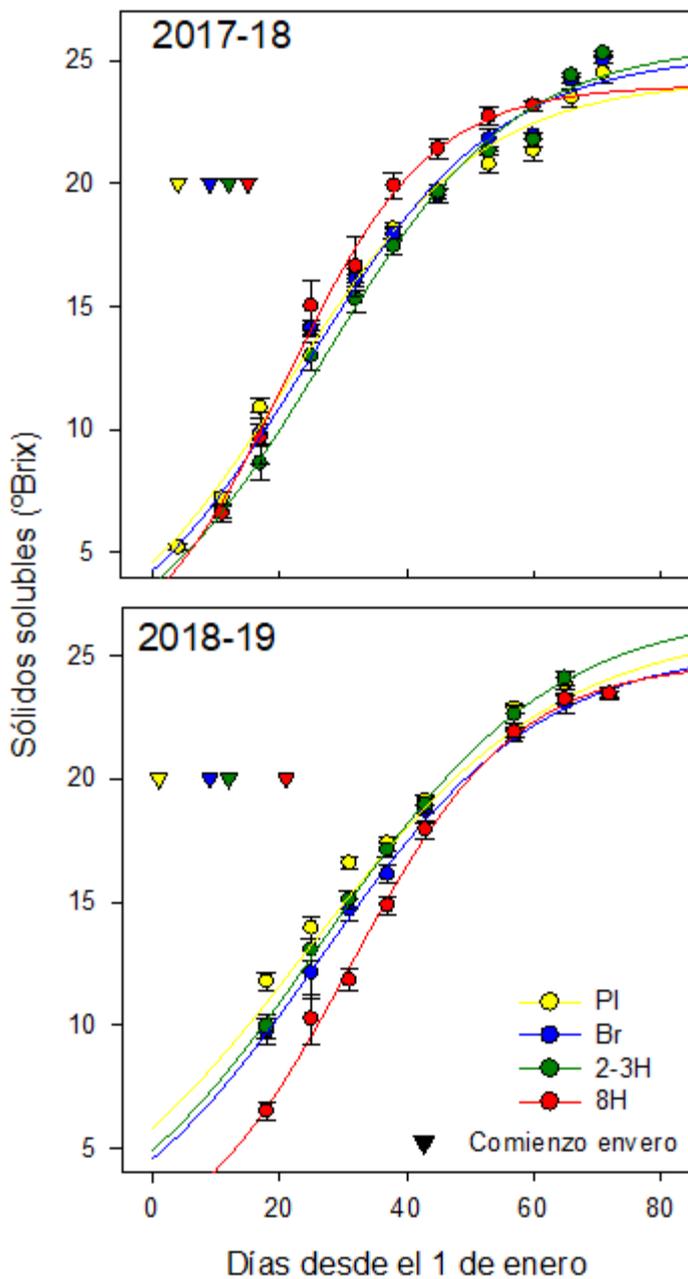


Figura 7. Progresión de sólidos solubles totales (°Brix) de plantas de Malbec podadas en invierno (PI, ●), en brotación (Br, ●), con 2-3 hojas (2-3H, ●) y con 8 hojas desenvueltas (8H, ●) a partir del 1 de enero durante las temporadas 2017-18 y 2018-19. Los valores son medias \pm error estándar. El ▼ indica el comienzo del envero para cada tratamiento.

Tabla 3: Valores de F de comparando los ajustes de los sólidos solubles respecto a la fecha de muestro. El análisis estadístico se realizó para comparar las fechas de poda sobre la acumulación de sólidos solubles.

	2017-18				2018-19			
	PI	Br	2-3H	8H	PI	Br	2-3H	8H
PI		3,1 *	10,3 *	6,0 *		18,4 *	11,2 *	82,6 *
Br			4,2 *	5,3 *			4,2 *	16,9 *
2-3H				10,5 *				36,7 *
8H								

*: Modelos distintos ($F_{muestral} > F_{tabla}$, para un p valor de 0.05)

ns: Modelos similares ($F_{muestral} < F_{tabla}$, para un p-valor de 0.05)

Debido al retraso en el inicio de sólidos solubles, se realizaron regresiones entre la cantidad de azúcar por baya y los días transcurridos desde el comienzo de acumulación y los grados-día acumulados desde ese momento para evaluar la carga de azúcar en la baya (Figura 8). Para distinguir entre las curvas, se ajustaron con una función de tipo sigmoide y se compararon utilizando una prueba de F (Tabla 4). Los parámetros de la curva y las estimaciones realizadas a partir de ellos se muestran en la Tabla 4.

Durante las dos temporadas, la acumulación de sólidos solubles totales (SST) fue más rápida para los tratamientos de poda tardía (Tabla 5, Figura 8 A y C). Las plantas podadas en invierno alcanzaron 20 °Brix en promedio 30 d después del inicio de acumulación de SST, mientras que los tratamientos Br, 2-3H y 8H alcanzaron este valor 27, 26 y 21 d después del inicio de acumulación de SST. El objetivo de cosecha fue 23 °Brix, que se logró 48, 42, 38 y 37 d después del inicio de acumulación de SST para PI, Br, 2-3H y 8H, respectivamente. Esto indica que el período de madurez (i.e. 10 a 23 °Brix) fue más corto para los tratamientos de poda tardía, especialmente para 2-3H y 8H, para las temporadas 2017-18 y 2018-19 (Figura 6).

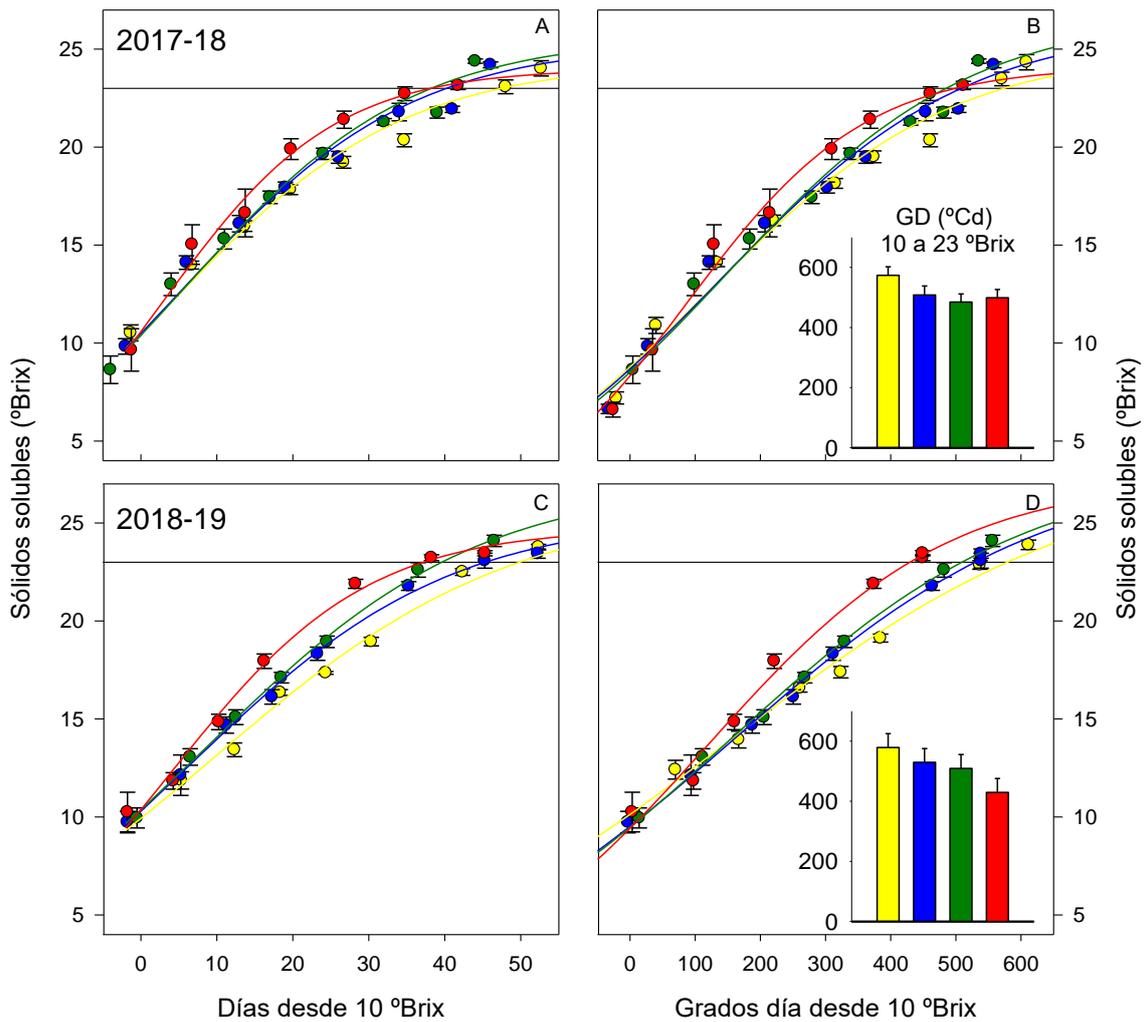


Figura 8. Regresiones entre sólidos solubles y días transcurridos desde el comienzo de acumulación (A y C) y regresiones entre sólidos solubles y grados día acumulados desde ese momento (B y D) para las temporadas 2017-18 (A y B) y 2018-19 (C y D). Los valores son medias de 4 repeticiones \pm error estándar de cada fecha de muestreo. Las líneas suavizadas corresponden a las curvas ajustadas para plantas de Malbec podadas en invierno (PI, ●), en brotación (Br, ●), con 2-3 hojas (2-3H, ●) y con 8 hojas desenvueltas (8H, ●). Los gráficos de barra representan los grados día acumulados desde el inicio de acumulación de sólidos solubles y los 23 °Brix.

Tabla 4: Valores de F de comparando los ajustes de los sólidos solubles respecto a la fecha de comienzo de acumulación y la temperatura acumulada desde ese momento. El análisis estadístico se realizó para comparar las fechas de poda sobre la acumulación de sólidos solubles.

Sólidos solubles desde el comienzo de su acumulación									
2017-18					2018-19				
	PI	Br	2-3H	8H	PI	Br	2-3H	8H	
PI		4,1 *	6,2 *	8,1 *		5,9 *	14,7 *	34,9 *	
Br			0,6 ns	4,9 *			2,5 ns	10,0 *	
2-3H				3,5 *				6,6 *	
8H									

Sólidos solubles respecto a la temperatura acumulada desde el comienzo de su acumulación									
2017-18					2018-19				
	PI	Br	2-3H	8H	PI	Br	2-3H	8H	
PI		3,6 *	6,4 *	7,5 *		2,8 *	6,2 *	30,5 *	
Br			0,8 ns	4,9 *			0,6 ns	15,0 *	
2-3H				3,8 *				11,0 *	
8H									

*: Modelos distintos ($F_{muestral} > F_{tabla}$, para un p valor de 0.05)

ns: Modelos similares ($F_{muestral} < F_{tabla}$, para un p-valor de 0.05)

Tabla 5: Parámetros de las curvas ajustadas de la Figura 8 A y C, que describen la acumulación de azúcar para las temporadas 2017-18 y 2018-19 para las plantas podadas en invierno, brotación, 2-3 hojas y 8 hojas. La diferencia significativa entre los tratamientos se indica con letras diferentes ($P < 0.05$ por la prueba de Fisher).

Fecha de poda	SS _{max} (°Brix)	x ₀ (d)	b (d)	Transición	Pendiente	Duración madurez (d)
2017-18						
Poda invernal	24,5 ± 0,3 bc	4,4 ± 0,3 b	15,1 ± 0,4 a	33,1 ± 0,8 a	0,4 ± 0,0 b	50,2 ± 2,5 a
Brotación	25,4 ± 0,3 ab	5,4 ± 0,3 a	15,3 ± 0,4 a	33,6 ± 0,8 a	0,4 ± 0,0 b	40,2 ± 2,2 b
2-3 hojas	25,7 ± 0,3 a	5,8 ± 0,3 a	15,1 ± 0,4 a	33,1 ± 0,8 a	0,4 ± 0,0 b	38,2 ± 2,2 b
8 hojas	24,1 ± 0,3 c	3,1 ± 0,3 c	11,6 ± 0,4 b	25,4 ± 0,8 b	0,5 ± 0,0 a	38,5 ± 2,2 b
p-valor	0,0082	0,0003	<0.0001	<0.0001	<0.0001	0,0018
2018-19						
Poda invernal	27,7 ± 0,5 a	14,5 ± 1,4 a	23,3 ± 1,7 a	51,1 ± 2,5 a	0,3 ± 0,0 c	54,5 ± 2,2 a
Brotación	25,3 ± 0,5 b	6,5 ± 1,4 bc	17,0 ± 1,7 b	39,2 ± 2,5 b	0,3 ± 0,0 b	46,0 ± 2,2 b
2-3 hojas	26,9 ± 0,5 a	8,7 ± 1,4 b	17,9 ± 1,7 b	37,3 ± 2,5 b	0,4 ± 0,0 b	41,0 ± 2,2 b
8 hojas	24,8 ± 0,5 b	4,2 ± 1,4 c	12,9 ± 1,7 c	28,3 ± 2,5 c	0,4 ± 0,0 a	37,6 ± 2,2 c
p-valor	0,0055	0,0020	0,0033	<0.0001	0,0012	0,0013

Dentro de cada parámetro y cada temporada, letras diferentes implican una diferencia estadística entre tratamientos (p -valor < 0.05 para la prueba de Fischer).

Al graficar las trayectorias de acumulación de SS y los grados día acumulados a partir del comienzo de acumulación del SST (Figura 7, B y D), puede verse que las mismas son casi iguales a las regresiones proyectadas respecto al día de ocurrencia del comienzo de acumulación del SST. La excepción es la primera porción de las curvas de las podas realizadas en brotación y con 2-3 hojas, que se solapan a la invernal en la temporada 2018-19. Los GD acumulados entre 10 y 23 °Brix (i.e. objetivo de cosecha) fueron menores para los tratamientos de poda tardía (gráfico de barras, Figura 8). No obstante, los grados día por día fueron similares entre los tratamientos, lo que indica que la temperatura durante el período de acumulación de azúcar en la baya fue similar para todos los tratamientos (Tabla 6).

La menor duración del periodo de madurez de las plantas podadas tardíamente estuvo relacionada a una mayor velocidad de acumulación de azúcar (Figura 9, C). A su vez,

la pendiente de acumulación de SS y la duración de la madurez estuvieron relacionadas con la relación hoja fruto (Figura 9, A y B).

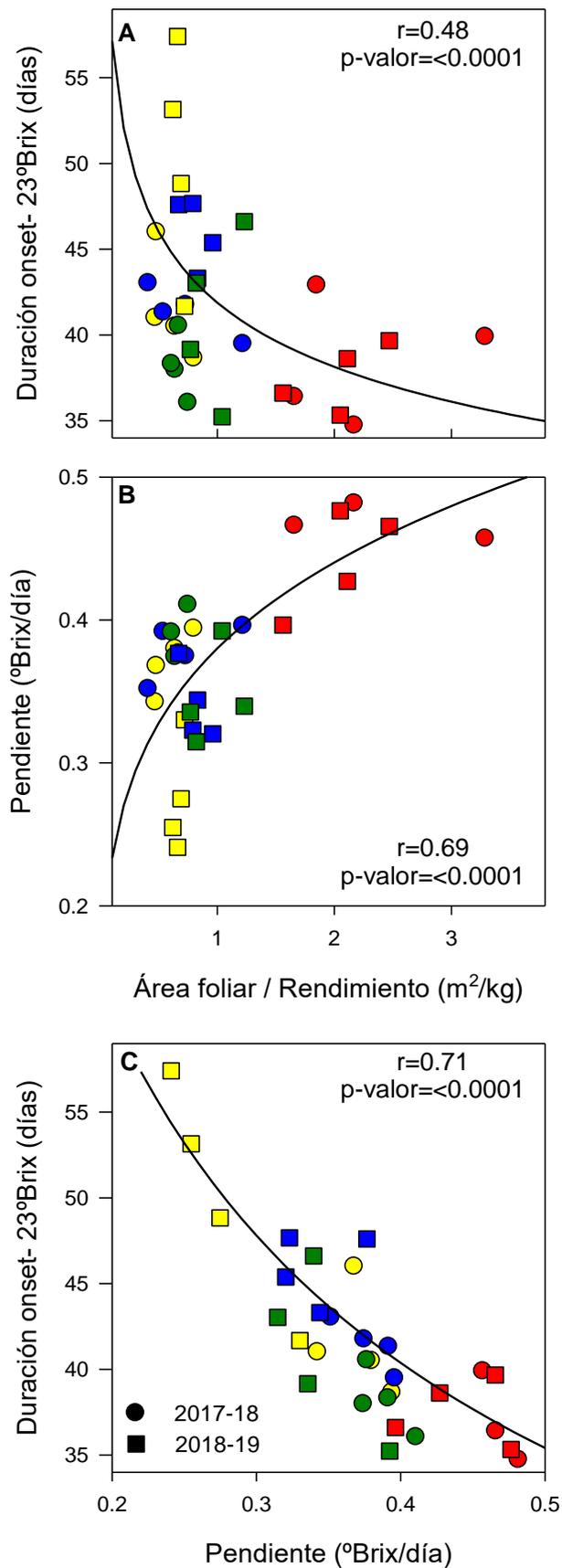


Figura 9. Regresiones entre la máxima pendiente (A) y la duración de la acumulación de Sólidos solubles (i.e. de 10 a 23°Brix) (B) respecto a la relación de área foliar y

rendimiento y regresión entre la duración de la madurez y la pendiente (C), para las temporadas 2017-18 (●) y 2018-19 (■). Los valores son medias de 4 repeticiones. Las líneas suavizadas corresponden a las curvas ajustadas para plantas de Malbec podadas en invierno (PI, ●), en brotación (Br, ●), con 2-3 hojas (2-3H, ●) y con 8 hojas desenvueltas (8H, ●).

De manera general, mientras más tardía es la fecha de poda, menor es la duración del ciclo para las tres temporadas consideradas (Tabla 6). Las plantas podadas en Br presentaron un ciclo de aproximadamente 10 días más corto que las plantas control, mientras que las plantas podadas con 2-3H tuvieron un ciclo 13-17 días más corto. Las plantas podadas en 8H acortaron su ciclo entre 25 y 40 días en comparación con las plantas control lo que determinó que los grados día acumulados a lo largo del ciclo fuera menores para los tratamientos de poda tardía. Las plantas control acumularon 20, 50 y 100 °Cd (GD) más que los tratamientos Br, 2-3H y 8H respectivamente. Por otro lado, la media diaria de los grados día (GDD, cuyas unidades son °Cd d⁻¹) durante las primeras etapas fenológicas (desde la brotación hasta la floración) fue mayor para los tratamientos de poda tardía. Esto indica que estos tratamientos estuvieron sometidos a temperaturas más altas durante estas etapas, lo cual está relacionado con la aceleración del ciclo fenológico en estas primeras etapas hasta floración. Desde la floración hasta el envero y desde el envero hasta la cosecha, no se observaron diferencias en los grados día diarios, indicando que la temperatura durante esta etapa fue similar para todos los tratamientos.

Tabla 6. Duración del ciclo (días), grados día de crecimiento acumulados (GD), grados día diario (GDD, °Cd d⁻¹) para diferentes períodos fenológicos y para toda la temporada para plantas Malbec podadas durante el invierno (PI), en brotación (Br), con 2-3 hojas (2-3H) y con 8 hojas expandidas (8H). 2018-2019 y 2020, Mendoza.

Fecha de poda	Duración del ciclo (d)	Grados-día acumulados (°Cd)	GD diarios del ciclo (°Cd d ⁻¹)	GD diarios (°Cd d ⁻¹)		
				Brotación-Floración	Floración-Envero	Envero-Cosecha
2017-18						
PI	171	1367,2	8,0	4,0	9,4	11,3
Br	160	1349,7	8,4	-	-	11,2
2-3h	153	1312,5	8,6	-	-	11,1
8h	131	1275,0	9,7	5,5	9,7	11,8
2018-19						
PI	165	1407,3	8,5	4,7	8,9	11,2
Br	159	1399,5	8,8	5,7	9,2	10,9
2-3h	150	1357,7	9,2	6,5	9,0	11,0
8h	140	1311,8	9,4	6,9	9,1	11,2
2019-20						
PI	157	1464,8	9,3	3,9	10,7	11,4
Br	146	1422,6	9,7	4,6	11,0	11,2
2-3h	144	1412,7	9,8	5,1	10,9	11,3
8h	132	1386,6	10,5	7,6	11,0	11,2

Crecimiento vegetativo

La longitud de los brotes primarios se midió durante las dos primeras temporadas (2017-18 y 2018-19) y los resultados mostraron que los tratamientos de poda tardía retrasaron el crecimiento de los brotes en comparación con las plantas podadas en invierno.

La evolución de la longitud de los brotes primarios respecto al tiempo (Figura 10), muestra que tanto en 2017-18, como en 2018-19, las fechas de poda realizadas en brotación y con 2-3 hojas no presentan diferencia estadística con las plantas podadas en invierno en la última fecha de muestreo, previa al despunte (21 de diciembre). Por otra parte, las plantas podadas con 8 hojas presentaron una longitud final menor a 1 metro de longitud. En este tratamiento, la longitud final del brote fue un 21% y 39 % menor, en el primer año y segundo año respectivamente, en comparación a los brotes primarios de las plantas podadas en invierno.

Durante la temporada 2017-18, los brotes de plantas podadas en brotación alcanzaron a los de las plantas testigo el 18 de octubre (16 días después de brotar), mientras que los brotes de las plantas podadas con 2-3 hojas lo hicieron el 22 de noviembre (35 días después de brotar). Durante 2018-19, el tratamiento Br alcanzó al de poda invernal el 29 de noviembre (56 días después de brotar y más de un mes tarde que el

primer año), mientras que el 2-3H lo hizo el último día de muestreo, el 21 de diciembre (64 días luego de la brotación y más de un mes después que el año anterior).

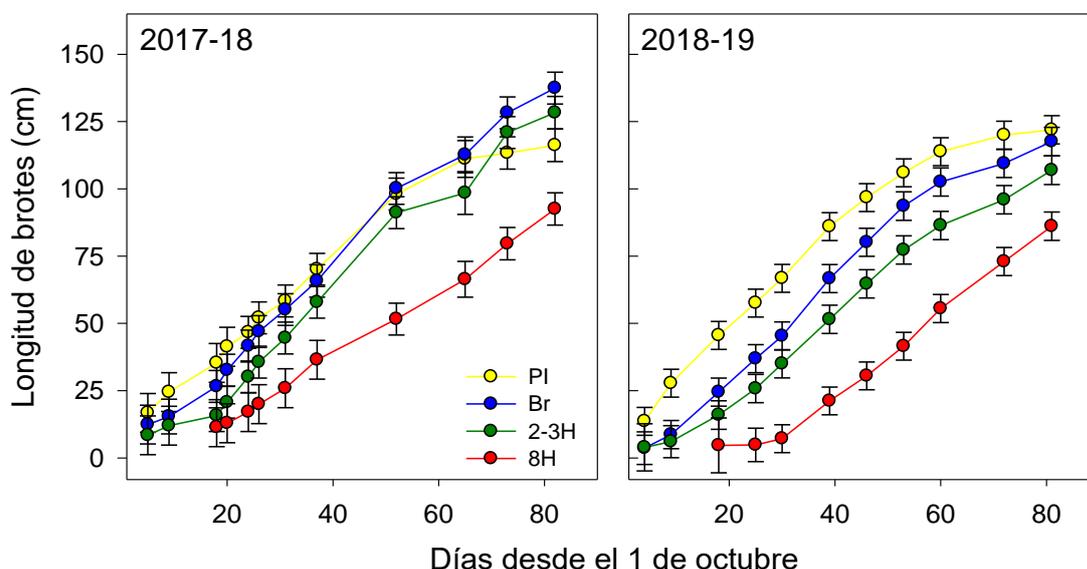


Figura 10. Longitud de brotes (cm) de plantas podadas en invierno (PI, ●), en brotación (Br, ●), con 2-3 hojas (2-3H, ●) y con 8 hojas desenvueltas (8H, ●), durante las temporadas 2017-18 y 2018-19 (desde el 1 de octubre). Cada punto representa la media \pm error estándar.

En la primera temporada el número de hojas por brote es similar entre tratamientos previo al despunte (21 de diciembre), mientras que en la segunda temporada sólo las plantas podadas en brotación alcanzan el mismo número de hojas que las plantas podadas en invierno (Figura 11).

Durante la temporada 2017-18 (Figura 11A), el número de hojas de las plantas podadas en brotación, alcanzaron a las de las plantas testigo el 18 de octubre (16 días después de brotar), al igual que sucedió con la longitud de brotes. Las plantas podadas con 2-3 hojas alcanzaron la misma cantidad de hojas que las plantas testigo 22 días después de brotar, el 31 de octubre. Esto ocurrió con una longitud de brotes 14 cm menor a las plantas podadas en invierno (i.e. 58,3 cm y 44,6 cm). Por último, las plantas podadas con 8 hojas alcanzaron la misma cantidad de hojas que el testigo el 21 de diciembre, previo al despunte, con brotes menores al metro de longitud (i.e. 79,9 cm).

Durante la segunda temporada (Figura 11B), sólo las plantas podadas en brotación llegan a tener el mismo número de hojas que las plantas podadas en invierno. Esto ocurre el 12 de diciembre, 13 días después de haber alcanzado la longitud de brotes de las plantas control. Por otra parte, los tratamientos 2-3H y 8H terminan con 2 y 4 hojas menos que PI hacia el final del muestreo.

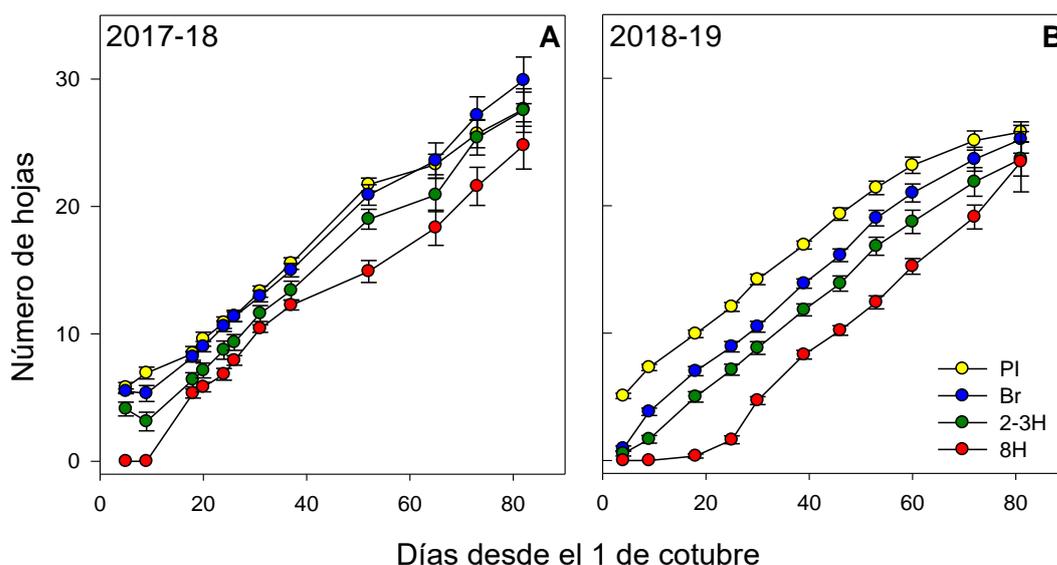


Figura 11. Número de hojas (N) de plantas podadas en invierno (PI, ●), en brotación (Br, ●), con 2-3 hojas (2-3H, ●) y con 8 hojas desenvueltas (8H, ●), durante las temporadas 2017-18 y 2018-19 (desde el 1 de octubre). Cada punto representa la media \pm error estándar.

Con el fin de determinar si la temperatura influyó en la longitud final de los brotes y en el número de hojas, se ajustaron regresiones respecto a los grados días acumulados (Figuras 12 y 13, respectivamente). Se ajustaron ecuaciones de grado dos para cada una de las temporadas, tanto para la longitud de brotes como para el número de hojas. Con los coeficientes se calculó la temperatura a la cual se alcanzaría el valor máximo de cada parámetro (vértice de la parábola).

Respecto a la evolución de la longitud de brotes (Figura 12), el tratamiento realizado con 8H presentó un menor crecimiento del brote respecto a la acumulación de la temperatura, para ambas temporadas. Según las ecuaciones obtenidas, las plantas hubiesen alcanzado los 100 cm de longitud de brote luego de la fecha del despunte, requiriendo para ello 145 y 200 °C de temperatura acumulada más que las plantas control.

Los tratamientos Br y 2-3H se comportaron diferentes según el año considerado, acumulando mayor temperatura durante la segunda temporada. Durante el primer año (Figura 12A), no hubo diferencia estadística entre los términos lineal y cuadrático de los tratamientos Br y 2-3H, respecto al invernadero. Esto determinó que los 100 cm de longitud se alcanzaran acumulando similar temperatura (i.e. aproximadamente 300 °Cd acumulados para los 3 tratamientos). Sin embargo, durante la segunda temporada (Figura 12B), los tratamientos de Br y 2-3H acumularon 70 y 145 °Cd más de temperatura acumulada respecto a PI para alcanzar 100 cm de longitud de brote.

Se calcularon los vértices de la parábola para ver si en el tiempo considerado el crecimiento del brote se estabilizaba. Puede observarse que sólo las plantas podadas en invierno estabilizaron su crecimiento, alcanzando la máxima longitud de brote en el tiempo considerado (i.e. previo al despunte). Por otra parte, hacia la última fecha de muestreo, los brotes de las plantas podadas en brotación y con 2-3 hojas mantenían su crecimiento activo, ambas temporadas.

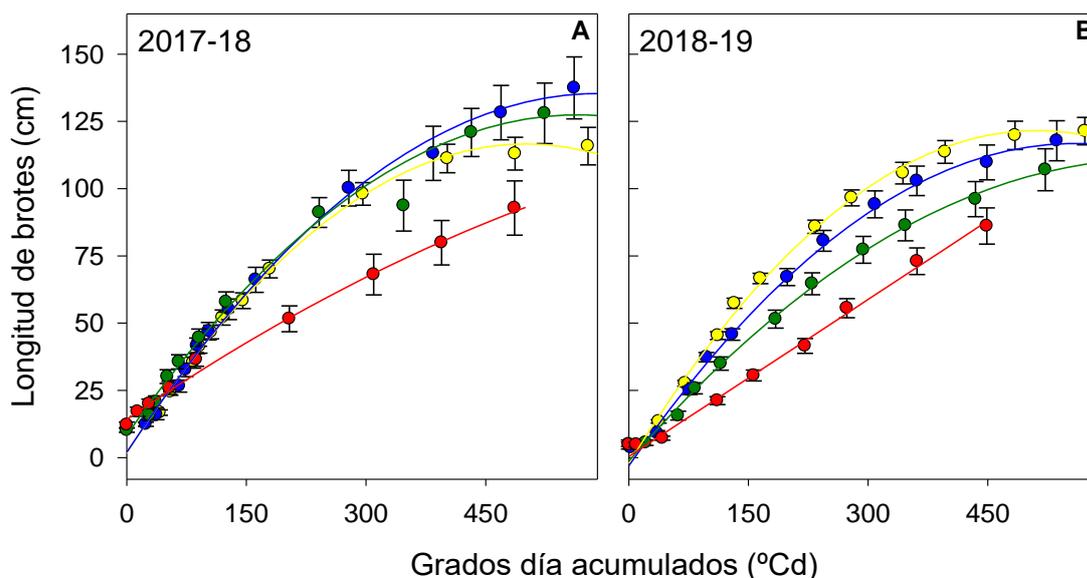


Figura 12. Longitud de brotes (cm) de plantas podadas en invierno (●), en brotación (●), con 2-3 hojas (●) y con 8 hojas desenvueltas (●), durante las temporadas 2017-18 y 2018-19 (desde el 1 de octubre), respecto a los grados día acumulados(°Cd) para cada tratamiento. Cada punto representa la media \pm error estándar.

En la evolución del número de hojas respecto a los grados día (Figura 13), la temperatura acumulada necesaria para alcanzar el máximo número de hojas fue mayor para las podas tardías. Sin embargo, este valor ocurrió después del despunte, ambas temporadas para las podas tardías.

Al igual que la evolución de la longitud de brotes respecto a los grados días, la respuesta de los tratamientos varió con la temporada considerada. Durante 2017-18 (Figura 13A), al final del muestreo, las plantas testigo tenían un promedio de 26 hojas por brote. Este mismo valor fue alcanzado con 135 y 115 °Cd menos para las plantas podadas en Br y con 2-3H, respectivamente. Según la regresión obtenida, las plantas de 8H alcanzarían las 26 hojas con acumulando la misma temperatura que el testigo (i.e. 570 °C). Por otra parte, durante 2018-19 (Figura 13B), mientras que las plantas podadas en brotación acumularían 55 °Cd más que el testigo para obtener la misma cantidad de hojas (i.e. 25,8), las plantas podadas con 2-3H y con 8H alcanzaron un

máximo de 24.9 y de 24 hojas por brote, acumulando para ello aproximadamente 100 °Cd más que las plantas control.

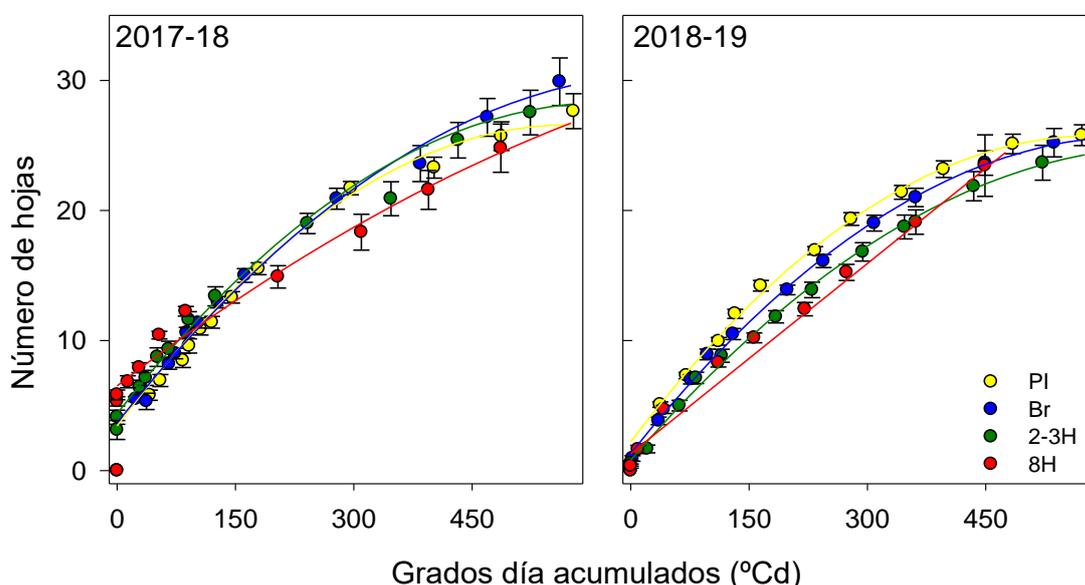


Figura 13. Número de hojas de plantas podadas en invierno (●), en brotación (●), con 2-3 hojas (●) y con 8 hojas desenvueltas (●), durante las temporadas 2017-18 y 2018-19 (desde el 1 de octubre), respecto a los grados día acumulados (°Cd) para cada tratamiento. Cada punto representa la media \pm error estándar.

Finalmente, la longitud de los brotes y el número de hojas también varió con la temporada, es decir, la longitud de los brotes y el número de hojas de todos los tratamientos de poda tardía disminuyeron en la segunda temporada, mientras que las plantas control mantuvieron sus valores. Con el fin de determinar si la temperatura influyó en la longitud final de los brotes, se ajustaron regresiones entre los grados-día y la longitud de los brotes y el número de hojas para cada fecha de poda y año por separado (Figura 14).

Las regresiones se superpusieron comparando ambas temporadas para PI y no mostraron diferencias en el crecimiento de los brotes entre los dos años ($p = 0,1402$), aunque el segundo año presentó menor cantidad de hojas ($p=0,0162$). Las plantas podadas en brotación y con 2-3 hojas presentaron una menor longitud de brotes y una menor cantidad de hojas durante el segundo año. Por último, las plantas podadas con 8 hojas presentaron, al momento del despunte del segundo año, similar longitud de brotes y de número de hojas entre ambas temporadas, requiriendo para ello unos 100 °Cd más que el primer año.

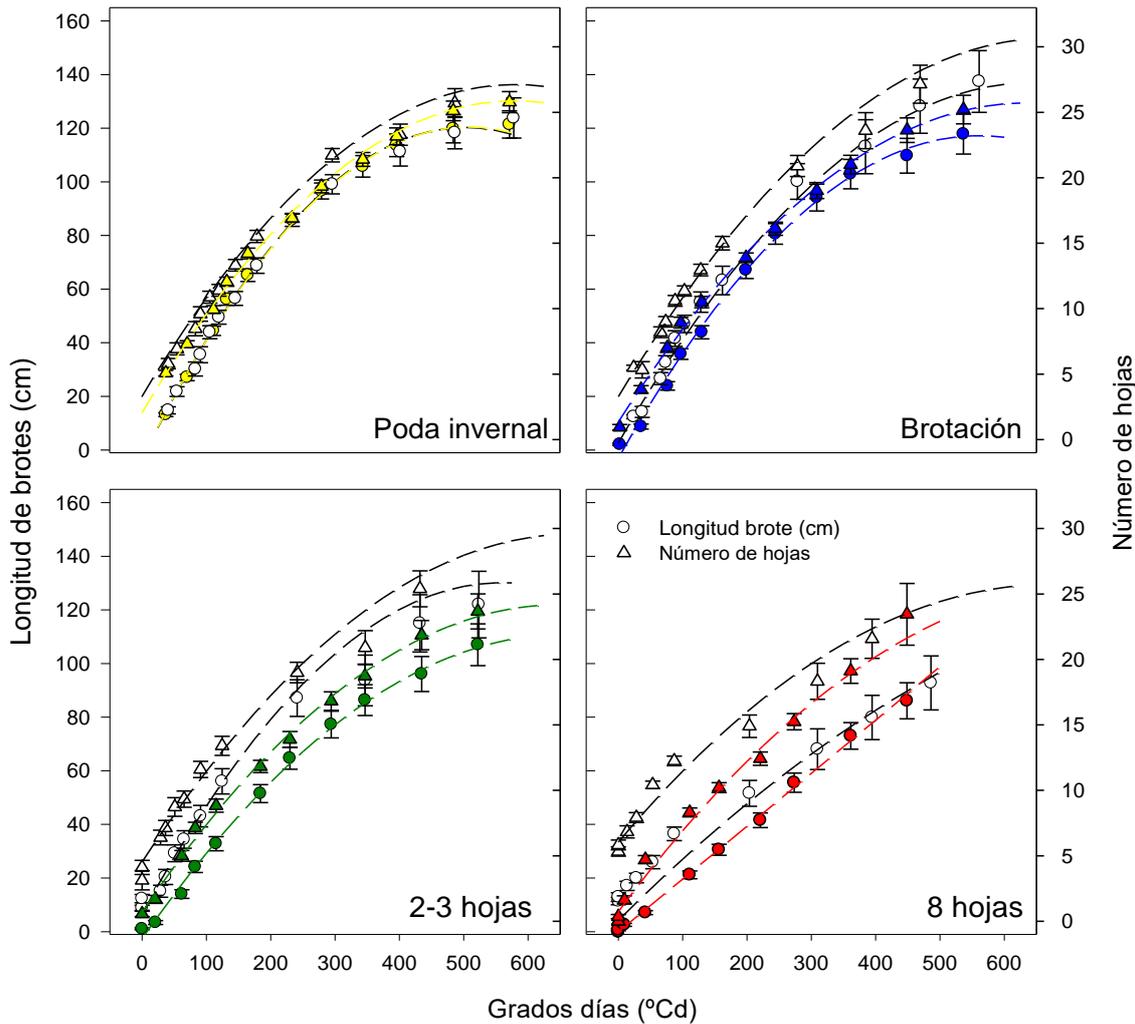


Figura 14. Evolución de la longitud de los brotes (●) y del número de hojas (▲) en función de los grados-día (°Cd) desde brotación durante las temporadas 2017-18 (símbolos vacíos) y 2018-19 (símbolos rellenos) en plantas de Malbec podadas en invierno, en brotación, con 2-3 hojas separadas y con 8 hojas separadas. Cada punto representa la media \pm error estándar. La regresión ajustada para cada tratamiento y cada año corresponde a la ecuación obtenida con los valores de efectos fijos de cada modelo.

Como se muestra en la Tabla 7, no se observaron efectos significativos sobre el área foliar total (AFT) y el área foliar primaria, aunque las plantas podadas a 8H presentaron mayor área foliar secundaria. Tampoco se registraron diferencias en el peso seco de poda, aunque este fue mayor el segundo año del ensayo. Finalmente, luego de 3 años de podar tardíamente las mismas plantas, el peso de poda invernall de las mismas no registró diferencias estadísticas.

Tabla 7. Área foliar total, primaria, secundaria y peso de poda en plantas de Malbec podadas durante el invierno (PI), en brotación (Br), con 2-3 hojas (2-3H) y con 8 hojas expandidas (8H), en dos temporadas del experimento. En la misma columna, letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos o temporada ($P < 0.05$ por la prueba de Fisher).

Fecha de poda	Área foliar total (m ²)	Área foliar primaria (m ²)	Área foliar secundaria (m ²)	Peso de poda seco (kg)	Peso de poda fresco (kg)
PI	5,9 ± 0,4	4,0 ± 0,2	1,8 ± 0,1 b	0,41 ± 0,0	0,8 ± 0,1
Br	7,0 ± 0,8	4,5 ± 0,4	2,5 ± 0,3 ab	0,46 ± 0,0	1,0 ± 0,1
2-3h	6,0 ± 0,3	3,8 ± 0,2	2,2 ± 0,1 b	0,41 ± 0,0	0,8 ± 0,1
8h	6,7 ± 0,6	4,1 ± 0,4	2,6 ± 0,2 a	0,38 ± 0,0	0,7 ± 0,1
p-value	0,2880	0,6106	0,0111	0,2232	0,0737
Temporada					
2017-18	5,0 ± 0,4 b	2,9 ± 0,2 b	1,8 ± 0,1 b	0,35 ± 0,0 b	
2018-19	7,8 ± 0,3 a	5,0 ± 0,2 a	2,7 ± 0,1 a	0,48 ± 0,0 a	
p-value	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	
Interacción					
	0,4801	0,0528	0,9539	0,3968	

Dentro de cada parámetro y cada temporada, letras diferentes implican una diferencia estadística entre tratamientos (p-valor <0.05 para la prueba de Fischer).

Se determinó la evolución del índice de área foliar (IAF) desde el 1 de octubre hasta cosecha (Figura 15A). Como puede verse, se produjo un atraso en el crecimiento de la planta, tal como sucedió con la longitud de brotes y el número de hojas (figuras 5 y 6). No obstante, el valor final de IAF es similar para todos los tratamientos. Las plantas podadas con 2-3 hojas alcanzan a las plantas testigo a comienzos de diciembre, mientras que las podadas con 8 hojas lo hacen a comienzos de enero.

El mayor valor inicial, seguido por un menor valor observado a los 70 días aproximadamente para todos los tratamientos correspondió a la subida del alambre para posicionar verticalmente los brotes y conducir la canopia. Los primeros valores del tratamiento 8H, más elevados que el resto, corresponden al periodo en el cual las plantas aún no habían sido podadas.

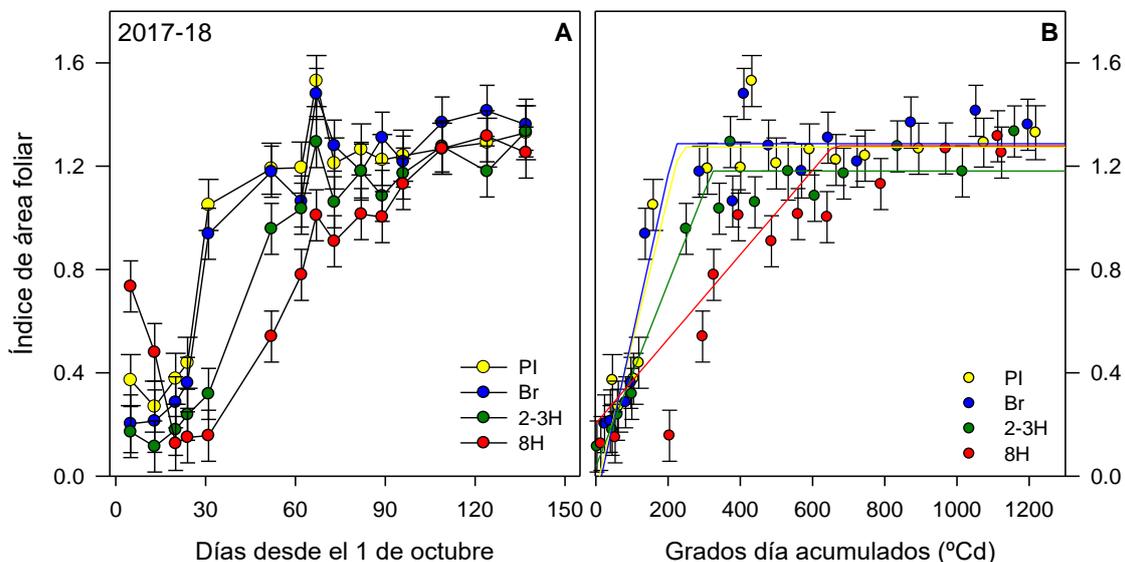


Figura 15. Evolución del índice de área foliar desde el 1 de octubre a cosecha (A) y evolución del índice de área foliar respecto a los grados días acumulados ($^{\circ}\text{Cd}$) desde brotación para la temporada 2017-18 (B) en plantas de Malbec podadas en invierno (●), en brotación (●), con 2-3 hojas (●) y con 8 hojas desenvueltas (●). Cada punto representa la media \pm error estándar. Las líneas suavizadas corresponden a la regresión de dos tramos con "plateau" ajustada para cada tratamiento.

Para evaluar el efecto de la temperatura sobre la evolución del índice de área foliar de la primera temporada, se ajustaron regresiones de dos tramos con "plateau" para cada tratamiento (Figura 15B). Como puede verse, el IAF final alcanzado por los tratamientos es similar, aunque las plantas podadas con 2-3H y con 8H acumularon 88 y 424 $^{\circ}\text{Cd}$ más que PI, respectivamente para alcanzar dicho valor. Las plantas podadas con 2-3 hojas equiparan a las plantas testigo con 322 $^{\circ}\text{Cd}$ (i.e. fines de noviembre), mientras que las plantas podadas con 8 hojas lo hacen con 658 $^{\circ}\text{Cd}$ (i.e. comienzos de enero).

Coeficiente de cultivo (K_c) y evapotranspiración (E_{Tc})

El coeficiente de cultivo se estimó a través del área de sombra proyectada por la canopia al mediodía. El K_c máximo alcanzado durante el ciclo fue el mismo para todos los tratamientos para cada temporada. La evolución de K_c siguió un patrón similar durante ambas temporadas, pero fue mayor en la segunda temporada que en la primera, ya que el área foliar fue mayor esa temporada (Tabla 7). El valor máximo (0,8) alcanzado durante 2018-19 fue superior al máximo observado durante 2017-18 (0,65). Si bien todos los tratamientos alcanzaron el mismo valor máximo de K_c , la fecha en que se alcanzó este valor máximo varió entre tratamientos (Figura 16). Durante 2017-18 (figura 16A), las plantas podadas en 2-3H alcanzaron el valor máximo de K_c unos 20 días más tarde que PI y Br, mientras que las plantas podadas en 8H alcanzaron su máximo unos 40 días después que las plantas control y Br. Durante la temporada 2018-19 (figura 16B), el valor máximo de K_c se alcanzó unos 7, 20 y 40 días después en Br, 2-3H y 8H, respectivamente. Los valores más altos de 8H al inicio del ciclo correspondieron al desarrollo inicial de la canopia, cuando las plantas aún no estaban podadas.

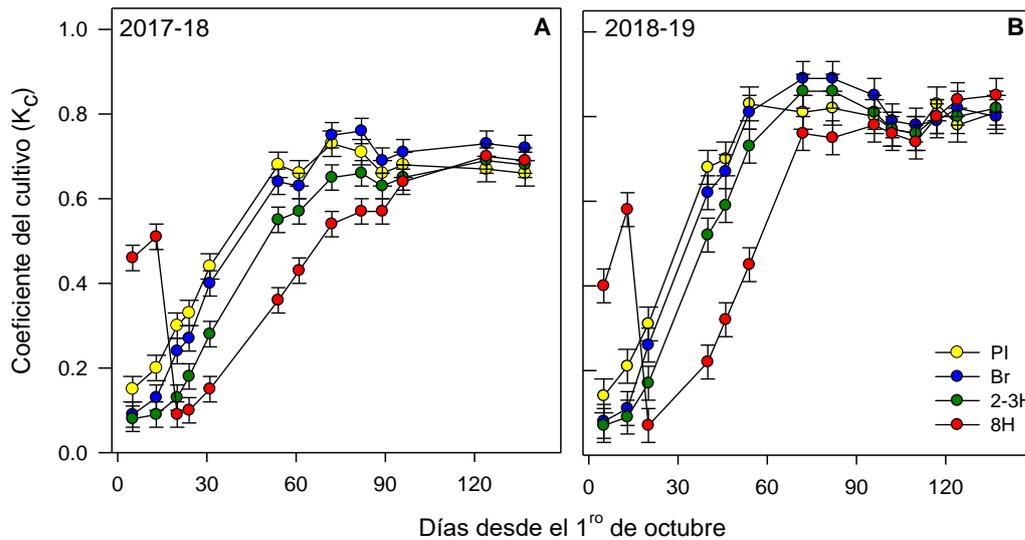


Figura 16. Evolución estacional del coeficiente de cultivo desde la brotación hasta mediados de febrero durante las temporadas 2017-18 (A) y 2018-19 (B). Los valores son medias de 4 repeticiones \pm error estándar.

Se ajustaron regresiones entre los grados-día acumulados y el coeficiente de cultivo para determinar el efecto de la temperatura a lo largo de cada temporada (Figura 17). Se observó un aumento lineal de K_c para todos los tratamientos hasta el máximo y a partir de entonces se mantuvo estable, por lo que se ajustaron regresiones en dos tramos con “plateau”. Para distinguir entre las curvas, se compararon utilizando una prueba de F (Tabla 8). La Tabla 9 presenta la comparación de los parámetros. Las pendientes de la regresión del primer tramo lineal fueron menores para los tratamientos de 2-3H y 8H para ambas temporadas ($p < 0,05$).

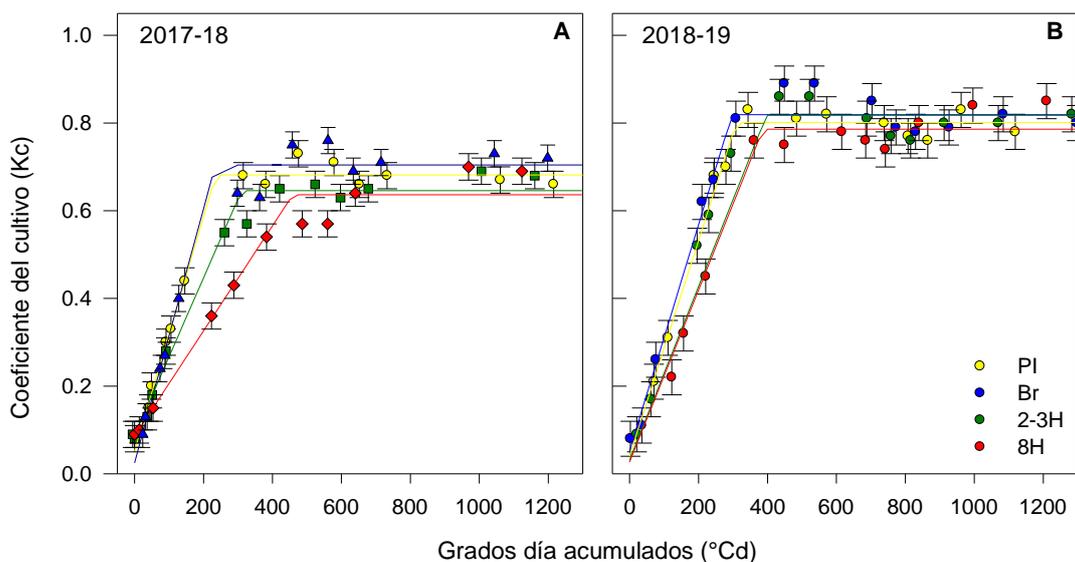


Figura 17. Evolución del coeficiente de cultivo desde la brotación hasta mediados de febrero durante las temporadas 2017-18 (A) y 2018-19 (B), respecto a los grados día acumulados (°Cd). Las líneas representan la evolución modelada de dos tramos con “plateau” correspondiente al valor máximo. Los valores son medias de 4 repeticiones \pm error estándar.

Tabla 8: Valores de F de comparando los ajustes del coeficiente del cultivo (K_c) respecto al tiempo térmico (°Cd). El análisis estadístico se realizó para comparar las fechas de poda según la evolución de K_c respecto al tiempo térmico.

	2017-18				2018-19			
	PI	Br	2-3H	8H	PI	Br	2-3H	8H
PI		0,9 ns	10,0 *	29,5 *		2,0 ns	0,5 ns	6,4 *
Br			12,0 *	20,5 *			1,3 ns	7,2 *
2-3H				8,4 *				4,6 *
8H								

*: Modelos distintos ($F_{muestral} > F_{tabla}$, para un p valor de 0,05)

ns: Modelos similares ($F_{muestral} < F_{tabla}$, para un p-valor de 0,05)

Tabla 9. Parámetros de la evolución del coeficiente del cultivo (K_c) respecto al tiempo térmico (°Cd) de la Figura 15 para las temporadas 2017-18 y 2018-19 para las plantas podadas en invierno, brotación, 2-3 hojas y 8 hojas. La diferencia significativa entre los tratamientos se indica con letras diferentes ($P < 0,05$ por la prueba de Fisher).

Fecha de poda	K_{c0}	Tasa (°Cd ⁻¹)	GD para K_c máximo (°Cd)
Poda invernal	0.0 \pm 0.0	0.002 \pm 0.0 a	287.0 \pm 16.4 c
Brotación	0.1 \pm 0.0	0.002 \pm 0.0 ab	315.8 \pm 16.4 bc
2-3 hojas	0.1 \pm 0.0	0.002 \pm 0.0 b	342.8 \pm 16.4 b
8 hojas	0.1 \pm 0.0	0.002 \pm 0.0 c	446.4 \pm 16.4 a
p-valor	0.3281	0.0004	<0.0001
Temporada			
2017-18	0.1 \pm 0.0 a	0.002 \pm 0.0 b	360.6 \pm 11.6
2018-19	0.0 \pm 0.0 b	0.002 \pm 0.0 a	335.4 \pm 11.6
p-value	<0.0001	0.0005	0.1402
Interaction	0.3242	0.0938	0.0118

Dentro de cada parámetro y cada temporada, letras diferentes implican una diferencia estadística entre tratamientos (p -valor < 0.05 para la prueba de Fischer).

Para conocer el efecto de la temperatura sobre la evolución del K_c entre temporadas, se ajustaron regresiones de dos tramos con “plateau” para cada temporada y cada tratamiento (Figura 18). Tal como se vio en la figura 14, el segundo año se alcanzó un mayor valor de K_c para todos los tratamientos. Sin embargo, el requerimiento térmico para alcanzar el máximo valor fue menor para las últimas dos podas tardías. Las plantas testigo y las podadas en brotación alcanzaron un K_c mayor el segundo año, acumulando para ello 74 y 69 °Cd más durante la segunda temporada, respectivamente (Figura 18 A y B). Esto implicó una acumulación diaria de temperatura similar entre los años para estos tratamientos. Por otra parte, las plantas podadas con 2-3 hojas y con 8 hojas acumularon mayor temperatura diaria la segunda

temporada. Esto llevó a que las plantas 2-3H alcanzaran un K_c 0,17 mayor la segunda temporada, acumulando sólo 14 °Cd más; mientras que las plantas 8H llegaron al K_c máximo con 84 °Cd menos que la primera temporada.

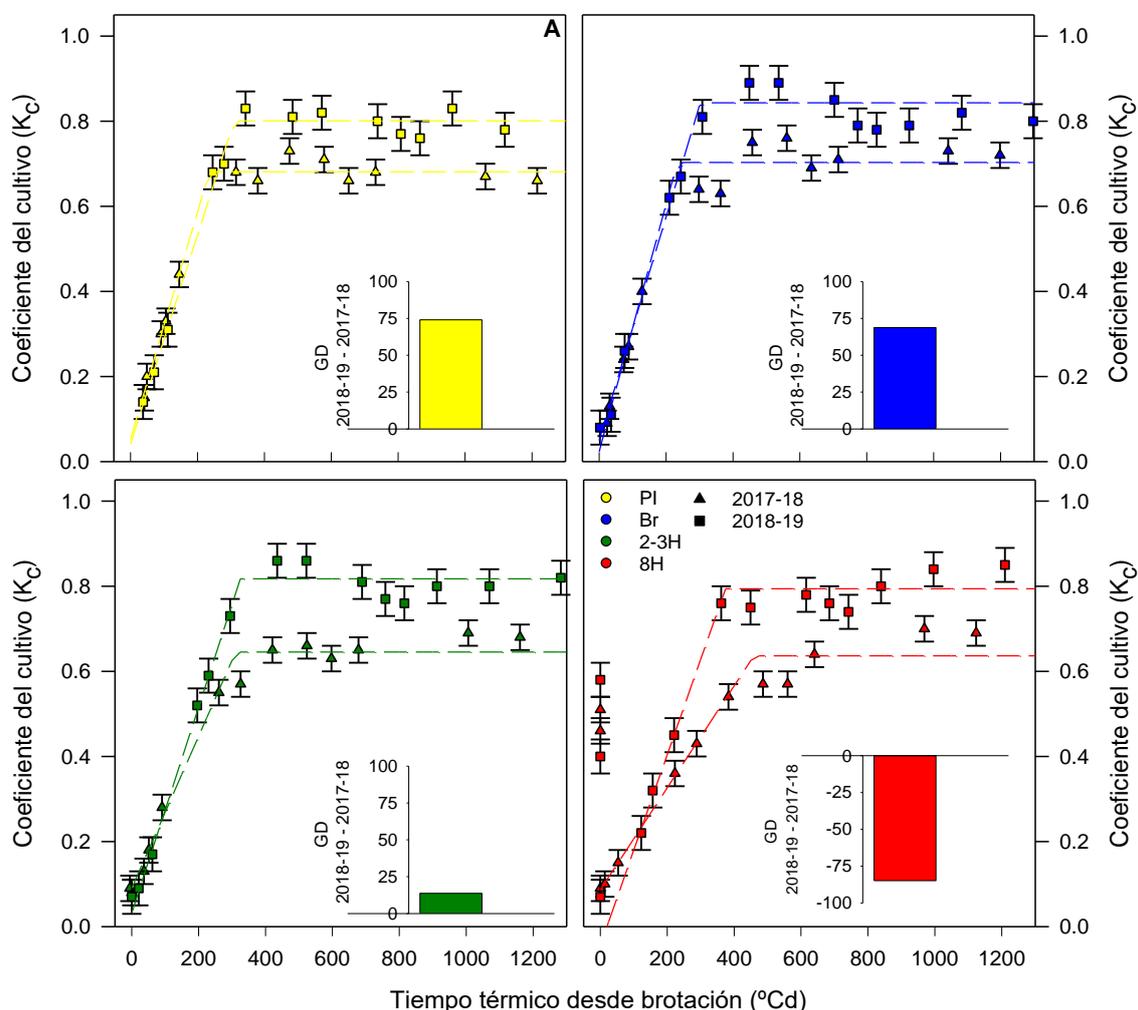


Figura 18. Evolución del coeficiente de cultivo para cada tratamiento desde la brotación hasta mediados de febrero durante las temporadas 2017-18 (▲) y 2018-19 (■), respecto al tiempo térmico desde brotación. Las líneas representan la evolución modelada de dos tramos con “plateau”, correspondiente al valor máximo. Los valores son medias de 4 repeticiones \pm error estándar. Los gráficos de barra representan la diferencia de GD para llegar al máximo valor de K_c de una temporada a la otra.

Debido a que el coeficiente del cultivo y el índice de área foliar presenta una alta correlación (de Medeiros et al., 2000; Netzer et al., 2009), se ajustó una regresión de grado dos entre estos dos parámetros (Figura 19) con un R^2 de 0,91. Como puede verse, el coeficiente de cultivo es similar entre tratamientos con valores de IAF iguales o mayores a 1,3. Este valor coincide con el de la Figura 13, a partir del cual el IAF se estabiliza hasta la cosecha y es similar entre tratamientos.

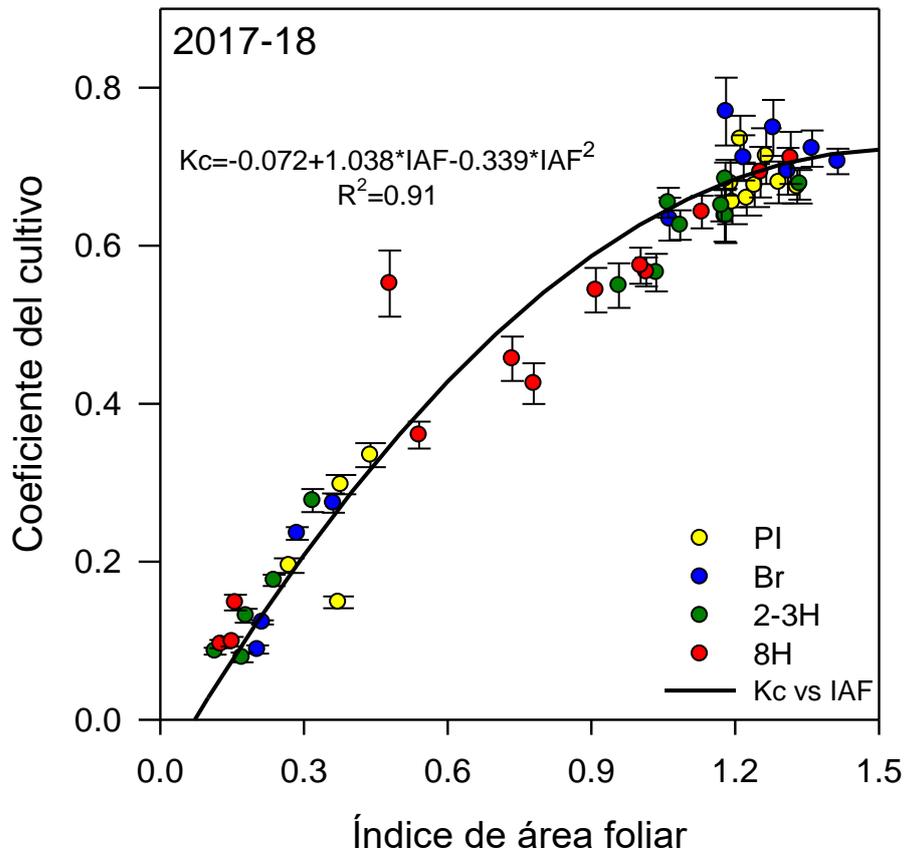


Figura 19. Regresión entre el coeficiente de cultivo estimado y el Índice de área foliar. La línea gruesa representa la ecuación de grado dos ajustada para el modelo.

La evapotranspiración acumulada del cultivo (ET_c) se calculó con los valores estimados de K_c y la evapotranspiración de referencia (Figura 20), desde el 1 de octubre hasta mediados de marzo (170 días). La menor duración del ciclo y el menor desarrollo de la canopia en los tratamientos más tardíos resultó en una reducción del K_c y, por lo tanto, en una reducción del consumo anual de agua para estos dos tratamientos. Para ambas temporadas, las plantas podadas en 2-3H y 8H presentaron valores más bajos de ET_c que PI y Br. En 2017-18, la ET_c fue de 564 mm en las plantas control y Br, mientras que para 2-3H y 8H, ET_c fue de 509 y 489 mm, respectivamente. En 2018-19, la ET_c fue de 653 mm en las plantas testigo y Br, mientras que las plantas podadas en 2-3H y 8H presentaron una ET_c de 623 mm y 581 mm, respectivamente. Los inset de la Figura 18 muestran que, antes de podarse, las plantas que se podaron con 8 hojas presentaban mayores valores de ET_c .

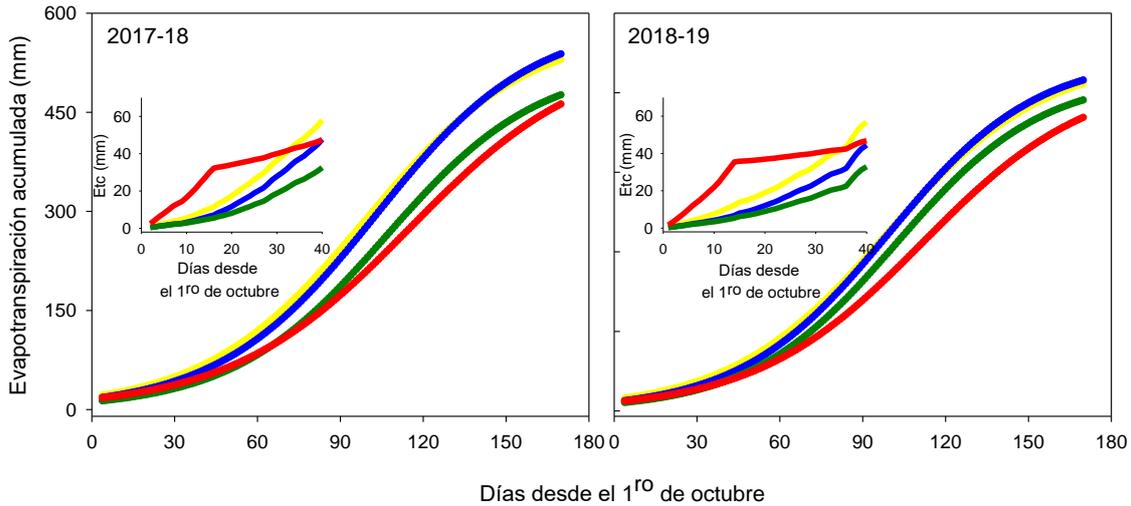


Figura 20. Evapotranspiración acumulada modelada con regresión logarítmica para las temporadas 2017-18 (C) y 2018-19 (D). Los inset representan la evapotranspiración acumulada real para los primeros 40 días desde el 1 de octubre.

Componentes de rendimiento

Las plantas podadas en 2-3H y 8H presentaron una disminución en el rendimiento del 17% y 60% respectivamente, en comparación con las plantas control y podadas en Br (Tabla 10), los 3 años del ensayo.

Tabla 10. Rendimiento, racimos por planta, peso del racimo, bayas por racimo y peso de la baya para plantas de Malbec podadas durante el invierno (PI), en brotación (Br), con 2-3 hojas (2-3H) y con 8 hojas expandidas (8H) para las tres temporadas del experimento. Dentro de cada columna, letras diferentes indican diferencias significativas entre los tratamientos o temporadas ($P < 0.05$ prueba de Fisher).

Fecha de poda	Rendimiento (kg)	Racimos por planta (N)	Peso racimo (g)	Bayas por racimo (N)	Peso de baya (g)	AF/Rendimiento (m^2/kg)	Capacidad (kg/planta)
PI	9.4 ± 0.3 a	56.6 ± 1.5 ab	170 ± 3.6 a	80.8 ± 3.5 a	1.9 ± 0.0 b	0.6 ± 0.0 c	2.9 ± 0.1 a
Br	9.1 ± 0.4 a	60.7 ± 2.0 a	152 ± 3.8 b	76.8 ± 3.2 ab	2.0 ± 0.0 b	0.8 ± 0.1 bc	3.0 ± 0.1 a
2-3H	7.8 ± 0.3 b	54.1 ± 1.6 b	145 ± 6.4 b	70.0 ± 3.5 bc	2.0 ± 0.0 b	0.8 ± 0.0 b	2.5 ± 0.1 b
8H	3.7 ± 0.2 c	34.5 ± 1.6 c	107 ± 2.0 c	61.4 ± 3.2 c	2.1 ± 0.0 a	2.2 ± 0.2 a	1.7 ± 0.1 c
p-value	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.0050	<0.0001	<0.0001
Temporada							
2017-18	6.2 ± 0.3 b	43.8 ± 1.5 c	137 ± 3.8 b	83.3 ± 2.3 a	1.8 ± 0.0 b	1.1 ± 0.1	2.9 ± 0.1 b
2018-19	8.3 ± 0.3 a	51.2 ± 1.4 b	160 ± 3.5 a	61.2 ± 2.4 b	2.1 ± 0.0 a	1.1 ± 0.1	2.1 ± 0.1 a
2019-20	8.0 ± 0.3 a	59.4 ± 1.5 a	133 ± 3.8 b		2.1 ± 0.0 a		
p-value	<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.0002	<0.0001	0.6976	<0.0001
Interacción	0.2064	0.0202	<0.0001	0.1064	0.0386	0.5014	0.9168

Dentro de cada parámetro y cada temporada, letras diferentes implican una diferencia estadística entre tratamientos (p -valor < 0.05 para la prueba de Fischer).

Se relacionó el rendimiento por planta y el peso seco de las hojas removidas con las podas tardías (Figura 21) y se obtuvo una ecuación exponencial negativa, cuyos parámetros alfa (i.e. ordenada al origen de la función, valor del rendimiento cuando no hay remoción de tejido verde) y beta (i.e. disminución relativa del rendimiento respecto

al aumento del peso seco removido en la poda) resultaron significativos (p valor<0,0001).

$$\text{Rendimiento} = 9,628 * e^{(-0,0059*\text{Peso seco})}$$

Cuando la poda se realizó en Br, 2-3H, y 8H, se removieron 9, 35 y 159 g de peso seco de hojas, respectivamente. Esto indica que, a mayor tejido foliar removido, mayor es la disminución en el rendimiento por planta. Según la regresión ajustada, una remoción de casi 18 g de peso seco en hojas produce una disminución del 10 % del rendimiento. Al remover 37.8 y 60.4 g de tejido foliar, podría esperarse una disminución del 20 % y del 30 % del rendimiento por planta.

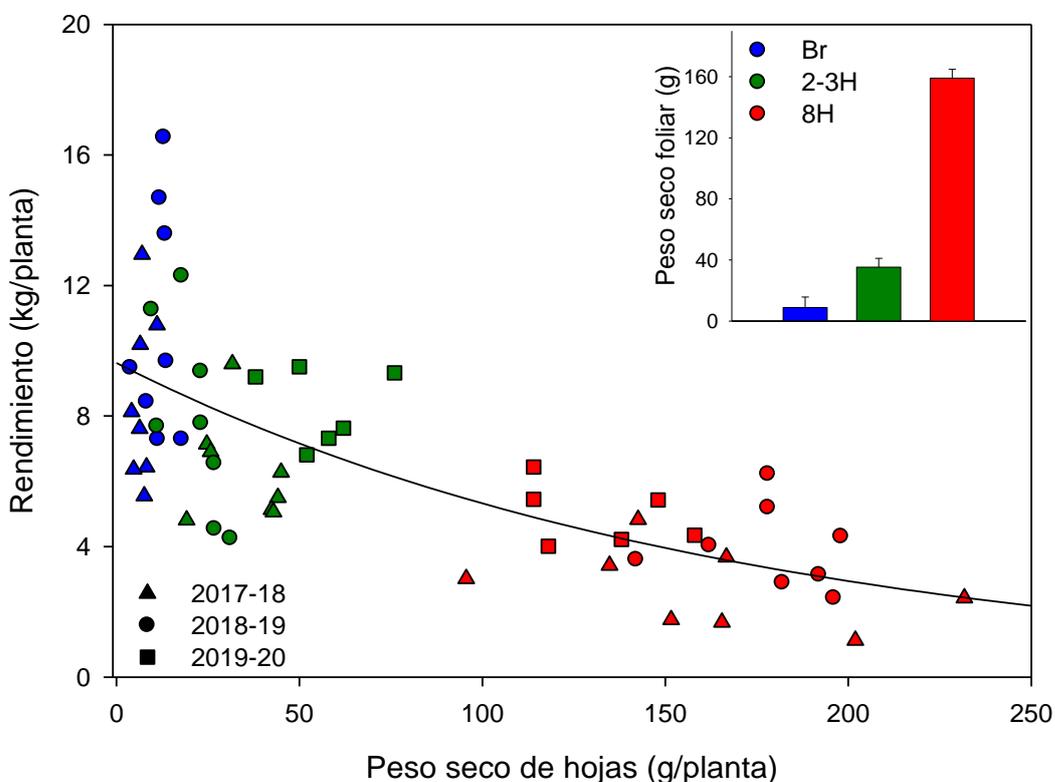


Figura 21. Relación entre el rendimiento por planta y el peso seco del tejido foliar removido con la poda tardía para las temporadas 2017-18 (▲), 2018-19 (●) y 2018-19 (■). La línea suavizada corresponde a la regresión ajustada para todos los datos. El gráfico de barras representa la media y su error estándar del tejido foliar removido con las podas tardías a lo largo de las tres temporadas.

Al analizar los componentes del rendimiento, la poda realizada con 8 hojas disminuyó un 55% la fertilidad por brote, lo cual se reflejó en la menor cantidad de racimos por planta (Tabla 10). Si bien esta menor cantidad de racimos se dio tanto en brotes apicales, como en basales (Figura 22), estos últimos presentaron una marcada tasa de brotes infértiles (i.e. promedio de 0,8 racimos por brote). Por otra parte, los brotes

basales de las plantas podadas con 2-3 hojas presentaron un 15% menos de racimos respecto a los de las plantas testigo (Figura 22), lo que resultó en una menor cantidad de racimos por planta (Tabla 10).

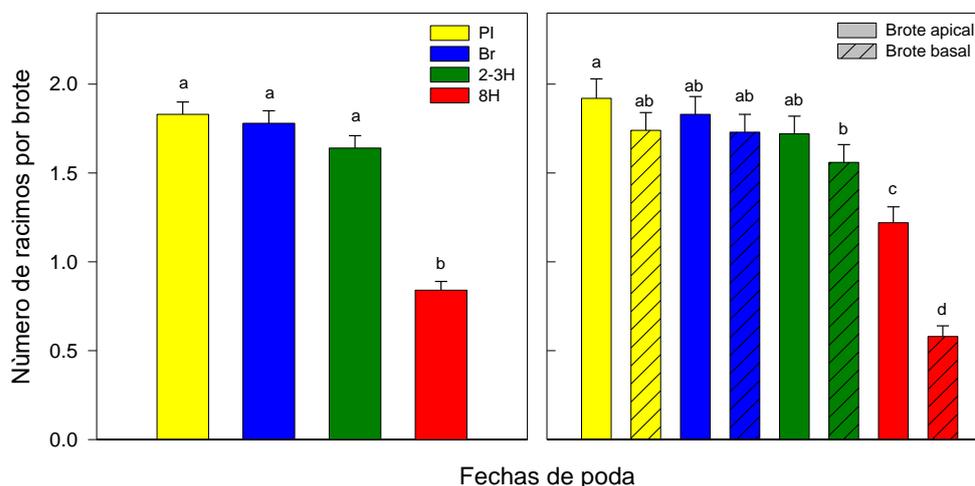


Figura 22. Promedio de racimos por brote (A) y promedio de racimos por brotes provenientes de los nudos apical y basal del pitón (B) para las distintas fechas de poda en las temporadas 2017-18 y 2018-19. Los valores corresponden al promedio 96 y 72 yemas de 4 repeticiones por tratamiento el primer y segundo año, respectivamente.

Los tratamientos de poda tardía también presentaron un menor número de flores por inflorescencia y flores más livianas (Figura 23). Los tratamientos Br y 2-3H presentaron un 11% y un 21% menos de flores por racimo, mientras que la disminución del 8H fue del 34%, respecto al testigo (Figura 23, A). La disminución de flores por inflorescencia fue similar entre brotes (Figura 23, B) para los tratamientos PI, Br y 2-3H, mientras que el 8H presentó menor cantidad de flores en los racimos de brotes basales.

Además, las podas realizadas con 2-3 hojas y con 8 hojas presentaron flores más pequeñas, estimado a través del peso de las caliptras (figura 23, C). La disminución en el peso de las flores de las plantas podadas con 2-3 hojas se debió sobre todo a una disminución del peso de flores de los racimos que provenían de los brotes basales. Por otra parte, las plantas podadas con 8 hojas presentaron flores más livianas tanto en los racimos de brotes apicales como los de brotes basales (Figura 23, D).

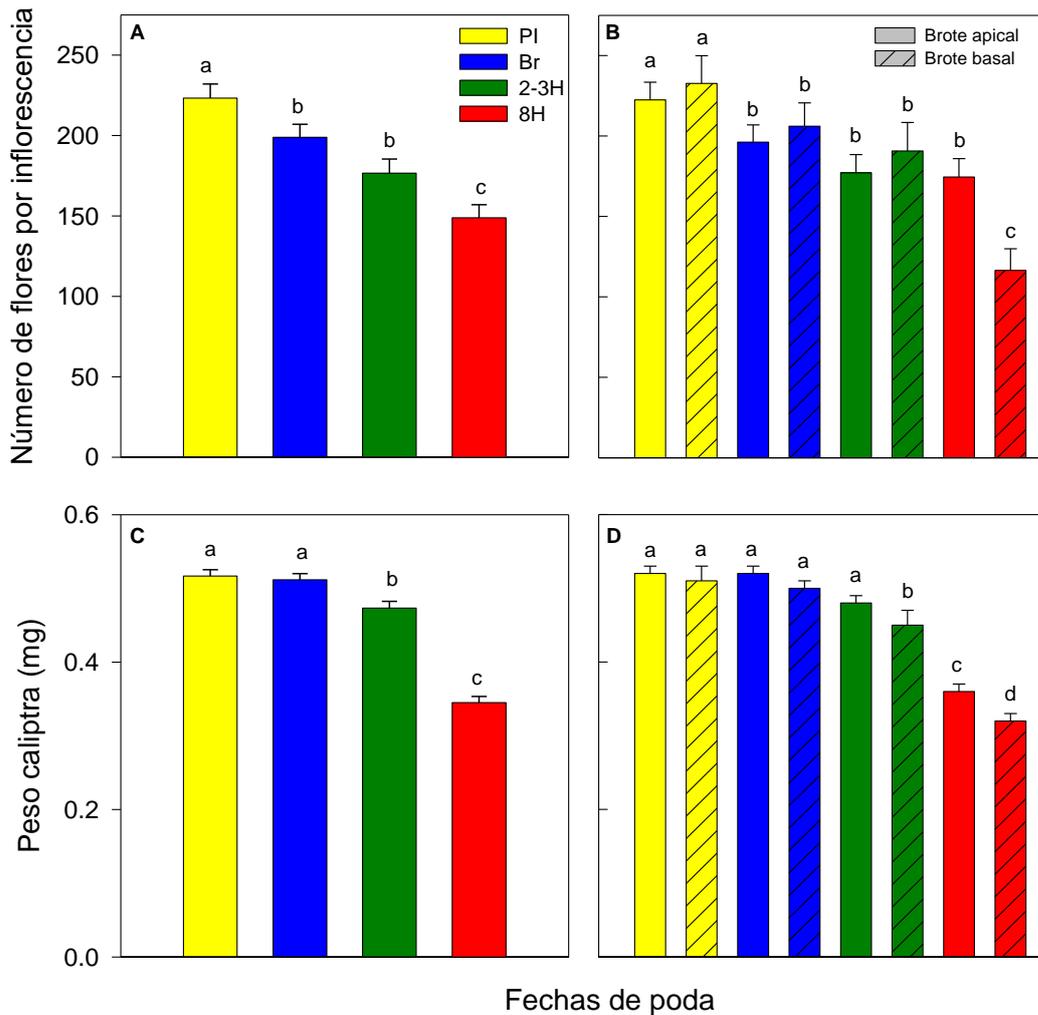


Figura 23. Flores por inflorescencia (A) y peso de las caliptras (C) para cada fecha de poda, para las temporadas 2017-18 y 2018-19. Estos mismos parámetros se encuentran en los paneles B y D discriminados por brotes que provienen del nudo apical y del nudo basal del pitón.

Por otra parte, los racimos de los tratamientos de poda tardía presentaron un aumento en el cuaje en comparación con las plantas control durante las dos primeras temporadas del experimento (Figura 24). La relación entre el cuaje y el número de flores por inflorescencias y entre el cuaje y el peso de las caliptras puede verse en las Figuras 24B y 24C, respectivamente. Como se observa en la Figura 24 B, el número de flores por inflorescencia tiene un efecto inversamente proporcional sobre el porcentaje de cuaje. Es decir, a mayor cantidad de flores, el porcentaje de cuaje disminuye. En esta relación, los tratamientos realizados con 2-3 hojas y con 8 hojas muestran valores de cuaje mayores al testigo, en un rango menor de número de flores. Una situación similar se observó en la variación del porcentaje de cuaje respecto al peso de la flor (Figura 24C); donde el porcentaje de cuaje fue mayor con flores más pequeñas. Puede observarse que las plantas podadas con 2-3 hojas y con 8 hojas

presentaron flores más livianas y un mayor porcentaje de cuaje; mientras que el mayor porcentaje de cuaje de las plantas podadas en brotación se registró con un rango de peso de caliptras similar a las plantas testigo.

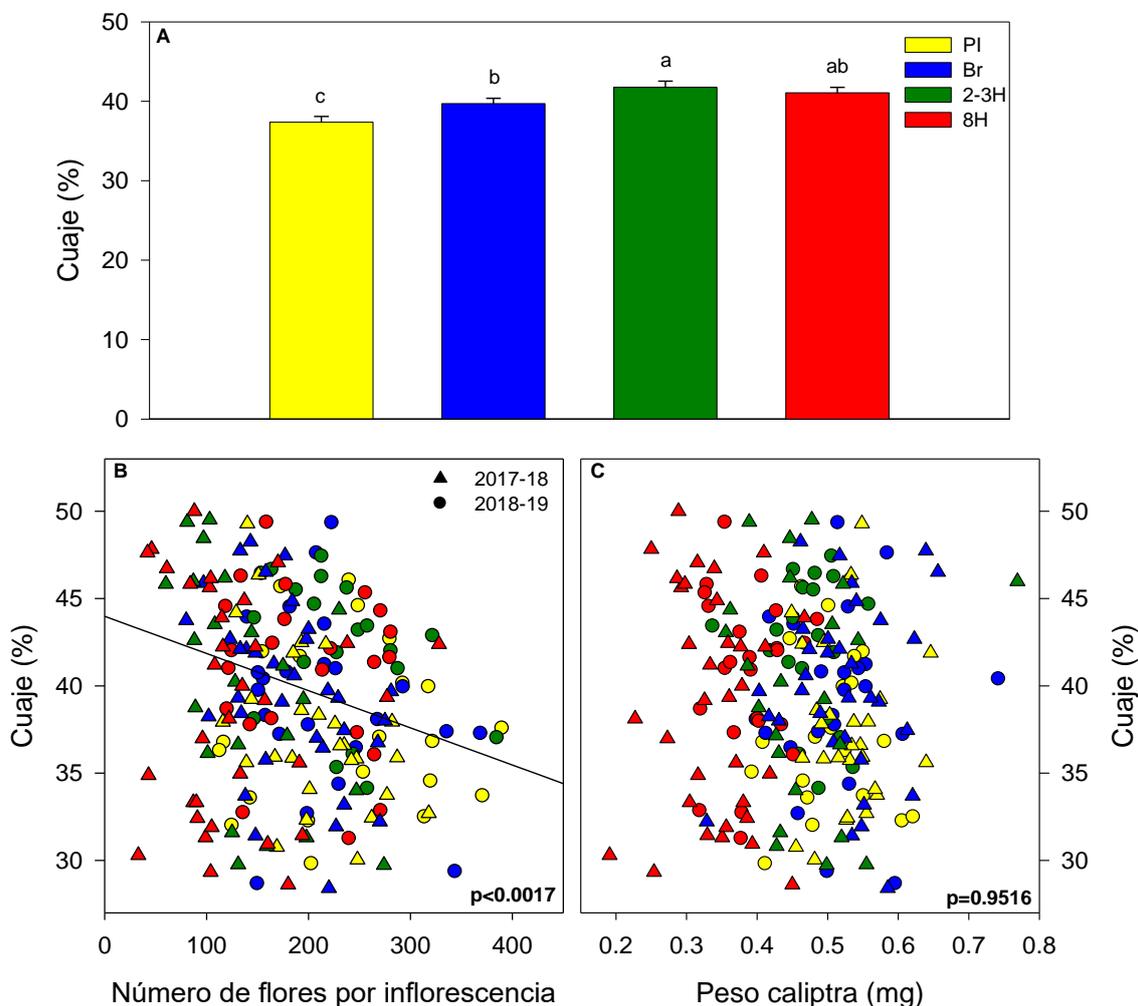


Figura 24. Porcentaje de cuaje de los racimos (A) y relación del porcentaje de cuaje con las flores por inflorescencia (B) y con peso de las caliptras (C) para cada fecha de poda, para las temporadas 2017-18 (▲) y 2018-19 (●). Cada punto de los gráficos B y C representa la media de la unidad experimental \pm error estándar. Las líneas suavizadas corresponden a la regresión ajustada para todos los datos. Los gráficos de barra representan los residuos de las regresiones (media + error estándar), comparando las 4 fechas de poda durante ambas temporadas.

En resumen, en cuanto al rendimiento por planta, solo las plantas podadas en brotación pudieron mantenerlo en comparación con el control. La disminución en el rendimiento de las plantas 2-3H se debió principalmente a una disminución del 15% de bayas por racimo. A pesar de que las plantas de 8H presentaron bayas más grandes, también presentaron una disminución del 38% de racimos por planta (Tabla 10).

De acuerdo con esta reducción en el rendimiento, la capacidad de la planta fue menor para las dos últimas fechas de poda. Las plantas podadas a 2-3H redujeron la capacidad de la planta aproximadamente un 21% en comparación con PI, mientras que las plantas podadas a 8H la redujeron aproximadamente un 65% (Tabla 10). Además, las plantas podadas a 2-3H y 8H presentaron mayor relación hoja a fruto, principalmente debido a una disminución del rendimiento, ya que el área foliar total fue la misma para cada fecha de poda (Tabla 10).

La eficiencia en el uso del agua disminuyó en las plantas podadas con 8 hojas. A pesar de que las plantas 8H disminuyeron su rendimiento y su consumo de agua en el ciclo, no lo hicieron en la misma proporción. Es decir, mientras que el rendimiento disminuyó un 60%, el consumo de agua total disminuyó en un promedio del 13%. Debido a ello, tanto en la primera como en la segunda temporada, las plantas podadas con 8 hojas presentaron una menor EUA (Tabla 11).

Tabla 11 Eficiencia en el uso de agua, expresada en quintales por m³ de agua aplicada para cada fecha de poda en las temporadas 2017-18 y 2018-19.

Fecha de poda	EUA (QQ/m ³)
PI	0,05 ± 0,00 a
Br	0,04 ± 0,00 a
2-3H	0,04 ± 0,00 a
8H	0,02 ± 0,00 b
p-valor	<0.0001
Temporada	
2017-18	0,04 ± 0,00
2018-19	0,04 ± 0,00
p-valor	0,1055
Interacción	0,7199

Dentro de cada parámetro y cada temporada, letras diferentes implican una diferencia estadística entre tratamientos (p -valor <0.05 para la prueba de Fischer).

Caracterización del racimo

Luego de clasificar a las bayas según su diámetro, se calculó el porcentaje de bayas que correspondía a cada categoría. Los racimos correspondientes a la temporada 2017-18 presentaron un diámetro de baya modal comprendido entre 11 y 13 mm, independientemente del tratamiento. Mientras que para 2018-19, el diámetro de baya modal estuvo comprendido entre 13-15 mm para todos los tratamientos (Tabla 12).

Tabla 12. Distribución (%) de los diámetros de bayas de los racimos maduros de cada fecha de poda, para las temporadas 2017-18 y 2018-19. El sombreado gris indica el diámetro modal para cada tratamiento.

Fecha de poda	Porcentaje de bayas (%)					
	>17 mm	15-17 mm	13-15 mm	11-13 mm	9-11 mm	<9 mm
2017-18						
P.I.	0,2	6,0	27,9	52,4	12,2	1,3
Brotación	0,7	10,5	28,9	47,4	10,9	1,6
2-3 hojas	0,4	6,9	26,1	49,1	11,7	5,8
8 hojas	1,2	9,5	30,8	42,5	10,7	5,3
2018-19						
P.I.	1,6	11,3	40,8	36,9	7,7	1,6
Brotación	0,8	15,3	43,7	35,5	3,1	1,6
2-3 hojas	4,4	24,2	39,3	28,6	2,9	0,7
8 hojas	0,6	11,3	38,8	34,8	9,4	5,2

La compacidad del racimo se calculó a través de la relación entre el número de bayas por racimo y la longitud del raquis (i.e. n° de bayas por cm de raquis) y se muestra en la Tabla 13. Se observó que el primer año la compacidad entre tratamientos fue la misma, ya que la menor cantidad de bayas por racimos en 2-3H y en 8H (i.e. 15 y 35% menos bayas que PI) se correspondió con 2,3 y 5,3 cm menos de raquis, respectivamente. En el segundo año, los tratamientos de poda tardía presentaron menos bayas por racimo, mientras que sólo el último tratamiento presentó, además, menor longitud de raquis. Esto implicó que los racimos de Br y 2-3H fueran más sueltos que PI y que los de 8H presentaran una compacidad intermedia.

Tabla 13. Número de bayas por racimo, longitud de raquis (cm) y compacidad de racimo (bayas/cm de raquis) para cada fecha de poda en las temporadas 2017-18 y 2018-19.

Fecha de poda	Bayas por racimo (N)	Longitud de raquis (cm)	Compacidad (bayas/cm)
2017-18			
PI	98,1 ± 4,2 a	16,6 ± 0,6 a	6,1 ± 0,3
Br	97,0 ± 4,2 a	16,9 ± 0,6 a	5,9 ± 0,3
2-3H	83,1 ± 4,1 b	14,3 ± 0,6 b	5,9 ± 0,3
8H	63,7 ± 3,7 c	11,3 ± 0,5 c	5,7 ± 0,2
p-valor	<0.0001	<0.0001	0,5341
2018-19			
PI	96,4 ± 4,3 a	15,1 ± 0,7 a	6,7 ± 0,2 a
Br	81,0 ± 4,2 b	15,0 ± 0,7 a	5,4 ± 0,2 c
2-3H	76,1 ± 4,3 b	14,9 ± 0,7 a	5,2 ± 0,2 c
8H	76,2 ± 3,8 b	13,1 ± 0,7 b	6,0 ± 0,2 b
p-valor	0,0009	0,0047	<0.0001

Dentro de cada parámetro y cada temporada, letras diferentes implican una diferencia estadística entre tratamientos (p -valor <0.05 para la prueba de Fischer).

Discusión

En este capítulo, nuestros objetivos fueron determinar si la poda tardía podría usarse como una herramienta para retrasar la madurez y, por lo tanto, como una herramienta para mitigar el impacto negativo del cambio climático. Después de tres años de evaluación, nuestros resultados sugieren que la poda tardía fue eficaz para retrasar las primeras etapas fenológicas hasta el envero, pero no fue útil para retrasar la acumulación de azúcar. Los tratamientos de poda tardía acortaron el ciclo y redujeron el consumo de agua, especialmente en los dos últimos tratamientos (2-3H y 8H). Cuanto más tardía fue la poda, se produjo un retraso más marcado en las etapas fenológicas, pero también se observó una mayor disminución en el rendimiento. La poda en brotación no modificó el consumo total de agua ni el rendimiento, pero fue eficaz para retrasar la brotación.

La poda tardía retrasa las primeras etapas fenológicas

La poda tardía retrasó todos los estadios fenológicos hasta envero. Este retraso fue mayor en la brotación. El crecimiento de las yemas distales del pámpano inhibe el desarrollo de las yemas situadas en los nudos basales, debido a la inhibición correlativa (Bangerth, 1989). Una vez ocurrida la brotación en las yemas apicales, estas logran una mayor tasa de desarrollo y así, se produce una mayor inhibición en las basales mientras se retrasa la poda (Allegro et al., 2020; Martínez-Moreno et al., 2019; Petrie et al., 2017). En consecuencia, la brotación se retrasó 10 días en las plantas podadas en Brotación (Br), 15 días en las plantas podadas con 2-3 hojas (2-3H), mientras que la brotación se atrasó 29 días en las plantas podadas con 8 hojas desenvueltas (8H).

A partir de entonces, el retraso en la fenología fue disminuyendo a lo largo del ciclo hasta la floración. Dado este retraso en la brotación, cada estadio fenológico de los tratamientos de poda tardía ocurrió a una temperatura más cálida que las plantas podadas en invierno. Esta diferencia de temperatura durante las primeras etapas se reflejó en los grados día diarios calculados para el período entre brotación y floración. Por ejemplo, las plantas podadas con 8H, acumularon alrededor de 2 °Cd más que las plantas control durante este período, generando un desarrollo más rápido en estas plantas. Los tratamientos de poda tardía iniciaron el ciclo entre 10 días (Br) y casi un mes (8H) más tarde. A pesar de este retraso, la diferencia de días entre tratamientos disminuyó hasta la floración, dado que esta parte del ciclo es muy sensible a la temperatura (Sadras y Petrie, 2011b). Para las tres temporadas del experimento, los

días desde la brotación hasta la floración fueron en promedio 41, 33, 31 y 17 para las plantas podadas en invierno, brotación, 2-3 hojas y 8 hojas, respectivamente.

Desde la floración hasta el envero, esta tendencia se revirtió para el tratamiento de 8H, es decir, las plantas podadas en esta etapa necesitaron más días para alcanzar el envero. Desde la floración hasta el envero, las plantas podadas en Br, y 2-3H requirieron 2 días más que PI mientras que 8H requirieron 10 días más para alcanzar el envero, contrario a lo observado en otros estudios (Gatti et al., 2016; Palliotti et al., 2017). La menor cantidad de hojas en la floración, relacionada con el menor tiempo requerido entre la brotación y la floración en el tratamiento 8H, podría explicar el mayor número de días necesarios para pasar de la floración al envero. De acuerdo con la escala de fenología descrita por Eichorn y Lorenz y modificada por Coombe (1995), la plena floración ocurre normalmente con 17-20 hojas separadas, como fue el caso de nuestras plantas control (PI). Por el contrario, en nuestro estudio, en el momento de la floración, las plantas podadas en Br, 2-3H y 8H tenían aproximadamente 14, 12 y 10 hojas desplegadas, respectivamente. Las hojas adultas de los nuevos brotes comienzan a exportar algunos de sus carbohidratos asimilados 2 a 3 semanas después de la brotación (Keller, 2020) y alcanzan su tasa fotosintética máxima 35-40 días después de desplegarse (Schultz et al., 1996). Además, la floración es el momento en que el canopia deja de depender de las reservas y comienza a ser exportadora de carbono (Vasconcelos et al., 2009). El menor número de hojas con menor tasa de asimilación (es decir, hojas más jóvenes) de las plantas de 8H podría explicar este retraso durante este período.

Efectos de la poda tardía sobre la acumulación de azúcar y el peso de las bayas

Desde el envero hasta la fecha de cosecha, la dinámica de acumulación de azúcar varió con la temporada y la fecha de poda. Incluso si la poda tardía retrasó el inicio de la madurez (es decir, el aumento inicial en la acumulación de azúcar de baya justo después del envero), en coincidencia con otros trabajos (Allegro et al., 2020; Gatti et al., 2016; Moran et al., 2017; Silvestroni et al., 2018) el período entre el envero y la cosecha, fijado en 23 °Brix, siempre fue más corto para los tratamientos de poda tardía. En las tres temporadas, el inicio del envero se retrasó en promedio alrededor de 7, 9 y 14 días para Br, 2-3H y 8H respectivamente, en comparación con la poda invernal. Sin embargo, los tratamientos 2-3H y 8H aumentaron la relación de hoja/fruto para las temporadas 2017-18 y 2018-19, la cual está relacionado con la tasa de acumulación de azúcar en la baya (Auzmendi y Holzapfel, 2016; Kliewer y Dokoozlian,

2005). La acumulación más rápida de sólidos solubles totales se refleja en el hecho de que la acumulación de grados día para completar la acumulación de azúcar (es decir, el período entre 10 y 23 °Brix) es menor para todos los tratamientos de poda tardía, las tres estaciones del experimento. El peso máximo de la baya establece aproximadamente el comienzo de la fase de meseta de la carga de azúcar (Coombe y McCarthy, 2000). Teniendo en cuenta que en 2017-18 se alcanzó el peso máximo de bayas en los mismos grados día acumulados, la concentración más rápida de azúcar se explica principalmente por la mayor pendiente de la regresión entre azúcar por baya y grados día. Para 2018-19, las plantas podadas a 8H alcanzaron el peso máximo de bayas después que las plantas podadas a PI, Br y 2-3H y la tasa de acumulación de azúcar fue la misma para 8H y PI. Mientras que las plantas podadas a PI, Br y 2-3H presentaron una duración de la fase de meseta similar mientras las plantas podadas a 8H parecen no tener esta fase de estabilización. Nuestro objetivo fue cosechar con una concentración de sólidos solubles de 23 °Brix. En 2018, este objetivo se alcanzó 5, 6 y 13 días antes del PI para Br, 2-3H y 8H respectivamente. Por el contrario, en 2019 Br y 8H alcanzaron 23 °Brix entre 6 y 7 días después respectivamente. Si bien algunos estudios mostraron un retraso en la madurez (Frioni et al., 2016; Palliotti et al., 2017; Petrie et al., 2017), algunos otros trabajos obtuvieron un retraso o un avance según las características del año y la época de poda (Gatti et al., 2016; Moran et al., 2017). Según nuestros resultados, el efecto sobre la acumulación de azúcares está relacionado con las alteraciones que genera la poda tardía en la relación hoja / fruto, como concluyen Frioni et al. (2019). Además, Gatti et al. (2016) encontraron que las plantas podadas más tarde tenían un canopy más joven y más eficiente después del invierno, lo que podría haber contribuido a una acumulación de azúcar más rápida. En resumen, cuanto más tardía sea la poda (por ejemplo, 8H en nuestro caso), más fuertes serán las modificaciones en el desarrollo del canopy, el comportamiento de la planta, la acumulación de azúcar y los componentes del rendimiento.

La poda tardía afecta el desarrollo del canopy y reduce el coeficiente de cultivo

La poda después de la brotación produjo una disminución en la longitud de los brotes en el momento del despampanado, a fines de diciembre. El crecimiento de los brotes se vio afectado como también se muestra en otros estudios (Coombe, 1964; Gatti et al., 2016), a pesar de que las plantas podadas con 2-3H y 8H estuvieron expuestas a temperaturas primaverales más altas. La poda tardía puede implicar una pérdida de reservas, ya que son las responsables de la brotación y el desarrollo de nuevas hojas y brotes (Holzapfel et al., 2010; Keller, 2020) que luego se eliminan en el momento de

la poda. Este efecto sería más severo para el tratamiento de 8 hojas. Algunos estudios que informaron que el contenido de carbohidratos en raíces y sarmientos en dormición, no mostraron diferencias entre los tratamientos de poda tardía y poda invernal (Frioni et al., 2016; Palliotti et al., 2017), reportaron a su vez una gran disminución en el número de racimos por brote el segundo año. Esto se relaciona con el balance de C de la temporada anterior (Candolfi-Vasconcelos y Koblet, 1990). Así, la doble brotación provocada por la poda tardía a expensas de la misma cantidad de reservas podría afectar a la temporada en curso (Frioni et al., 2016; Palliotti et al., 2017). Por otra parte, no hay mucha información sobre cómo el genotipo influye en el almacenamiento de carbohidratos (Holzapfel et al., 2010), por lo que se necesitan estudios más detallados para resaltar el impacto de esta técnica, y otras desarrolladas recientemente para retrasar la cosecha, sobre las reservas de carbohidratos.

El coeficiente de cultivo (K_c) depende de la estructura del canopia, las prácticas de poda y el crecimiento vegetativo (Gautam et al., 2021; Picón-Toro et al., 2012; Williams y Ayars, 2005). El área foliar fue mayor el segundo año y dado que existe una correlación entre el coeficiente de cultivo y el área foliar (Williams et al., 2003), en el segundo año de experimento se obtuvieron K_c más altos para todos los tratamientos. Como se explicó anteriormente, las plantas podadas con 2-3 y 8 hojas retrasaron la brotación y el desarrollo del canopia y, en consecuencia, también se retrasó la progresión de K_c . Independientemente de que hubiera un retraso en la progresión de K_c , el K_c máximo fue el mismo para todos los tratamientos. La disminución en la longitud de los brotes estuvo acompañada de un número similar de hojas primarias y de un incremento en el área de las hojas secundarias, lo que compensó la menor altura del canopia, incrementando la cobertura del canopia. Dado que las plantas podadas a 2-3H y 8H alcanzaron su valor máximo 20 y 40 días después respectivamente, su consumo de agua fue menor que las plantas PI y Br. Por otra parte, las plantas sometidas a la poda tardía tienden a recuperar su capacidad fotosintética a lo largo de la temporada y, dado que las hojas son más jóvenes, mantienen tasas de intercambio de gases más altas después de la cosecha hasta la caída de las hojas (Gatti et al. 2016). Entonces, a pesar del retraso en el desarrollo del canopia, es posible que los tratamientos 2-3H y 8H mantuvieron tasas de transpiración más altas después de la cosecha, compensando en parte este menor uso de agua observado durante el ciclo.

El retraso en el desarrollo del canopia, el ciclo más corto y el retraso en la progresión de K_c para las plantas podadas a 2-3H y 8H, llevaron a una menor evapotranspiración anual del cultivo. En la primera temporada, la ET_c anual se redujo en un 10% y un 15%

en 2-3H y 8H respectivamente en comparación con las plantas control y Br. Mientras que en la segunda temporada, la ET_c se redujo en un 5% y un 12% para 2-3H y 8H respectivamente. En Mendoza, como en muchas otras regiones del mundo, la viticultura depende totalmente del riego. En consecuencia, ahorrar entre un 5% y un 10% del consumo de agua podría ser muy importante a nivel regional. Sin embargo, la poda tardía se utiliza normalmente en combinación con la poda de invierno, por lo que sería difícil traducir esta menor evapotranspiración en un ahorro de agua efectivo. Por lo tanto, queda por explorar mejor el alcance del ahorro en el uso del agua mediante la poda tardía.

La poda tardía afecta los componentes del rendimiento

El rendimiento parece responder a múltiples factores como el momento de la poda, la variedad, la época y el lugar de estudio, entre otros. En nuestro estudio, la poda en brotación no afectó el rendimiento, mientras que las plantas podadas a 2-3H redujeron el rendimiento en un 18% y las plantas podadas a 8H disminuyeron el rendimiento en un 60%, en relación con PI. Las respuestas del rendimiento a la poda tardía reportadas en la literatura son muy variables, como lo observaron otros autores (Friend y Trought, 2007; Petrie et al., 2017), y las causas de las respuestas del rendimiento aún no están totalmente aclaradas. Sin embargo, existe un consenso generalizado de que cuanto más tardía es la poda, mayor es la disminución del rendimiento, principalmente debido a una mayor remoción de tejido verde, lo que ocasiona una limitación de carbono (Gatti et al., 2016).

A principios de la primavera, cercano a brotación, los primordios florales ya están formados y comienza la diferenciación floral (Vasconcelos et al., 2009). La poda después de la brotación interrumpe y restablece la movilización de reservas necesarias para el alargamiento de los brotes y el desarrollo de la inflorescencia. Para las temporadas 2017-18 y 2018-19, la poda tardía disminuyó el número de flores en un 11%, 21% y 33% para los tratamientos Br, 2-3H y 8H respectivamente. El desarrollo más rápido entre la brotación y la floración observado en los tratamientos de poda tardía y el agotamiento de las reservas almacenadas debido a la doble brotación, podrían haber afectado la diferenciación de flores que normalmente ocurre a principios de la primavera, entre la brotación y la floración (Vasconcelos et al., 2009). Dada la interdependencia entre los componentes del rendimiento, una vez que se establecen el número de racimos por planta y el número de flores por inflorescencia, para una disponibilidad de recursos determinada, la planta puede ajustar el rendimiento en el momento del cuaje. Se ha establecido una relación inversa entre el número de flores y

el porcentaje de cuaje (Keller et al., 2010; Vasconcelos y Castagnoli, 2000). En consecuencia, en nuestro estudio, la poda tardía aumentó el porcentaje de cuaje en un 6%, 9% y 6% para Br, 2-3H y 8H respectivamente, compensando en parte la disminución en el número de flores por inflorescencia.

La poda realizada en brotación no es un estadio frecuente entre los estudios realizados de esta práctica, entre los estudios de poda tardía. Según otros autores, la respuesta del rendimiento a la poda en esta etapa depende en gran medida de la temporada, la variedad y el tamaño de la canopia (Moran et al., 2018b; Petrie et al., 2017). En nuestro estudio, la poda en Br presentó los resultados más estables, sin afectar el rendimiento por planta durante las tres temporadas del experimento, aunque hubo alguna compensación en sus componentes las dos primeras temporadas. Para la temporada 2017-18, el incremento en el cuaje compensó la disminución en el número de flores. En la temporada 2018-19, a pesar de que el aumento en el cuaje no fue suficiente para equiparar la cantidad de bayas por racimo, hubo un incremento en el peso de baya del 11% que determinó que no hubiera diferencias en el rendimiento por planta.

La poda realizada con 2-3 hojas desenvueltas es la más estudiada para realizar la poda tardía, ya que parece ser el estadio a partir del cual la disminución del rendimiento es considerable (Gatti et al., 2016; Petrie et al., 2017). En las tres temporadas de nuestro estudio, el rendimiento de 2-3H disminuyó en aproximadamente un 18% en comparación con PI. Algunos autores informaron una disminución similar (Allegro et al., 2020; Gatti et al., 2016; Palliotti et al., 2017), mientras que otros informaron que la poda a 2-3H no afectó el rendimiento, con o sin compensación en los componentes de rendimiento (Moran et al., 2018a; Petrie et al., 2017). Para la temporada 2017-18, la disminución del rendimiento se debió principalmente a una disminución en los racimos por planta. Dado que no hubo diferencia en la fertilidad de los brotes, asumimos una disminución en los brotes por planta (no medido). La poda tardía en la temporada 2017-18 también incrementó el porcentaje de cuaje, lo que compensó la disminución en el número de flores. Se ha informado que la poda a 2-3H produce un retraso en el crecimiento de los brotes en el nudo 1 de los pitones (Moran et al., 2018b; Palliotti et al., 2017). En consecuencia, también encontramos que tanto el número de flores como el porcentaje de cuaje se vieron afectados en los racimos de los brotes de la yema 1. Para la temporada 2018-19, la reducción en el rendimiento se debió principalmente a un menor peso del racimo, provocado por una disminución en las bayas por racimo. Al igual que con el

tratamiento Br, el incremento en el cuaje no fue suficiente para compensar la mayor disminución en el número de flores.

Los efectos de la poda a 8H (estadio E-L 15), presentan más consenso en la literatura, reportando una gran disminución en el rendimiento por una reducción de casi todos los componentes del rendimiento. En nuestro estudio, el rendimiento presentó una reducción para las tres temporadas, principalmente debido a un menor número de racimos por plantas y peso del racimo, coincidiendo con otros autores (Allegro et al., 2020; Gatti et al., 2018; Palliotti et al., 2017; Silvestroni et al., 2018). El número de racimos por planta es el resultado del desarrollo de la inflorescencia, que ocurre en la temporada actual, y de los primordios de inflorescencia, que se establecen en la temporada anterior (Vasconcelos et al., 2009). Considerando que el número de racimos por planta no disminuyó durante las temporadas para este tratamiento, sugiere que la poda tardía no afectó el proceso de inducción. Además, la severa limitación de la fuente causada por esta fecha de poda jugó un papel principal en el desarrollo de la inflorescencia y por lo tanto en la reducción del número de inflorescencias. Alternativamente, según Vasconcelos et al. (2009), durante la primavera puede ocurrir una reversión de una inflorescencia a un zarcillo, debido al aborto de flores antes de la antesis, lo que podría ser un efecto de las altas temperaturas primaverales. Como se mostró anteriormente, entre brotación y floración, las plantas 8H acumularon 1.5, 3 y 5.5 °Cd d⁻¹ más que PI, en 2017, 2018 y 2019, respectivamente. Esta mayor temperatura primaveral afectó el número de flores por inflorescencia lo que impactó en el peso final del racimo. Además, en este tratamiento se observó una alta variabilidad intra-planta, con un fuerte deterioro del desarrollo de los brotes en el nodo 1, con una disminución en el crecimiento de brotes, número de racimos, peso y número de bayas. El aumento en el porcentaje de cuaje no fue suficiente para compensar la mayor disminución en todos los componentes del rendimiento en los racimos de los brotes del nudo 1.

La eficiencia en el uso del agua disminuyó sólo en las plantas podadas con 8 hojas. Si bien las plantas podadas con 2-3 hojas disminuyeron el consumo de agua en un promedio de 7,5%, la disminución del rendimiento fue del 18%, por lo que la pérdida de producción sería mayor al ahorro de agua producido. Por otra parte, los resultados de este estudio corresponden a condiciones bien regadas; situación no muy frecuente en los viñedos locales. Son necesarios más estudios que combinen diferentes niveles de déficit hídrico con poda tardía, para poder diseñar prácticas de riego y manejo que lleven a mejorar o mantener la eficiencia en el uso del agua y de esta manera garantizar la sostenibilidad del viñedo.

Los resultados de este capítulo mostraron que la poda tardía es una herramienta efectiva para retrasar la fenología desde la brotación hasta el envero, pero no para posponer la acumulación de azúcar, ya que la mayor relación hoja-fruto provoca una mayor acumulación de sólidos solubles. Por el contrario, esta técnica sería interesante para escapar a las heladas primaverales al comienzo del ciclo. La poda en brotación retrasó 10 días la brotación sin reducir el rendimiento, en comparación con las plantas control, mientras que la poda con 2-3 hojas retrasó 15 días a brotación a expensas de la reducción del rendimiento. Por otra parte, los tratamientos de poda tardía acortaron el ciclo y redujeron el consumo de agua, especialmente en los dos últimos tratamientos (2-3H y 8H), aunque solo el tratamiento 2-3H logró mantener la eficiencia en el uso del agua.

CAPÍTULO IV: Efecto de la poda tardía sobre la evolución de la madurez y la composición fenólica de la baya y del vino

Introducción

Los componentes principales de la uva que determinan potencialmente la calidad del vino son el azúcar, los ácidos orgánicos y los compuestos polifenólicos y odorantes. La temperatura influye en las reacciones metabólicas responsables del crecimiento y madurez de la baya (Keller, 2010; Ollat et al., 2002). Frente a un aumento de temperatura, se han evidenciado respuestas variables en diferentes estudios, incluyendo un mayor contenido de sólidos solubles (azúcares) en algunas variedades, y en otras no (Sadras et al., 2013). En consecuencia, se obtienen vinos de elevado grado alcohólico y desequilibrados en sus componentes. Un mayor grado alcohólico en los vinos es perjudicial para la salud de los consumidores y la tendencia actual es hacia el consumo de vinos con menor contenido alcohólico. No obstante, algunas variedades han demostrado tener una plasticidad ambiental menor y mantener una composición más estable frente al calentamiento (de Rosas et al., 2017; Sadras et al., 2013).

La acidez de la uva es importante para la frescura y el equilibrio de los vinos y resulta de un balance entre los ácidos orgánicos mayoritarios (tartárico y málico) y el contenido de potasio a cosecha (Venios et al., 2020). En regiones y/o temporadas más cálidas se ha reportado una disminución en la acidez total e incremento del pH de la uva (Sadras et al., 2013). El ácido tartárico, mayoritario en la baya, se ha considerado relativamente estable a temperaturas elevadas. La disminución del mismo durante el crecimiento de la baya es probablemente debida a un efecto de dilución y precipitación (Rienth et al., 2021), mientras que el ácido málico, sí es degradado por altas temperaturas diurnas (Ollat et al, 2002; Sweetman et al, 2014). En condiciones de estrés térmico, la concentración de potasio en la uva a cosecha aumenta, contribuyendo a una disminución de la acidez más marcada (Mira de Orduña, 2010; Venios et al., 2020). Estos cambios pueden aumentar el pH de la uva y comprometer la estabilidad microbiológica del mosto, el potencial de guarda y el balance del vino (Dai et al., 2010).

Los metabolitos secundarios de la uva determinan importantes características organolépticas de los vinos, como aroma, astringencia, color y estabilidad. Dentro de estos, se ha prestado especial atención a las antocianinas, que son las responsables

del color en uvas y vinos tintos. Frente a un aumento de temperatura, trabajos locales e internacionales han reportado un menor contenido de antocianinas totales, aunque aumenta la proporción de las formas de mayor estabilidad química (de Rosas et al., 2017; Mori et al., 2007). La disminución se produce por inhibición de la síntesis, degradación química o enzimática o desbalances en el funcionamiento de transportadores de membrana (Mori et al., 2007; van Houten et al., 2020); mientras que el cambio en las formas de antocianinas se debe a que predominan las de mayor estabilidad térmica o química y a una mayor expresión de las enzimas responsables (de Rosas et al., 2017). Por otro lado, en regiones cálidas se ha constatado un desacople entre la acumulación de azúcares y de antocianinas. Este proceso implica que existe una mayor tasa de acumulación de azúcares que de polifenoles, en particular de antocianinas. Este desacople se ha observado también cuando la temperatura aumenta como consecuencia del cambio climático (Sadras y Moran, 2012); la uva acumula azúcar antes que antocianinas, dando lugar a un desequilibrio entre estos compuestos. Esto se ha comprobado también en Mendoza donde a un mismo contenido de azúcar, el contenido total de antocianinas en las plantas calentadas de las variedades Syrah y Grenache es menor que en las plantas control (Gallo et al. 2022). Los efectos de la temperatura sobre otros compuestos de interés, como los flavonoles, las proantocianidinas o los aromas han presentado resultados variables (Gouot et al., 2019). En resumen, los cambios en la composición de la uva para vinificar relacionados a un aumento de temperatura afectarán indudablemente la calidad del vino y pueden conducir a una pérdida de tipicidad y expresión del terruño (Rienth et al., 2021). Será clave la capacidad del sector vitivinícola (bodegas, productores de uva, agentes de gobierno) para adaptar nuevas prácticas de cultivo y diseñar estrategias de mitigación (Santillán et al., 2019; Van Leeuwen et al., 2019).

Una revisión bibliográfica reciente sobre los trabajos de poda tardía (Poni et al. 2022), cuyos resultados se muestran en la Tabla 14, muestra que, en los casos en los que la madurez se retrasó, las bayas presentaron una mayor relación de acidez respecto a la concentración de sólidos solubles (ya sea por una acumulación más lenta de SST o por una degradación más lenta de la acidez titulable) y una mejor composición fenólica. Esta mejoría en la composición fenológica puede deberse a un traslado de la madurez de la baya hacia épocas más frescas o a una mayor relación hollejo/pulpa (Poni et al. 2022).

En este capítulo, planteamos la hipótesis específica que a través de una poda tardía es posible retrasar el ciclo fenológico del cv. Malbec, llevando el periodo de madurez hacia condiciones de temperatura más favorables, restableciendo el balance entre los

distintos compuestos de la uva. Algunos estudios recientes han evaluado el efecto de una poda tardía sobre las características químicas y sensoriales de la uva y del vino (Moran et al. 2018a). Sin embargo, no existen antecedentes acerca de su implementación en temporadas sucesivas en condiciones locales y sus consecuencias sobre la composición química de la uva y del vino en el cv. Malbec, en Mendoza.

Tabla 14: Tabla adaptada de Poni et al. (2022). Síntesis de la información de trabajos de investigación sobre el impacto de las estrategias de poda tardía en calidad de la baya y del vino.

País/Varietal	Tipo de poda/condiciones de crecimiento	Fecha de poda	Retraso en madurez de la baya ^a	Composición del vino	Referencia
Italia / Pinot noir	Larga/Ensayo a campo	Brotos de unos 10 cm	< SST, pH, > AT, tartrato, malato, fenoles	No elaboran vino	Gatti et al. (2018)
Australia / Cabernet Sauvignon y Shiraz	Corta / Ensayo a campo	2-3 y 8 hojas desenvueltas	3 semanas – Shiraz; 2 semanas - Cabernet Sauvignon	No elaboran vino	Petrie et al. (2017)
Italy/ Sangiovese	Corta / Ensayo a campo	Brotos de 10 y 20 cm	< SST, pH, >AT, fenoles	<contenido alcohólico, mantiene AT, pH, intensidad de color y antocianinas, >acidez	Palliotti et al. (2017)
Australia / Shiraz	Corta / Ensayo a campo	Brotación y 2-3 hojas desenvueltas		Mantiene AT, pH, alcohol, componentes de color. Según temporada y fecha de poda > o mantiene antocianinas y taninos	Moran et al. (2021)
Australia / Shiraz	Corta / Ensayo a campo	Brotación y 2-3 hojas desenvueltas	<SST y >pH en 2 temporadas y mantiene en otra. Mantiene AT y antocianinas:SST	No elaboran vino	Moran et al. (2018)
Australia / Shiraz	Corta / Ensayo a campo	2-3 hojas desenvueltas		> antocianinas, fenoles, perfil frutal de vino, cuerpo	Moran et al. (2018)
Italia / Sangiovese	Corta / Ensayo a campo	4-5 hojas desenvueltas	< SST; > AT, antocianinas, fenoles	No elaboran vino	Frioni et al. (2016)
Australia / Shiraz	Corta / Ensayo a campo	2-3 hojas desenvueltas	< SST; > antocianinas y fenoles	No elaboran vino	Moran et al (2017)
España / Maturana tinta	Corta / Ensayo a campo	Inflorescencias desenvueltas	< SST; > AT, antocianinas, fenoles	No elaboran vino	Zheng et al. (2017)
Nueva Zelanda / Merlot	Corta / Ensayo a campo	Brotos de unos 5 cm	< SST; > AT,	No elaboran vino	Friend and Trought (2007)
Italia / Sangiovese	Corta / Ensayo en maceta	2-3 y 6-8 hojas desenvueltas	> SST; antocianinas y fenoles	No elaboran vino	Gatti et al. (2016)

Italia / Sangiovese	Corta / Ensayo a campo	3-4 y 7-8 hojas desenvueltas	3 a 9 días de retraso para SST de 20 °Brix	No elaboran vino	Silvestroni et al. (2018)
Italia / Merlot	Corta / Ensayo a campo	3-4 y 7-8 hojas desenvueltas	<SST, pH; > AT	No elaboran vino	Allegro et al. (2020)
España / Bobal y Tempranillo	Corta / Ensayo a campo	1 y 2-3 hojas desenvueltas	> AT:SST y >relación antocianinas/SST	Replica la composición de la baya. Mantiene pH, > intensidad de color, >antocianinas y fenoles según variedad	Buesa et al. (2021)
Brasil / Chardonnay	Corta / Ensayo a campo	7, 14 y 21 días luego de la poda invernal (25 de agosto)	Varía según la fecha de poda	No elaboran vino	Brighenti et al. (2017)
USA / Lemberger y Riesling	Corta / Ensayo a campo	1 hoja desenvuelta	Despreciable	Mantiene pH, AT, alcohol, intensidad de color y matiz	Persico et al. (2021)
Italia / Pinot noir	Corta / Ensayo a campo	2-3 hojas desenvueltas	<SST; > AT,	No elaboran vino	Frioni et al. (2019)
Nueva Zelanda / Chardonnay	Corta / Ensayo a campo	21 y 41 días después de poda invernal (5 de Julio)	N/A	No elaboran vino	Friend et al. (2011)
Australia / Cabernet Sauvignon	Corta / Ensayo a campo	48 días después de poda invernal (5 de julio)	< SST	No elaboran vino	Martin and Dunn (2000)
Australia / Zante Currant	Corta / Ensayo a campo	Brotos de unos 5 cm	N/A	No elaboran vino	El-Zeftawi and West (1970)
US / Perlette	Corta / Ensayo a campo	1, 2 y 3 semanas después de brotación	N/A	No elaboran vino	Jensen and Dokoozian (1991)
Italia / Sangiovese	Corta / Ensayo a campo	2-3 hojas desenvueltas	No varía		Despoina et al. (2021)

^a Se refiere a la diferencia significativa de algunas variables respecto a la poda invernal.

Hipótesis específicas

1. La poda tardía afecta la madurez de la baya de dos maneras: Por un lado, atrasando la fenología, generando que la madurez de la baya ocurra en épocas más frescas, por lo que conserva niveles mayores de acidez titulable y aumenta el contenido de polifenoles en uvas y en vino. Por otro lado, alterando el equilibrio vegetativo-reproductivo.

Objetivos específicos

1. Determinar el efecto de la fecha de poda sobre la evolución de la madurez de la baya y su composición química.
2. Determinar el efecto de la fecha de poda sobre la composición fenólica de la uva y del vino.

Materiales y métodos

Evolución de la madurez de la uva

Desde enero a cosecha, y durante los dos primeros años de ensayo, se realizaron muestreos de bayas aproximadamente cada 10 días para determinar la evolución del peso de baya, acumulación de sólidos solubles, pH y acidez. Para ello, se recolectaron de forma aleatoria 50 bayas por parcela, de las zonas apical, media y basal y de la cara expuesta e interna de los racimos. Se tomaron dos muestras por parcela, discriminando los racimos que provenían de brotes del nudo 1 y del nudo 2 del mismo pitón (Figura 4), es decir, se tomaron 100 bayas por parcela (50 de los racimos de la posición 1 y 50 de la posición 2). Las bayas se recolectaron sin su pedúnculo, se pesaron en el momento y se trituraron a mano en bolsa de plástico. Sobre el jugo se determinaron los sólidos solubles totales (refractómetro digital ATAGO, Pocket Pal-Salt), el pH (peachímetro Thermo Orion, 420 A Plus) y la acidez total expresada en gramos de ácido tartárico por litro de mosto por titulación ácido-base utilizando NaOH 0,1N y azul de bromotimol como indicador de neutralidad.

La evolución del peso de la baya, SST y azúcar por baya se analizó en función de los grados días acumulados desde el enero para observar el impacto del régimen térmico en la acumulación de azúcar (Sadras y Moran, 2012a). Para caracterizar la carga de azúcar de la baya, se ajustaron regresiones entre el azúcar por baya y los grados día para cada tratamiento, desde el inicio de la acumulación de azúcar hasta el peso máximo de la baya (Coombe y McCarthy, 2000; Deloire, 2011). El inicio de la

acumulación de azúcar en la baya se consideró al comienzo del envero y los grados día al inicio y al peso máximo de la baya se calcularon según Sadras y Petrie (2011a). La pendiente de las regresiones se consideró como la tasa de acumulación de azúcar (Sadras y Petrie, 2011a) y se utilizó para comparar la velocidad de carga de azúcar entre tratamientos (Sadras y Petrie, 2011a).

Composición fenólica de la uva y del vino

La recolección de bayas para la determinación de compuestos fenólicos se realizó con pedúnculo para evitar pérdidas de jugo y las muestras se conservaron en freezer a -20 °C, para su posterior procesamiento. Durante 2017-18, el muestreo se realizó de manera aleatoria como se explicó en el punto anterior desde mediados de diciembre hasta cosecha. A partir del 7 de febrero, se tomaron 2 muestras de 50 bayas cada una por parcela, tal como se describe en el punto anterior: 50 bayas provenientes de racimos del nudo 1 y 50 bayas provenientes de racimos del nudo 2 del mismo pitón. El muestreo de bayas de 2018-19 se realizó desde envero hasta cosecha, y consistió desde el comienzo en dos submuestras por unidad experimental.

Para la extracción de compuestos se tomaron 20 bayas de la muestra conservada a -20 °C, se pesaron y se separaron cuidadosamente los hollejos de la pulpa y de las semillas (Figura 25). Luego se pesaron los hollejos y se conservaron en bolsas de aluminio en freezer a -20 °C hasta su procesamiento. La extracción se realizó en frascos color caramelo, en donde se colocaron los hollejos de las 20 bayas por muestra con acetona al 70% en agua ultra pura (Milli-Q). Los frascos se incubaron durante una noche (17-18 h) en agitador orbital a 100-150 rpm y 15-20 °C. El líquido se trasvasó a un tubo falcon de 50 ml y se centrifugó por 5 minutos a 2500 rpm y el sobrenadante se colocó en un balón de destilación. Los extractos se concentraron mediante rotavapor (BÜCHI R-100, Flawil, Suiza), a 35-40 °C y presión reducida y se conservaron en freezer de -20 °C para su posterior análisis.

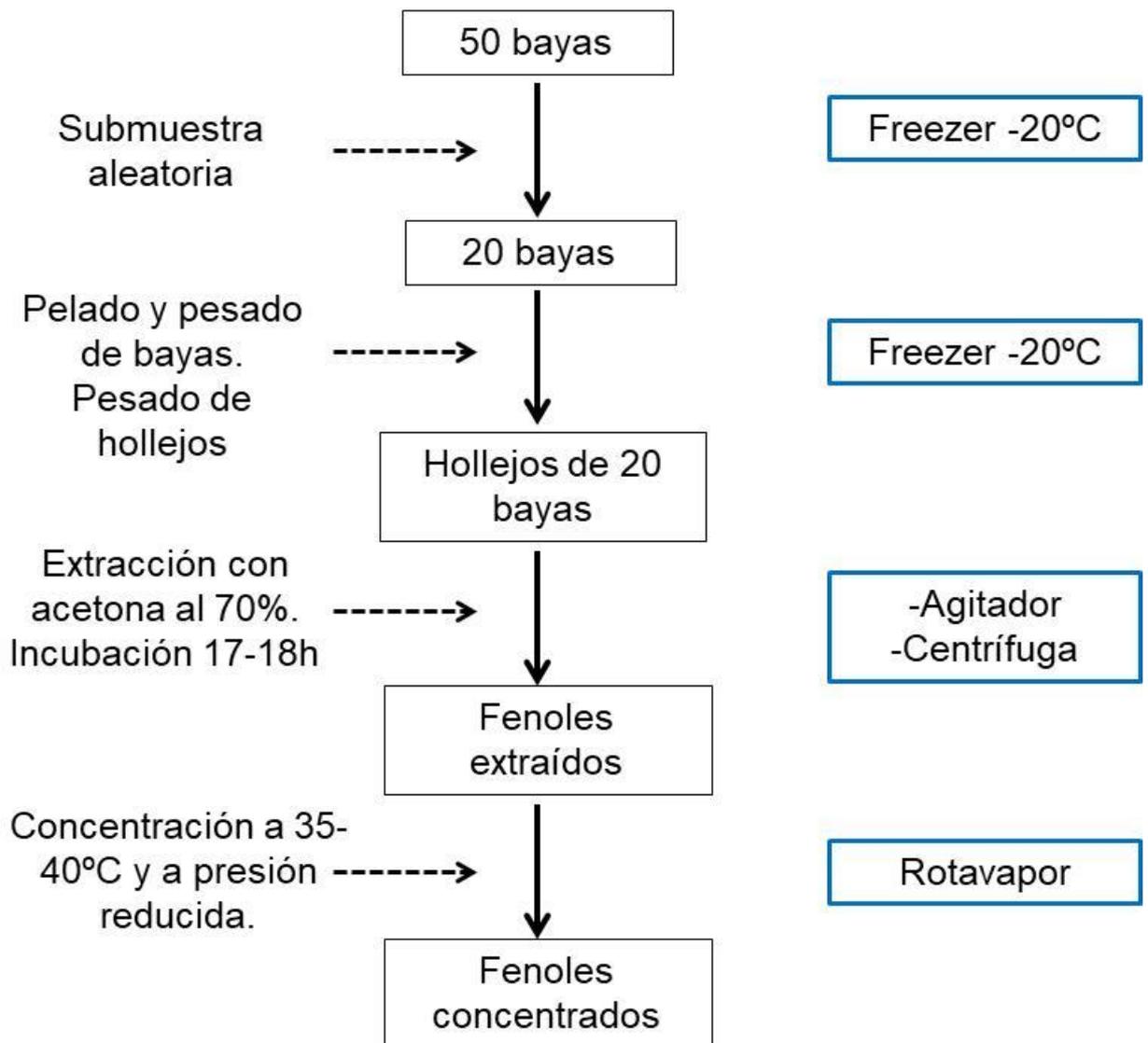


Figura 25. Esquema que resume la extracción de fenoles de los hollejos de las bayas. Los cuadros centrales resumen el producto de cada paso, partiendo del muestreo de 50 bayas por parcela y hasta llegar a la solución fenólica concentrada. Se muestra el instrumental (recuadros celestes) y el procedimiento necesario (columna izquierda) necesarios para cada paso.

Los parámetros fenólicos globales en hollejos y vinos (fenoles, taninos y antocianinas totales), se determinaron por espectrofotometría UV-Visible (Harbertson et al., 2002 y 2003; Heredia et al., 2006). En vinos, el proceso se basó en la distinción de dos clases de pigmentos poliméricos: pequeños y grandes. Los pequeños no precipitan en reacción con proteína y se blanquean a pH ácido en reacción con bisulfito mientras que los grandes reaccionan de manera opuesta (precipitan y no se blanquean). Basándose en estas propiedades diferenciales, se realizaron las reacciones sucesivas de separación de compuestos y la lectura por espectrofotometría (T60U PG Instruments Limited UV-visible, Lutterworth, Reino Unido), a diferentes longitudes de onda (510 y 520 nm). Las muestras y las soluciones auxiliares se colocaron en

cubetas plásticas de 1 mm de espesor y 0.5 cm de paso óptico. A cada lectura, se utilizó de blanco de reactivo una cubeta con las soluciones auxiliares correspondientes, pero sin muestra. De esta manera, se determinó el contenido total de antocianinas, fenoles y taninos.

La caracterización y cuantificación de antocianinas individuales se realizó en los vinos de la cosecha del 2019 por HPLC-DAD siguiendo la metodología reportada en estudios previos (Fanzone, 2012).

Caracterización de trayectorias de parámetros de madurez

La evolución de sólidos solubles, de peso de baya y de azúcar por baya respecto al tiempo cronológico y al tiempo térmico, se caracterizó con un modelo logístico (i.e. un modelo sigmoide cuya curva es simétrica respecto al punto de inflexión)

$$\text{Parámetro} = \frac{A_{max}}{1 + e^{\left(\frac{-x-x_0}{b}\right)}}$$

Donde A_{max} es la máxima concentración de sólidos solubles, de peso de baya o de cantidad de azúcar por baya; x_0 es el valor de x en el punto de inflexión de la curva y b es la pendiente alrededor del punto de inflexión. En base a los parámetros obtenidos, se calculó el comienzo de evolución del parámetro considerado, y se estimó la tasa de crecimiento como la relación entre la diferencia de $A_{max} \cdot 0.75$ y $A_{max} \cdot 0.25$ y el tiempo transcurrido entre estos dos momentos.

La evolución de acidez titulable respecto al tiempo se caracterizó con un modelo asintótico, el cual describe un (de) crecimiento limitado

$$AT = AT_{mín} - (AT_{mín} - AT_0) * e^{(-C \cdot X)}$$

Donde $AT_{mín}$ es el valor mínimo de acidez titulable, AT_0 es el valor de acidez cuando x es cero (i.e. la ordenada al origen) y C es la tasa de decrecimiento. En base a los parámetros obtenidos en los modelos de acumulación de sólidos solubles, se calculó la acidez titulable al momento de los 23°Brix.

La evolución de la concentración de fenoles y de taninos respecto al tiempo térmico se caracterizó con regresiones decrecientes de dos parámetros:

$$\text{Fenoles o Taninos} = A * e^{B \cdot GD}$$

En donde A es la ordenada al origen y B es el cambio de la concentración de fenoles o de taninos, por unidad de GD.

La evolución de la concentración de antocianinas respecto al tiempo térmico se caracterizó con regresiones en dos tramos con plateau:

$$\text{Antocianinas} = a + b * TT \quad \text{si } TT \leq TT_x$$

$$\text{Antocianinas} = a + b * TT_x \quad \text{si } TT > TT_x$$

En donde, a es la ordenada al origen (i.e. el valor de concentración de antocianinas al comienzo del tiempo térmico), b es la pendiente (i.e. el aumento de las antocianinas por cada GD en la fase linear) y TT_x es el punto del tiempo térmico, acumulado a partir del comienzo del envero, a partir del cual la concentración de antocianinas es máxima.

Composición química del vino

Una vez cosechada la uva de cada unidad experimental, los vinos se elaboraron a escala piloto según un protocolo estándar desarrollado en la planta piloto de elaboración de vinos de la EEA Mendoza (Fanzone et al., 2020). La fermentación alcohólica fue seguida de una fermentación maloláctica completa. Se determinaron parámetros analíticos generales del vino, siguiendo el método descrito por la Organización Internacional de la Vid y el Vino (2012), usando un analizador de vinos ALPHA FT-IR (Bruker Optics, Ettlingen, Germany). Asimismo, se evaluaron parámetros fenólicos globales (fenoles, taninos y antocianinas totales), por espectrofotometría UV-Visible (Harbertson et al., 2002 y 2003; Heredia et al., 2006).

Para una completa descripción y comprensión del color de los vinos, las muestras fueron evaluadas mediante el espacio de color CIELAB (Gordillo et al., 2012). Para ello, se comenzó con la centrifugación de las mismas (5 min a 11000 g) y posterior filtración (membrana de 0,22 mm; Microclar, Buenos Aires, Argentina). Luego, se realizó un barrido espectral completo de los vinos, entre 380-750 nm, con intervalos de 1 nm, empleando cubetas de vidrio de 1 mm de paso óptico, y utilizando agua destilada como blanco de referencia. Las lecturas de absorbancia se realizaron con un espectrofotómetro UV-visible Perkin-Elmer Modelo Lambda 25 (PerkinElmer, Hartford, CT).

Los parámetros CIELAB [L^* (claridad; 0 negro y 100 blanco), C^*_{ab} (saturación del color), h_{ab} (matiz o tonalidad; rojo, verde, amarillo) y las coordenadas a^* b^* (rojo/verde, amarillo/azul)], fueron calculados con el paquete colorsience R (Gama, 2016) del software R.

Finalmente, se determinaron las diferencias de color entre las distintas muestras, con el objetivo de estimar la posibilidad de diferenciación visual entre las mismas. Para

ello, la diferencia de color (ΔE^*_{ab}) fue calculada como la distancia euclídeana entre dos puntos (1 and 2) en el espacio tridimensional ($L^* a^* b^*$). $\Delta E^*_{ab} (L^*_1, a^*_1, b^*_1; L^*_2, a^*_2, b^*_2) = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2}$, donde $\Delta L^* = L^*_1 - L^*_2$; $\Delta a^* = a^*_1 - a^*_2$ y $\Delta b^* = b^*_1 - b^*_2$.

$$\Delta E^*_{ab} = [(L^*_2 - L^*_1) + (a^*_2 - a^*_1) + (b^*_2 - b^*_1)]^{1/2}$$

Análisis sensorial de los vinos

Los vinos resultantes del ensayo experimental del año 2019 se sometieron a una evaluación organoléptica en el Centro de Estudios Enológicos, de la EEA Mendoza del INTA. La evaluación se realizó 6 meses después de la elaboración. Se aplicó un análisis cuantitativo descriptivo (QDA) con 13 jueces entrenados (Lawless y Heymann, 2010). El entrenamiento para la identificación de atributos olfativos y gustativos fue realizado durante dos sesiones (45 min c/u). Los mismos fueron consensuados por los panelistas, empleándose estándares de referencia preparados como se indica en la bibliografía (Noble et al., 1987; Hopfer et al., 2012). Los atributos de color (intensidad de color, matiz rojo y matiz violeta), del olfato (intensidad aromática, frutal, vegetal, especiado, terroso, floral) así como también atributos relacionados con la astringencia, el amargor y la acidez, fueron analizados mediante una escala no estructurada (por duplicado en 6 sesiones sucesivas), empleando el software Soldesa (Rodríguez et al., 2014). Se evaluaron 8 vinos por sesión en un diseño en bloques completos aleatorizado. En todos los casos, las evaluaciones fueron realizadas en el Centro de Estudios de Enología (INTA, EEA Mendoza), con copas técnicas (ISO 3591) y bajo condiciones ambientales estandarizadas.

Análisis estadístico

Los resultados se analizaron con el software Infostat (versión 1.5; Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina) utilizando el módulo de análisis multivariado (análisis de componentes principales) y el de modelos lineales mixtos, que incluyeron la temporada y la fecha de poda como efectos fijos y sus interacciones; y el bloque como efecto aleatorio. En los datos de medidas repetidas en el tiempo, se agregó la unidad experimental al modelo como un efecto aleatorio para indicar correlación. Se realizaron regresiones no lineales para determinar relación entre variables. Los parámetros fenólicos se analizaron considerando el tiempo térmico desde brotación para fenoles y taninos, y desde el comienzo del envero para antocianinas a fin de evaluar si las diferencias observadas entre tratamientos o entre temporadas fueron atribuibles a la fecha de poda o a otra variable que pudiera causar

un retraso en el desarrollo de las plantas (Sadras y Moran, 2012a). Las regresiones no lineales se ajustaron con el software R (R Core Team), usando el paquete “nlme” de modelos no lineales mixtos (Pinheiro, J; Bates D; DebRoy, S; Sarkar, 2022). Las medias se compararon mediante la prueba múltiple de Fisher ($p \leq 0.05$).

Resultados

Madurez de la baya

Para caracterizar la evolución del peso de baya, sólidos solubles y azúcar por baya se realizaron regresiones no lineales respecto a los días desde el envero y a los grados día acumulados desde el envero. Para distinguir entre las curvas, se ajustaron con una función sigmoïdal y se compararon utilizando una prueba de F.

Las plantas podadas tardíamente presentaron una mayor concentración de sólidos solubles respecto a los días transcurridos desde el envero y a una misma temperatura acumulada desde el envero, ambos años del experimento (Figura 26).

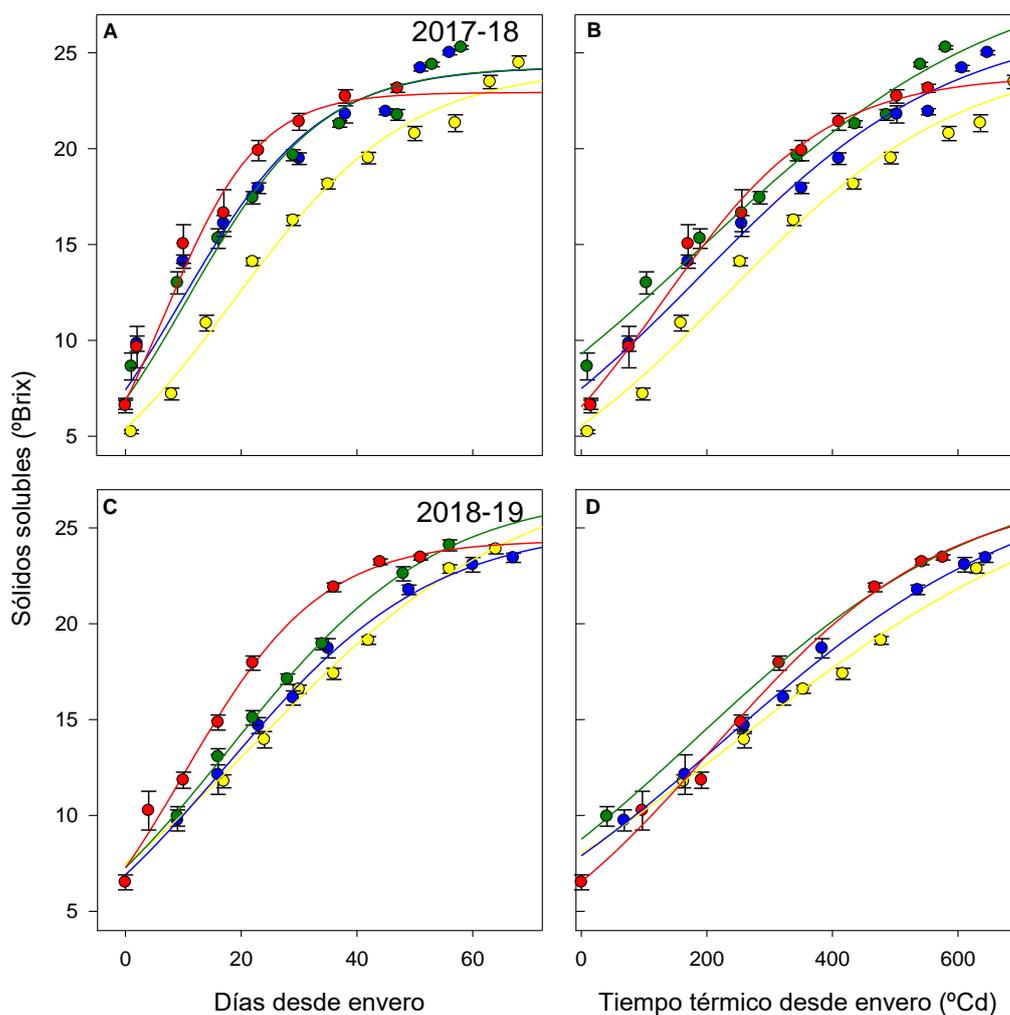


Figura 26. Evolución de la concentración de los sólidos solubles respecto a los días (A y C) y al tiempo térmico (B y D) desde el envero hasta la cosecha para las temporadas 2017-18 (paneles de arriba) y 2018-19 (paneles de abajo) para plantas de Malbec podadas durante el invierno (PI, ●), en brotación (Br, ●), con 2-3 hojas (2-3H, ●) y con 8 hojas expandidas (8H, ●). Los puntos representan la media de 4 repeticiones \pm error estándar de cada fecha de muestreo.

Tabla 15: Valores de F de comparando los ajustes de los sólidos solubles respecto a a los días desde el comienzo del envero y a la acumulación de temperatura. El análisis estadístico se realizó para comparar las fechas de poda sobre la acumulación de sólidos solubles.

Concentración de sólidos solubles respecto al tiempo transcurrido desde el envero								
	2017-18				2018-19			
	PI	Br	2-3H	8H	PI	Br	2-3H	8H
PI		77,1 *	61,1 *	73,2 *		3,4 *	22,5 *	70,5 *
Br			0,7 ns	4,4 *			7,3 *	37,5 *
2-3H				5,5 *				23,7 *
8H								

Concentración de sólidos solubles respecto al tiempo térmico transcurrido desde el envero								
	2017-18				2018-19			
	PI	Br	2-3H	8H	PI	Br	2-3H	8H
PI		41,9 *	99,4 *	35,9 *		5,9 *	46,4 *	27,1 *
Br			16,4 *	5,2 *			11,3 *	5,5 *
2-3H				6,0 *				10,6 *
8H								

*: Modelos distintos ($F_{muestral} > F_{tabla}$, para un p valor de 0.05)
 ns: Modelos similares ($F_{muestral} < F_{tabla}$, para un p-valor de 0.05)

Las curvas de la evolución del peso de baya de los tratamientos de poda tardía fueron significativamente diferentes a las de la poda invernal, ambas temporadas (Tabla 15, Figura 26). Las bayas de plantas podadas tardíamente presentaron mayor peso de baya respecto al testigo desde el comienzo del envero (Figura 26, A y C). Esta diferencia se mantuvo hasta cosecha, sobre todo la primera temporada. El punto de transición x_0 de las bayas de la poda tardía es menor respecto al testigo (Tabla 17), por lo que puede decirse que la poda tardía acorta el tiempo de evolución de peso de baya, luego del envero. Además, las plantas podadas con 8 hojas presentan una menor pendiente de aumento del peso de baya. La evolución del peso de baya de los tratamientos de poda tardía alcanzó mayores valores a similares grados día acumulados (Figura 26, B y D). En ambas temporadas, las bayas de los tratamientos Br y 2-3H alcanzaron su peso máximo acumulando menor temperatura que las de PI. Por su parte, las plantas podadas en brotación y con 2-3 hojas alcanzaron el peso máximo de baya aproximadamente el mismo día de muestreo, acumulando para ello un promedio de 108 y 136 °Cd menos que el testigo, en ambas temporadas, respectivamente. Por otro lado, se observó una progresión lineal del peso de las bayas

hasta la cosecha en las plantas podadas en 8H en ambas temporadas, determinando que el peso máximo de la baya fuera el del momento de cosecha (Figuras S2 y S3 del Anexo II).

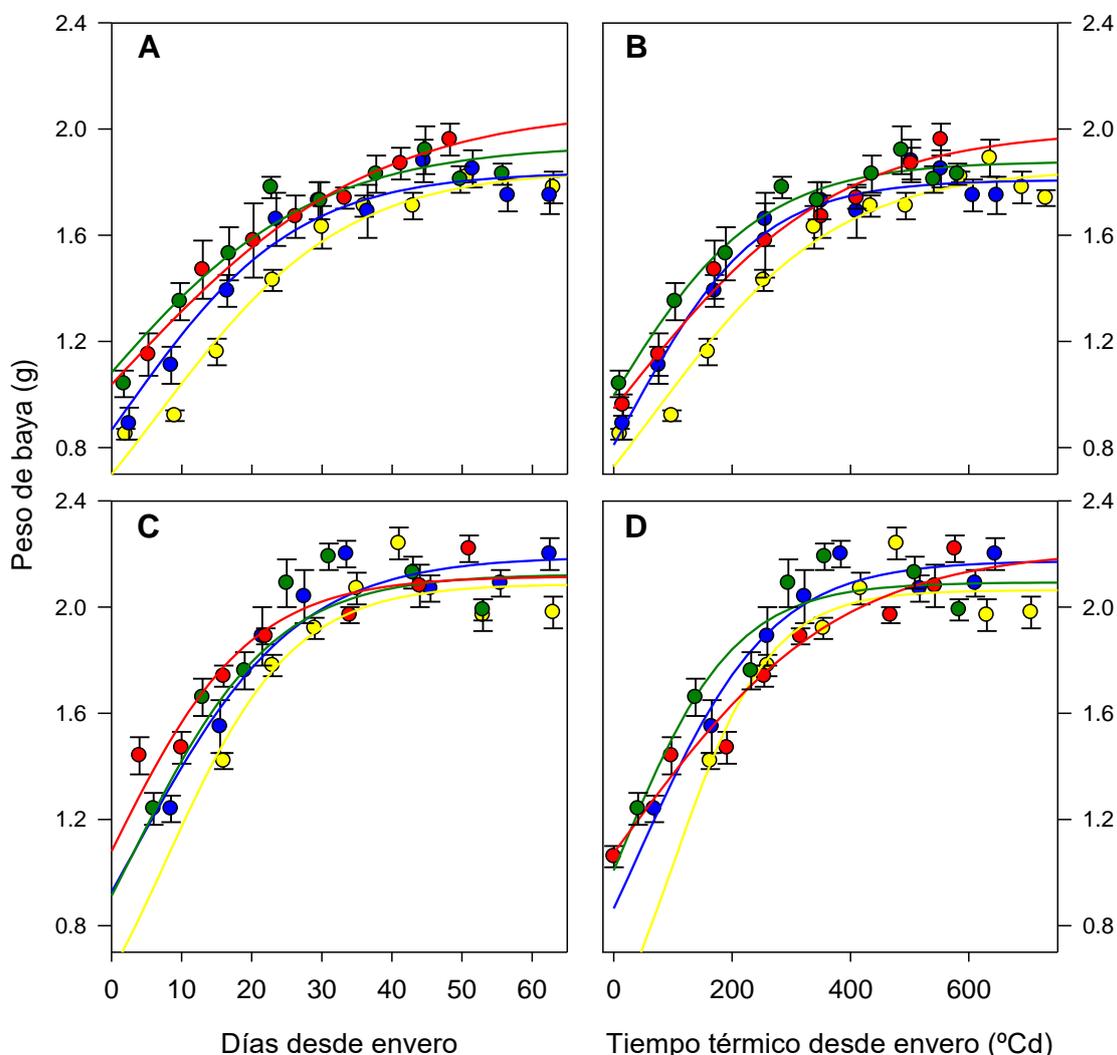


Figura 27. Evolución del peso de baya respecto a los días (A y C) y al tiempo térmico (B y D) desde el envero hasta la cosecha para las temporadas 2017-18 (paneles de arriba) y 2018-19 (paneles de abajo) para plantas de Malbec podadas durante el invierno (PI, ●), en brotación (Br, ●), con 2-3 hojas (2-3H, ●) y con 8 hojas expandidas (8H, ●). Los puntos representan la media de 4 repeticiones \pm error estándar de cada fecha de muestreo.

Tabla 16: Valores de F de comparando los ajustes del peso de la baya respecto a los días desde el comienzo del envero y a la acumulación de temperatura. El análisis estadístico se realizó para comparar las fechas de poda sobre la evolución del peso de baya.

Peso de baya respecto al tiempo transcurrido desde el enero

	2017-18				2018-19			
	PI	Br	2-3H	8H	PI	Br	2-3H	8H
PI		5,7 *	24,2 *	19,3 *		4,6 *	4,8 *	14,3 *
Br			6,4 *	4,7 *			0,3 ns	3,5 *
2-3H				0,6 ns				3,1 *
8H								

Peso de baya respecto al tiempo térmico transcurrido desde el enero

	2017-18				2018-19			
	PI	Br	2-3H	8H	PI	Br	2-3H	8H
PI		6,1 *	19,6 *	8,7 *		4,1 *	6,7 *	4,0 *
Br			2,9 *	1,2 ns			1,8 ns	2,9 *
2-3H				1,4 ns				4,7 *
8H								

*: Modelos distintos ($F_{muestral} > F_{tabla}$, para un p valor de 0.05)

ns: Modelos similares ($F_{muestral} < F_{tabla}$, para un p-valor de 0.05)

Tabla 17: Parámetros de las curvas sigmoides de la Figura 27 A y C que describe la evolución del peso de baya para las temporadas 2017-18 y 2018-19 para los plantas podadas en invierno, brotación, 2-3 hojas y 8 hojas. La diferencia significativa entre los tratamientos se indica con letras diferentes ($P < 0,05$ por la prueba de Fisher).

Fecha de poda	PB _{max} (g)	x ₀ (d)	b (d)	Duración de transición (d)	Pendiente (g d ⁻¹)
Poda invernal	2,0 ± 0,0	6,4 ± 0,7	a 11,5 ± 0,7	a 30,1 ± 3,0	b 0,04 ± 0,0
Brotación	2,0 ± 0,0	2,1 ± 0,7	b 9,4 ± 0,7	b 30,7 ± 3,0	b 0,04 ± 0,0
2-3 hojas	2,0 ± 0,0	2,0 ± 0,7	b 9,4 ± 0,7	b 32,6 ± 3,0	b 0,04 ± 0,0
8 hojas	2,0 ± 0,0	-0,7 ± 0,7	c 11,4 ± 0,7	a 47,9 ± 3,0	a 0,03 ± 0,0
p-valor	0,4646	<0.0001	0,0115	0,0009	0,0047
Temporada					
2017-18	1,9 ± 0,0	b 1,8 ± 0,3	b 10,2 ± 0,5	44,6 ± 0,0	a 0,02 ± 0,0
2018-19	2,1 ± 0,0	a 3,6 ± 0,3	a 10,3 ± 0,5	26,1 ± 0,0	b 0,04 ± 0,0
p-value	<0.0001	0,2084	0,9959	<0.0001	<0.0001
Interacción	0,5861	0,1621	0,0121	0,6320	0,0625

Dentro de cada parámetro y cada temporada, letras diferentes implican una diferencia estadística entre tratamientos (p-valor <0.05 para la prueba de Fischer).

Tal como sucedió con la evolución de los sólidos solubles y del peso de baya, las curvas de la evolución del azúcar de baya de los tratamientos de poda tardía fueron significativamente diferentes a las de la poda invernal, ambas temporadas (Tabla S1, Figura S4). Desde el enero y hasta la cosecha, el azúcar por baya de los tratamientos de poda tardía fue mayor a igual al de la poda invernal (Figura S4, A y C).

Para comparar la velocidad de carga activa de azúcar en la baya, se compararon las pendientes entre el azúcar por baya y los grados días acumulados desde enero, hasta el momento en que se alcanza el peso máximo de baya (Figura S3, Anexo II). Para la temporada 2017-18, las tres últimas podas presentaron mayor tasa de

acumulación de azúcar por grado día (es decir, mayor pendiente), de acuerdo con la acumulación más rápida de SST mencionada anteriormente. Para la temporada 2018-19, Br y 2-3H presentaron una mayor tasa de acumulación de azúcar por grado día; las plantas de 8H, si bien presentaron la misma pendiente que PI, mantuvieron la carga activa de azúcar por más tiempo, debido al progreso lineal del peso de baya.

Tanto durante la temporada 2017-18 como en 2018-19, la acidez de la baya al comienzo del ciclo fue mayor para las podas tardías, debido a que la fecha de envero se retrasó (Figura 28). La evolución de la acidez a lo largo de las fechas de muestreo se ve retrasada para las podas tardías respecto a la poda invernal (Figura 28, A y D). Las podas realizadas en brotación y con 2-3 hojas se acoplaron a la poda invernal a mediados de febrero, mientras que la poda realizada con 8 hojas mantuvo una mayor acidez hasta el final de la temporada.

Para caracterizar la evolución de la acidez respecto al comienzo del envero (i.e. 1% de bayas coloreadas), se ajustaron regresiones no lineales asintóticas cuyos parámetros pueden observarse en la Tabla 19. La acidez de la baya al comienzo del envero es menor para las podas tardías, ambas temporadas. Por otra parte, la tasa de degradación de la acidez es sólo menor para las bayas de plantas podada con 8 hojas. Respecto a la evolución de sólidos solubles, la poda tardía mantiene un mayor nivel de acidez, respecto a la poda invernal. Esta diferencia va disminuyendo a medida que aumenta la concentración de azúcar. Es decir, con 20 °Brix, las plantas podadas en Br, con 2-3H y 8H presentan 0.9, 1.3 y 4.9 g/L más acidez que PI, respectivamente, mientras que a los 23 °Brix, sólo las plantas podadas con 2-3H y 8H presentan mayor acidez (i.e. 0,5 y 1,9 g/L más que las plantas podadas en invierno).

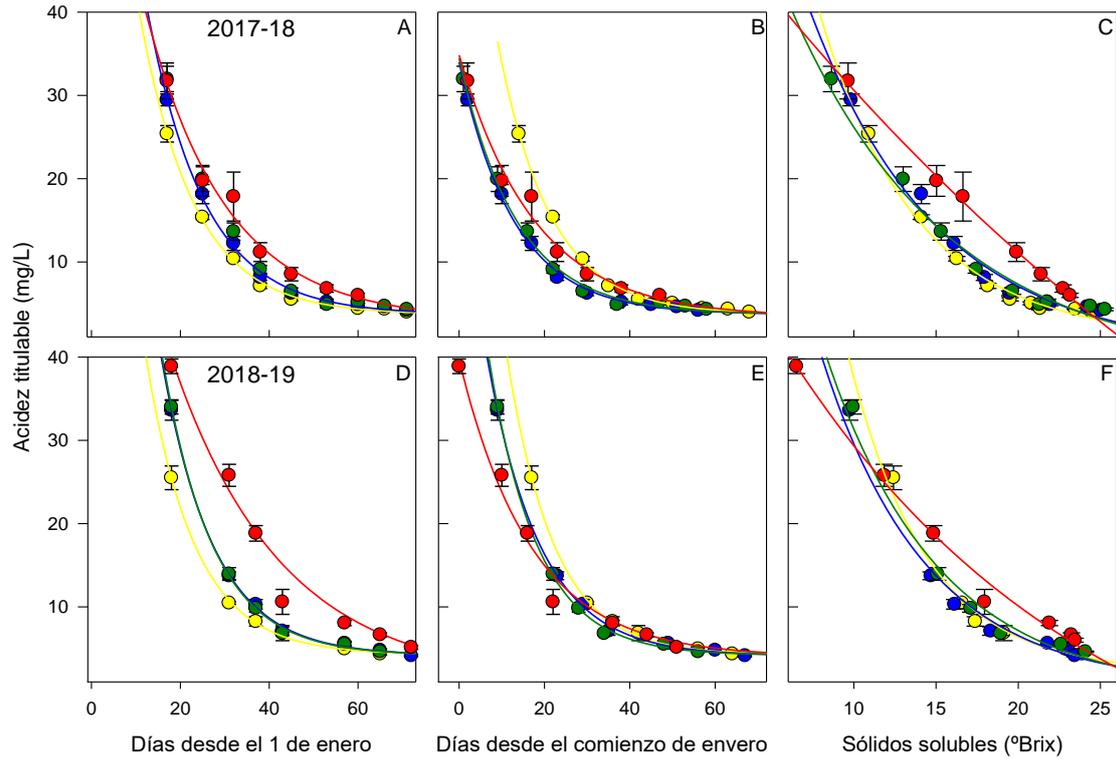


Figura 28. Progresión de acidez titulable (g/L) durante las temporadas 2017-18 (paneles superiores) y 2018-19 (paneles inferiores). La evolución de la acidez se proyecta respecto a la fecha de muestreo, los días desde el comienzo del envero y a los sólidos solubles (°Brix). Las líneas suavizadas corresponden a los modelos ajustados de grado dos. Los valores son medias de 4 unidades experimentales \pm error estándar.

Tabla 18: Valores de F de comparando los ajustes de la acidez titulable respecto a la fecha de muestreo, a los días desde el comienzo del envero y a la acumulación de sólidos solubles. El análisis estadístico se realizó para comparar las fechas de poda sobre la degradación de la acidez titulable.

Acidez titulable respecto al primero de enero

	2017-18				2018-19			
	PI	Br	2-3H	8H	PI	Br	2-3H	8H
PI		24,6 *	34,5 *	19,3 *		53,9 *	60,1 *	179,2 *
Br			5,7 *	6,6 *			0,2 ns	96,1 *
2-3H				2,6 ns				96,1 *
8H								

Acidez titulable respecto al comienzo del enero

	2017-18				2018-19			
	PI	Br	2-3H	8H	PI	Br	2-3H	8H
PI		168,5 *	86,4 *	14,2 *		20,0 *	25,8 *	28,6 *
Br			0,4 ns	6,3 *			1,0 ns	35,0 *
2-3H				3,9 *				40,6 *
8H								

Acidez titulable respecto a los sólidos solubles

	2017-18				2018-19			
	PI	Br	2-3H	8H	PI	Br	2-3H	8H
PI		6,9 *	13,8 *	168,3 *		8,2 *	4,6 *	42,2 *
Br			4,1 *	66,0 *			1,7 ns	34,8 *
2-3H				70,2 *				22,8 *
8H								

*: Modelos distintos ($F_{muestral} > F_{tabla}$, para un p valor de 0.05)

ns: Modelos similares ($F_{muestral} < F_{tabla}$, para un p -valor de 0.05)

Tabla 19. Parámetros de las curvas ajustadas de la Figura 28. B y E, y acidez titulable al momento de los 20 y 23 °Brix para las temporadas 2017-18 y 2018-19 para las plantas podadas en invierno, brotación, 2-3 hojas y 8 hojas. La diferencia significativa entre los tratamientos se indica con letras diferentes ($P < 0,05$ por la prueba de Fisher).

Fecha de poda	AT _{min}	AT _o	C	Acidez 20°Brix	Acidez 23°Brix
Poda invernal	3,9 ± 0	77,3 ± 3,1 a	-0,09 ± 0,0 a	5,9 ± 0,2 c	4,2 ± 0,1 c
Brotación	3,9 ± 0	49,4 ± 3,1 b	-0,08 ± 0,0 a	6,8 ± 0,2 b	4,4 ± 0,1 bc
2-3 hojas	3,9 ± 0	52,6 ± 3,1 b	-0,08 ± 0,0 a	7,2 ± 0,2 b	4,7 ± 0,1 b
8 hojas	3,8 ± 0	37,2 ± 3,1 c	-0,06 ± 0,0 b	10,8 ± 0,2 a	6,1 ± 0,1 a
p-valor	0,9875	<0.0001	0,0014	<0.0001	<0.0001
Temporada					
2017-18	3,7 ± 0,2	44,1 ± 4,4 b	-0,07 ± 0,0	7,9 ± 0,1 a	4,8 ± 0,1
2018-19	4,0 ± 0,2	70,8 ± 4,4 a	-0,08 ± 0,0	7,4 ± 0,1 b	4,9 ± 0,1
p-valor	0,2166	0,0002	0,3544	0,0128	0,3930
Interacción	0,7569	0,2662	0,8222	0,1951	0,1155

Dentro de cada parámetro y cada temporada, letras diferentes implican una diferencia estadística entre tratamientos (p -valor <0.05 para la prueba de Fischer).

Durante 2017-18, la evolución de pH por baya fue similar para los distintos tratamientos. El tratamiento de 2-3 hojas presentó un retraso de aproximadamente 7 días respecto al resto. Finalmente, hacia mediados de febrero se acopló al resto de los tratamientos. Durante 2018-19, al comienzo del muestro (cerca del enero), todos los

tratamientos de poda tardía presentaron menores valores de pH respecto a plantas podadas en el invierno. Mientras que las plantas podadas en brotación y con 2-3 hojas se acoplaron a las plantas podadas en invierno hacia mediados de febrero, las plantas podadas con 8 hojas se mantuvieron con un menor pH durante todo el periodo de madurez, aunque no presentaron diferencias en pH al momento de cosecha (Figura 29).

Para evaluar la trayectoria del pH respecto al envero, se realizaron regresiones respecto a los días desde el comienzo de coloración de las bayas (Figura 29, B y D). Como se observa, las bayas podadas tardíamente presentaron un mayor valor de pH desde el comienzo del envero. Esto se debió principalmente a un mayor valor de pH en el comienzo y, en el caso de 8H, también a una mayor velocidad en el aumento del pH (Tabla 20). No obstante, el pH registrado a 20 y a 23 °Brix fue similar entre tratamientos.

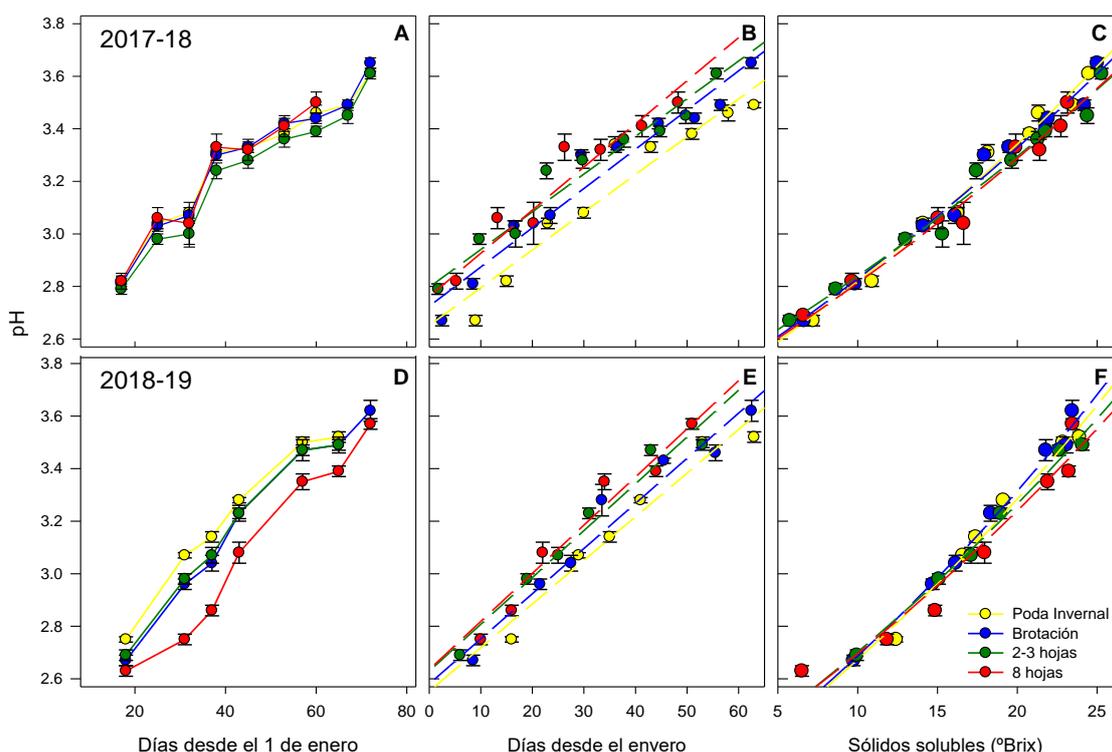


Figura 29. Progresión de pH durante las temporadas 2017-18 (paneles superiores) y 2018-19 (paneles inferiores). La evolución de la acidez se proyecta respecto a la fecha de muestreo, a los días transcurridos desde el comienzo del envero y a los sólidos solubles (°Brix). Los valores son medias de 4 unidades experimentales \pm error estándar.

Tabla 20: Parámetros de la evolución del pH de la Figura 29. B y E, y pH al momento de los 20 y 23 °Brix para las temporadas 2017-18 y 2018-19 para las plantas podadas en invierno, brotación, 2-3 hojas y 8 hojas. La diferencia significativa entre los tratamientos se indica con letras diferentes ($P < 0.05$ por la prueba de Fisher).

Fecha de poda	pH ₀	Aumento pH (d ⁻¹)	pH a 20°Brix	pH 23°Brix
Poda invernal	2,6 ± 0,0 c	0,02 ± 0,0 b	3,4 ± 0,1 a	3,6 ± 0,1
Brotación	2,7 ± 0,0 b	0,02 ± 0,0 b	3,3 ± 0,1 a	3,5 ± 0,1
2-3 hojas	2,7 ± 0,0 a	0,02 ± 0,0 ab	3,3 ± 0,1 a	3,5 ± 0,1
8 hojas	2,7 ± 0,0 a	0,02 ± 0,0 a	3,3 ± 0,1 b	3,5 ± 0,1
p-valor	<0.0001	0,0329	0,8737	0,8181
Temporada				
2017-18	2,7 ± 0,0 a	0,02 ± 0,0 b	3,4 ± 0,1	3,6 ± 0,1
2018-19	2,6 ± 0,0 b	0,02 ± 0,0 a	3,3 ± 0,1	3,5 ± 0,1
p-valor	<0.0001	<0.0001	0,2131	0,4591
Interacción	0,3715	0,6003	0,1992	0,2125

Dentro de cada parámetro y cada temporada, letras diferentes implican una diferencia estadística entre tratamientos (p-valor <0.05 para la prueba de Fischer).

Con el fin de determinar si aumento en el pH durante la madurez respondió solamente a la disminución de la acidez, se realizaron regresiones no lineales entre estos dos parámetros para ambas temporadas (Figura 30, Tabla 21). Tal como puede verse, la poda realizada con 8H presenta mayores valores de pH para iguales valores de acidez, sobre todo cuando son menores a 20 g/L.

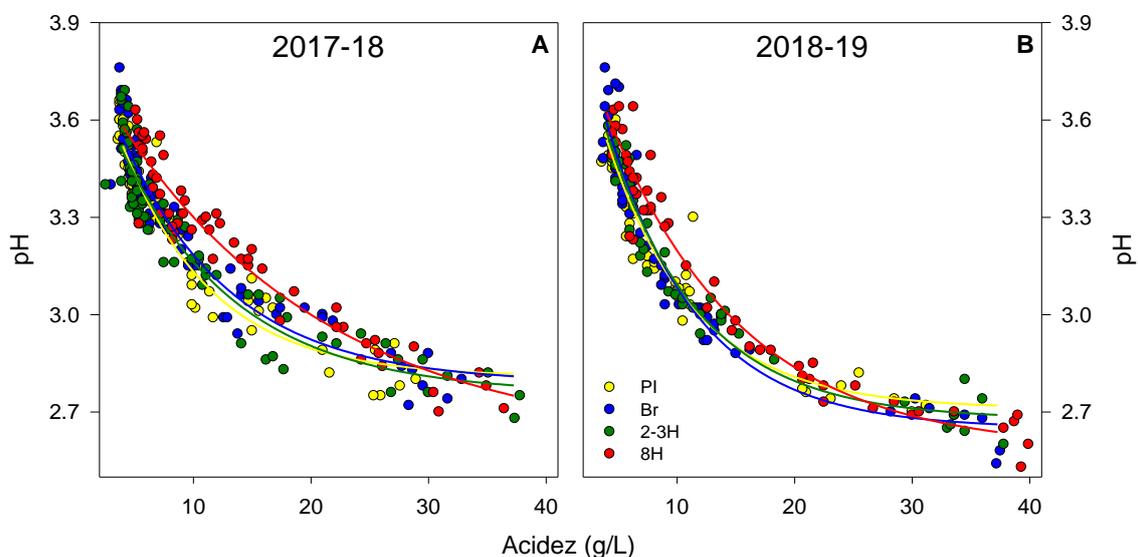


Figura 30. Variación pH respecto a la acidez total de las bayas durante las temporadas 2017-18 (A) y 2018-19 (B). Las líneas suavizadas corresponden a las regresiones no lineales ajustadas. Los valores corresponden a los de las bayas de cada unidad experimental a lo largo de la madurez.

Tabla 21. Parámetros de la evolución del pH respecto a la acidez titulable de la Figura 30 para las temporadas 2017-18 y 2018-19 para los plantas podadas en invierno, brotación, 2-3 hojas y 8 hojas. La diferencia significativa entre los tratamientos se indica con letras diferentes (P <0.05 por la prueba de Fisher).

Fecha de poda	pH mín		pH _o		C
Poda invernal	2,7 ± 0,0	a	4,1 ± 0,1		-0,13 ± 0,0 b
Brotación	2,7 ± 0,0	a	4,1 ± 0,1		-0,12 ± 0,0 b
2-3 hojas	2,7 ± 0,0	a	4,0 ± 0,1		-0,12 ± 0,0 b
8 hojas	2,6 ± 0,0	b	3,9 ± 0,1		-0,07 ± 0,0 a
p-valor	0,0006		0,1709		0,0006
Temporada					
2017-18	2,7 ± 0,0	a	3,9 ± 0,0	b	-0,10 ± 0,0
2018-19	2,7 ± 0,0	b	4,1 ± 0,0	a	-0,12 ± 0,0
p-valor	0,0215		0,0008		0,0752
Interacción	0,3262		0,7781		0,6175

Dentro de cada parámetro y cada temporada, letras diferentes implican una diferencia estadística entre tratamientos (p -valor < 0.05 para la prueba de Fischer).

Tabla 22: Valores de F de comparando los ajustes del pH respecto a la acidez titulable. El análisis estadístico se realizó para comparar las fechas de poda según la evolución de pH respecto a la acidez titulable.

	2017-18				2018-19			
	PI	Br	2-3H	8H	PI	Br	2-3H	8H
PI		2,6 ns	0,6 ns	26,3 *		1,9 ns	0,6 ns	13,0 *
Br			1,9 ns	11,7 *			0,6 ns	9,5 *
2-3H				17,9 *				12,5 *
8H								

*: Modelos distintos (F muestral $> F$ tabla, para un p valor de 0.05)

ns: Modelos similares (F muestral $< F$ tabla, para un p -valor de 0.05)

En la Tabla 23 se muestran los parámetros de las bayas al momento de la cosecha para los 3 años del ensayo. Tal como se muestra en la tabla, la temporada considerada tuvo efecto sobre todos los parámetros medidos, excepto en el pH.

El efecto de la fecha de poda sobre los sólidos solubles a cosecha varió según el año considerado. Durante la cosecha del 2018, el tratamiento invernal presentó 24,5 °Brix. Esta concentración fue similar al tratamiento de brotación, pero 1,3 °Brix mayor al de 8H y 0,8 °Brix menor al de 2-3H. Sin embargo, las cosechas de 2019 y de 2020 presentaron similar concentración de sólidos solubles con un promedio de 23,7 y 25,2 °Brix, respectivamente.

Respecto al peso de baya, la fecha de poda también tuvo un efecto diferente según la temporada considerada. El tratamiento de 8H tuvo bayas más pesadas los años 2018 y 2019, y el tratamiento realizado en brotación tuvo bayas más grandes la segunda cosecha e iguales a las de 8H. No obstante, el peso de baya fue similar entre tratamientos en la cosecha del 2020.

Debido al efecto de la fecha de poda sobre los sólidos solubles y sobre el peso de baya, la cantidad de azúcar por baya fue similar entre tratamientos. No obstante, la cosecha del 2020 fue la que presentó mayor cantidad de azúcar, la del 2018 la que menos cantidad presentó, mientras que el azúcar por baya de la cosecha del 2019 tuvo valores intermedios.

Al momento de cosecha no se registraron diferencias en el nivel de pH entre tratamientos ni entre temporadas. La interacción entre estos dos factores se debe a que el tratamiento con 8 hojas presentó menor pH la primera temporada (2018), y el de 2-3 hojas en la segunda temporada (2019), aunque esto no fue consistente con el resto de las temporadas.

Al momento de cosecha, la acidez fue siempre mayor para las bayas provenientes del tratamiento de 8 hojas (Tabla 23), mientras que en 2020 el contenido de acidez por baya fue mayor que las otras dos temporadas. La interacción entre estos dos factores se debe a que, en la temporada del 2019, el tratamiento 2-3H presentó mayor acidez por baya que el testigo y similar al de 8H.

Considerando que el efecto de la fecha de poda sobre la acidez de la baya y que el azúcar por baya fue similar entre tratamientos, las plantas podadas con 8 hojas presentaron una menor relación azúcar-acidez. No obstante, las bayas cosechadas el 2020 no presentaron diferencias en esta relación de parámetros.

Tabla 23. *Peso de baya (g), azúcar por baya (g/baya), acidez titulable (g/L), pH y relación de azúcares/acidez de cada fecha de poda al momento de cosecha de los años 2018, 2019 y 2020. Dentro de cada parámetro y cada temporada, letras diferentes implican diferencias estadísticas para las fechas de poda ($P < 0.05$ por la prueba de Fisher).*

Fecha de poda	SST (°Brix)	Peso baya (g)	Azúcar (g/baya)	Acidez por baya (g/L)	pH	Azúcar/Acidez
Poda invernal	24,5 ± 0,2 b	2,0 ± 0,0 b	0,4 ± 0,0	4,4 ± 0,1 b	3,6 ± 0,0	0,1 ± 0,0 a
Brotación	24,5 ± 0,2 b	2,0 ± 0,0 b	0,4 ± 0,0	4,5 ± 0,1 b	3,6 ± 0,0	0,1 ± 0,0 a
2-3 hojas	25,0 ± 0,2 a	2,0 ± 0,0 b	0,4 ± 0,0	4,6 ± 0,1 b	3,6 ± 0,0	0,1 ± 0,0 a
8 hojas	24,0 ± 0,2 b	2,1 ± 0,0 a	0,5 ± 0,0	5,6 ± 0,1 a	3,6 ± 0,0	0,1 ± 0,0 b
p-valor	0,0017	0,0099	0,2282	<0.0001	0,0711	0,0002
Temporada						
2017-18	24,5 ± 0,1 b	1,8 ± 0,0 b	0,4 ± 0,0 c	4,6 ± 0,1 b	3,6 ± 0,0	0,1 ± 0,0 b
2018-19	23,7 ± 0,1 c	2,1 ± 0,0 a	0,5 ± 0,0 b	4,6 ± 0,1 b	3,6 ± 0,0	0,1 ± 0,0 a
2019-20	25,2 ± 0,2 a	2,1 ± 0,0 a	0,5 ± 0,0 a	5,1 ± 0,1 a	3,6 ± 0,0	0,1 ± 0,0 ab
p-valor	<0.0001	<0.0001	<0.0001	0,0012	0,0771	0,0086
Interacción	0,0005	0,0499	0,2659	0,0083	0,022	0,0151

Dentro de cada parámetro y cada temporada, letras diferentes implican una diferencia estadística entre tratamientos (p -valor <0.05 para la prueba de Fischer).

La evolución del peso de hollejos en la madurez muestra que durante 2017-18 y desde mediados de enero, mientras más tardía fue la poda, las bayas tuvieron una mayor masa de hollejos (Figura 31, A). Teniendo en cuenta que las bayas de la poda tardía enveraron más tarde que las del tratamiento invernal, analizando la regresión obtenida desde el comienzo del envero, la tasa de aumento en el peso de hollejos fue mayor para las podas tardías (Figura 31, B). Las podas realizadas en brotación y con 2-3 hojas presentaron una tasa un 30% mayor que la poda invernal, mientras que la tasa de 8H fue de 54% más que el testigo.

Durante 2018-19, se observa un retraso en la evolución del peso de hollejo (Figura 31, C). Los tratamientos Br y 2-3H alcanzaron a PI a mediados de enero, mientras que el 8H lo hizo aproximadamente un mes después. Sin embargo, las bayas provenientes de la fecha de poda de 8 hojas fueron cosechadas con un peso de hollejo 10% mayor al testigo. Se observó que el peso de hollejo de los tratamientos PI, Br y 2-3H es similar (Figura 31 D).

Por otro lado, el tratamiento de 8H, presenta una mayor tasa de aumento (i.e. 94% mayor que el testigo) del peso de hollejo a partir del envero, presentando un mayor valor a cosecha.

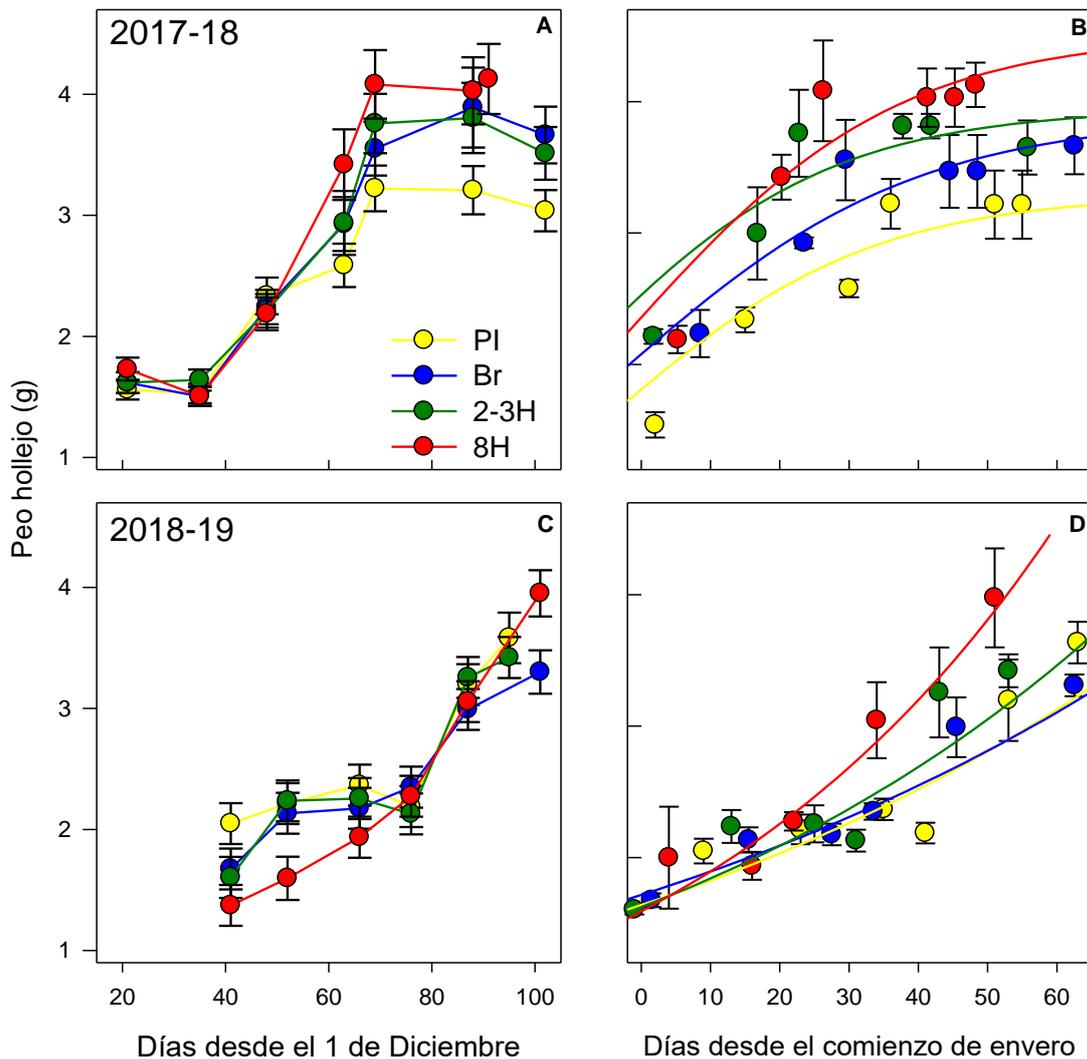


Figura 31. Evolución de la concentración del peso de hollejos respecto a los días del año (A y C) y a los días desde el enero, con sus correspondientes ecuaciones ajustadas (B y D) para 2017-18 y 2018-19, registrada para las distintas fechas de poda durante la madurez de la baya. Los valores son promedios \pm error estándar de $n=4$ unidades experimentales.

Tabla 24: Valores de F de comparando los ajustes del peso de hollejo respecto a los días desde el comienzo del enero. El análisis estadístico se realizó para comparar las fechas de poda según la evolución del peso de hollejo durante la madurez de la baya.

	2017-18				2018-19			
	PI	Br	2-3H	8H	PI	Br	2-3H	8H
PI		3,9 *	12,5 *	19,2 *		0,2 ns	2,0 ns	12,3 *
Br			2,2 ns	5,3 *			2,4 ns	13,9 *
2-3H				2,8 *				6,2 *
8H								

*: Modelos distintos (F muestral $>$ F tabla, para un p valor de 0.05)

ns: Modelos similares (F muestral $<$ F tabla, para un p -valor de 0.05)

Debido a que el peso de baya del mismo diámetro no presentó diferencias entre tratamientos ($p=0.2823$), se determinó el peso de los hollejos de 20 bayas del mismo diámetro de cada tratamiento y de cada temporada (Figura 32). Los hollejos de las bayas del tratamiento 8H fueron significativamente más pesados que el resto de los tratamientos. En la temporada 2017-18, el peso de hollejos fue mayor para todas las podas tardías, presentando un aumento del 20, 16 y 36% respecto a la poda invernal, mientras que durante 2018-19 sólo la poda con 8 hojas presentó un aumento del 16% del peso de hollejos respecto al resto.

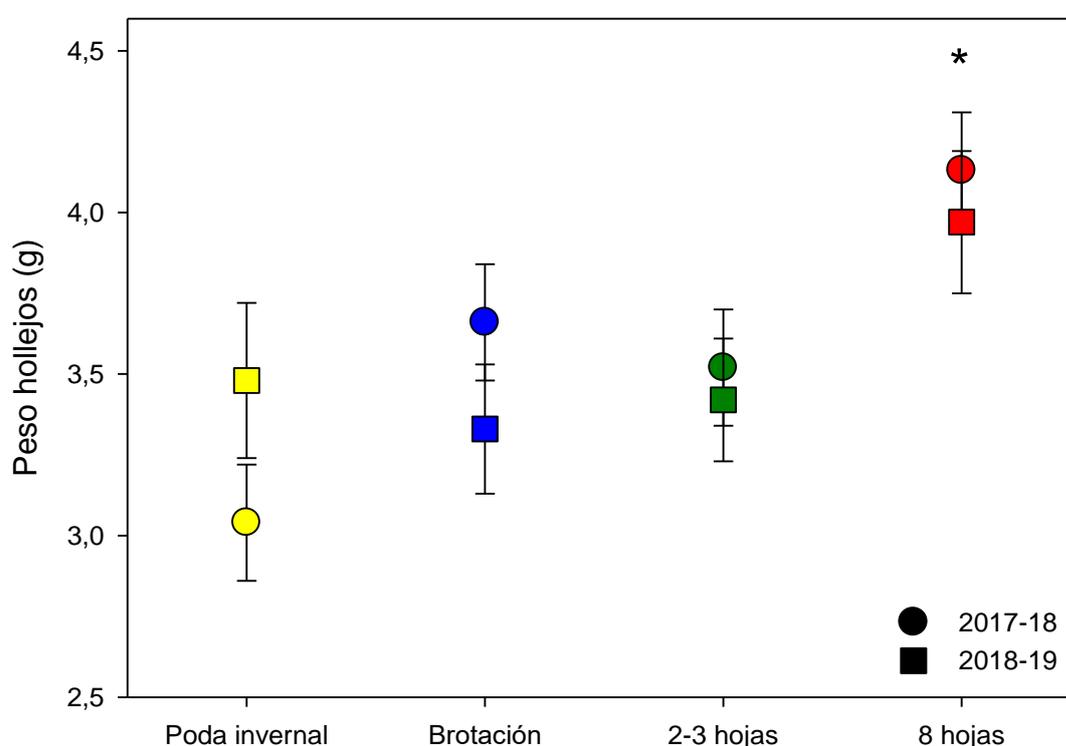


Figura 32. Peso de hollejos (g) de 20 bayas del diámetro modal de las temporadas 2017-18 (●) y 2018-19 (■) para las distintas fechas de poda. El * implica diferencia estadística por la prueba de Fisher $p<0.05$.

Se analizaron también los dos años por separados y se observó que en la temporada 2017-18, la diferencia en los pesos de hollejo se dio en todas las podas tardías (p -valor=0,0031), mientras que en 2018-19, la diferencia estadística no fue significativa (p -valor=0,1375).

Composición fenólica

Fenoles Totales

La concentración de fenoles totales disminuyó desde el inicio de toma de muestras hasta cosecha en todos los tratamientos y ambas temporadas (Figura 33). Durante la primera temporada, la tasa de disminución fue similar para todos los tratamientos, y la evolución de la concentración de fenoles de las plantas podadas en brotación fue similar a la de la poda invernal, sin diferencias en ninguna fecha (Figura 33A). Por otra parte, los tratamientos 2-3H y 8H se retrasaron en la disminución de concentración de fenoles respecto a Br y PI. A partir de principios de febrero, el tratamiento de 2-3 hojas se solapó con el invernal, mientras que el de 8 hojas lo hizo en cosecha. Durante la segunda temporada (Figura 33B), si bien la concentración fue disminuyendo a lo largo del tiempo, la diferencia entre concentración inicial y final fue menor, respecto a la primera temporada. Además, el tratamiento con 8 hojas presentó una mayor disminución entre la concentración inicial y final (71%), el de brotación presentó una menor variación (26%), mientras que los tratamientos invernal y 2-3 hojas presentaron una variación intermedia y similar entre ellos (52 y 58%, respectivamente).

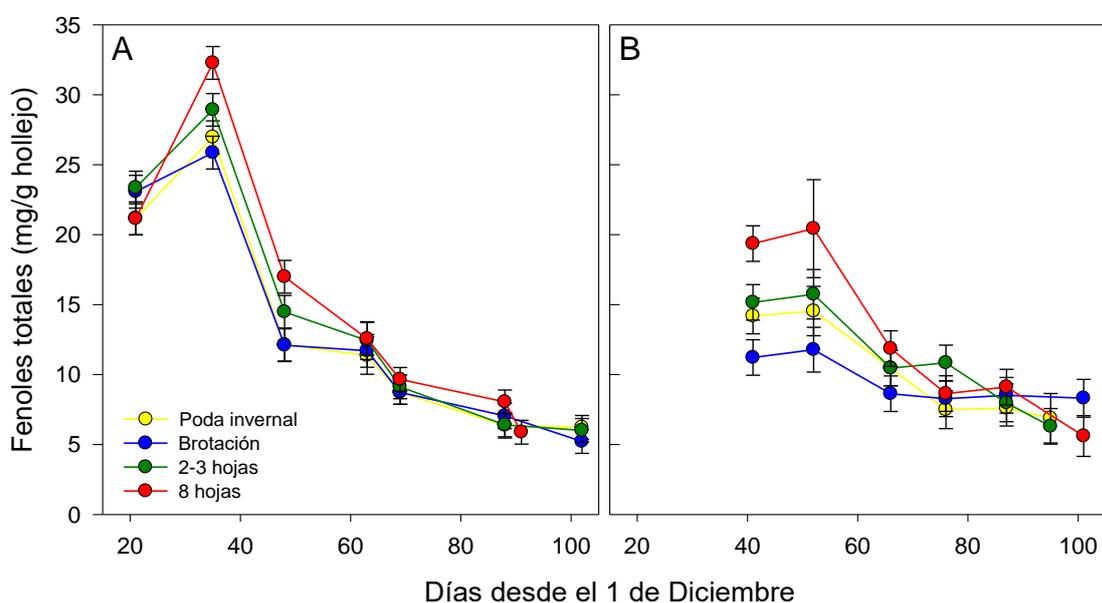


Figura 33. Evolución de la concentración de fenoles (mg/g hollejo) en 2017-18 (A) y 2018-19 (B) registradas para las distintas fechas de poda durante la madurez de la baya. Los valores son promedios \pm error estándar de 4 repeticiones por tratamiento, 20 bayas por unidad experimental.

Teniendo en cuenta que las plantas podadas tardíamente acumularon menor temperatura que las plantas podadas en invierno, se realizaron regresiones entre los fenoles totales y el tiempo térmico desde el envero (Figura 34). Para distinguir entre

las curvas, se ajustaron con una función decreciente de dos parámetros y se compararon utilizando una prueba de F (Tabla 25). El efecto de la fecha de poda sobre la disminución de los fenoles fue diferente según la temporada considerada. Las curvas de disminución de fenoles del tratamiento de 8 hojas fueron significativamente diferentes a las del resto de los tiempos de poda la primera temporada; mientras que, en la segunda temporada, las curvas fueron similares. No obstante, durante la temporada 2018-19 (Figura S5, Anexo III), los niveles de fenoles por baya a lo largo del tiempo no se explicaron por la temperatura acumulada ($p=0.5552$).

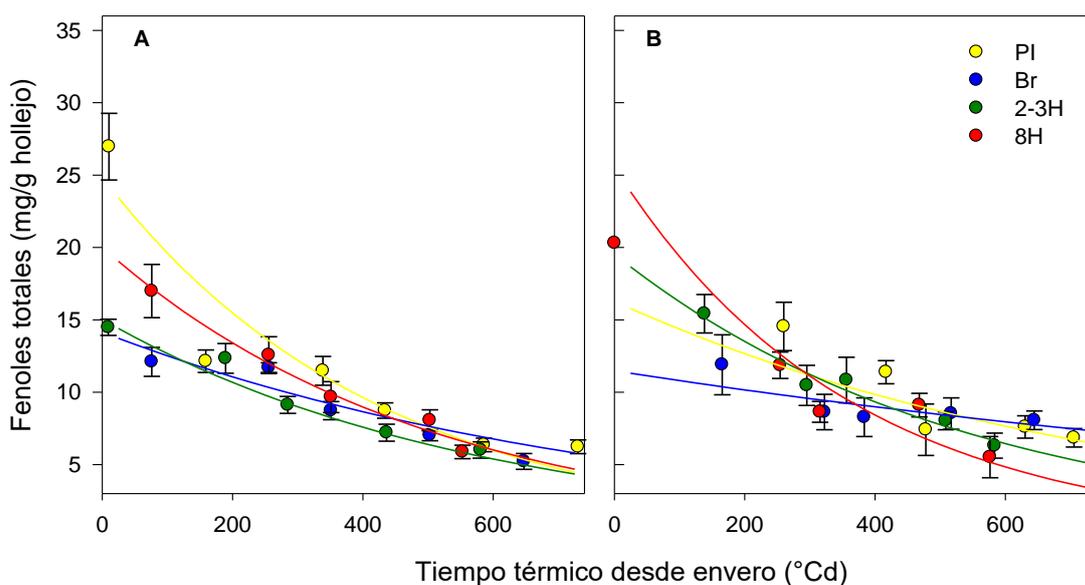


Figura 34. Evolución de la concentración de fenoles (mg/g hollejo) en 2017-18 (A) y 2018-19 (B) registradas para las distintas fechas de poda respecto al tiempo térmico ($^{\circ}\text{Cd}$) por cada tratamiento durante la madurez de la baya. Los valores son promedios \pm error estándar de 4 repeticiones por tratamiento. Las líneas suavizadas representan las ecuaciones ajustadas del modelo.

Tabla 25: Valores de F de comparando los ajustes de la concentración de los fenoles totales respecto al tiempo térmico desde el envero. El análisis estadístico se realizó para comparar las fechas de poda según la evolución de los fenoles de hollejo durante la madurez de la baya.

	2017-18				2018-19			
	PI	Br	2-3H	8H	PI	Br	2-3H	8H
PI		11,9 *	22,7 *	3,0 ns		1,6 ns	0,7 ns	2,8 ns
Br			1,4 ns	3,2 *			3,0 ns	5,4 *
2-3H				7,2 *				1,0 ns
8H								

*: Modelos distintos ($F_{\text{muestral}} > F_{\text{tabla}}$, para un p valor de 0.05)

ns: Modelos similares ($F_{\text{muestral}} < F_{\text{tabla}}$, para un p-valor de 0.05)

Taninos

La concentración de los taninos a lo largo del tiempo (Figura 35) disminuyó, siendo esta disminución mayor en la primera estación del experimento. Durante la temporada 2017-18 (Figura 35, A), la tasa de cambio y los valores iniciales y finales fueron similares entre tratamientos. Durante 2018-19, los valores iniciales de concentración de taninos fueron mayores mientras más tardía fue la poda. Debido a que la tasa de cambio fue mayor para los tratamientos de poda tardía, los valores finales fueron similares entre tratamientos. Esto implicó que el tratamiento invernal disminuyera en un 23% su concentración inicial, y el de brotación, el de 2-3 hojas y el de 8 hojas lo hicieron en un 40, 47 y 49%, respectivamente (Figura 35, B).

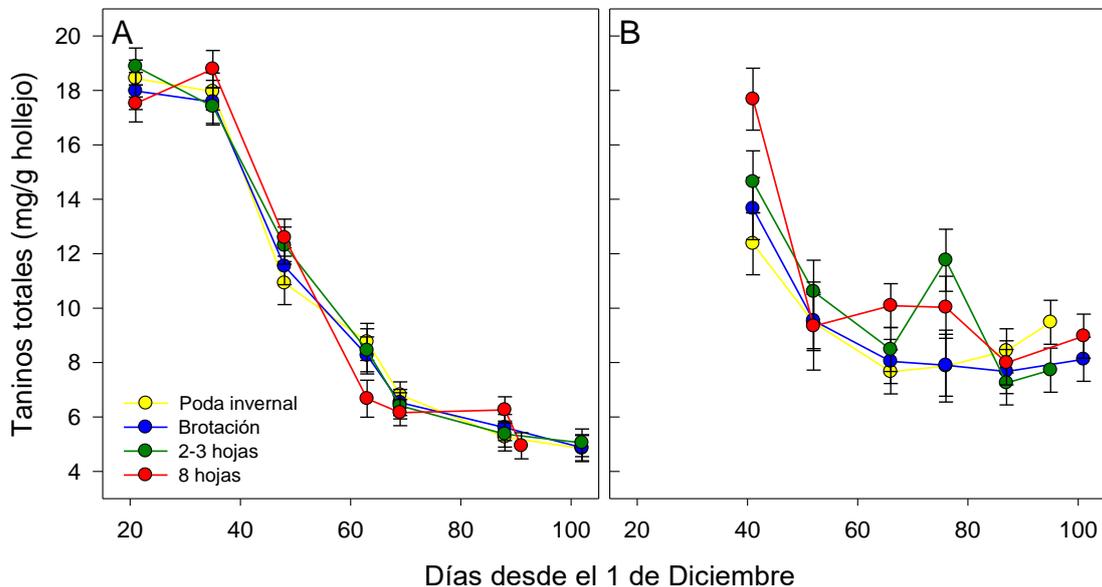


Figura 35. Evolución de la concentración de taninos (mg/g hollejo) en 2017-18 (A) y 2018-19 (B), registradas para las distintas fechas de poda durante la madurez de la baya. Los valores son promedios \pm error estándar de 4 repeticiones por tratamiento.

Se realizaron regresiones entre los taninos totales y el tiempo térmico desde el invierno (Figura 36). Para distinguir entre las curvas, se ajustaron con una función decreciente de dos parámetros y se compararon utilizando una prueba de F (Tabla 26). El efecto de la fecha de poda sobre la disminución de los taninos fue diferente según la temporada considerada. La tasa de disminución en la concentración de taninos fue diferente sólo en la primera temporada, para todas las podas tardías, respecto al testigo (Tabla 26).

Respecto a la cantidad de taninos por baya, se dio una situación similar a la de fenoles por baya. Durante 2017-18 (Figura S6 A, Anexo III), el tratamiento 8H presentó una menor tasa de disminución de taninos por baya. Mientras que durante la temporada

2018-19 (figura S6, B), la cantidad de taninos por baya a lo largo del tiempo no se explicó por la temperatura acumulada ($p=0,6735$) y los valores inicial y final fueron similares para todos los tratamientos. En cuanto a los valores de taninos obtenidos en cosecha, sólo las bayas de 8H presentaron mayor cantidad de taninos por baya respecto al testigo (Tabla 28).

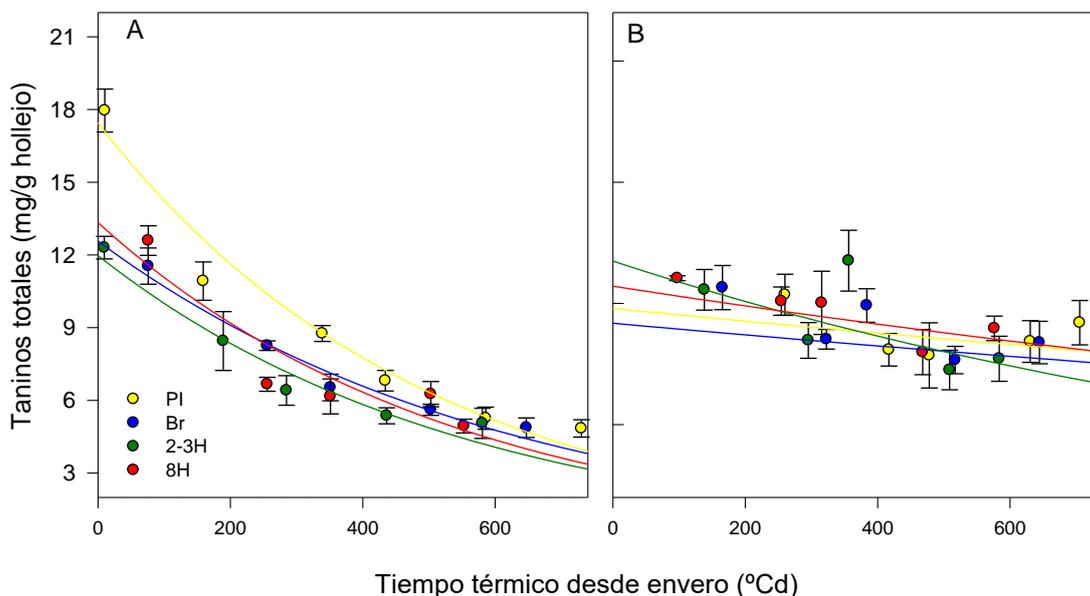


Figura 36. Evolución de la concentración de taninos (mg/g hollejo) en 2017-18 (A) y 2018-19 (B) registradas para las distintas fechas de poda respecto al tiempo térmico ($^{\circ}\text{Cd}$) por cada tratamiento durante la madurez de la baya. Los valores son promedios \pm error estándar de 4 repeticiones por tratamiento. Las líneas suavizadas representan las ecuaciones ajustadas del modelo.

Tabla 26: Valores de F de comparando los ajustes de la cantidad y la concentración de los taninos totales respecto al tiempo térmico desde el invierno. El análisis estadístico se realizó para comparar las fechas de poda según la evolución de los taninos de hollejo durante la madurez de la baya.

	2017-18				2018-19			
	PI	Br	2-3H	8H	PI	Br	2-3H	8H
PI		16,8 *	26,9 *	11,5 *		0,3 ns	0,6 ns	0,2 ns
Br			2,2 ns	0,4 ns			1,0 ns	1,3 ns
2-3H				1,3 ns				0,6 ns
8H								

*: Modelos distintos (F muestral $>$ F tabla, para un p valor de 0.05)
 ns: Modelos similares (F muestral $<$ F tabla, para un p -valor de 0.05)

Antocianinas

En la estación 2017-18 (figura 37, A), las plantas podadas en invierno, con 2-3 hojas y con 8 hojas llegaron a su máxima concentración hacia fines de febrero y lo mantuvieron en cosecha, mientras que las plantas podadas en brotación llegaron al

máximo hacia fines de febrero y en cosecha disminuyeron su valor en un 21% respecto a PI. Debido a que el peso del hollejo de Br fue mayor al de PI, las antocianinas por baya registradas en cosecha no presentaron diferencias entre este tratamiento y la poda invernal (Tabla 28). Por otra parte, a pesar de que las concentraciones de antocianinas por gramo de hollejo no fueron estadísticamente diferentes entre PI, 2-3H y 8H, sí lo fueron los pesos de hollejos. Por lo tanto, la cantidad de antocianinas por baya a cosecha fue mayor para las últimas dos podas tardías (Tabla 28).

Durante 2018-19 (Figura 37, B), se observó un retraso en la concentración de antocianinas en las plantas podadas tardíamente respecto a las podadas en invierno. Cabe destacar que la primera fecha de muestreo se realizó 10 días después que el tratamiento testigo había comenzado el envero. No obstante, sólo el 5 de febrero la concentración de antocianinas de la poda invernal fue mayor al resto en un 45, 50 y 68% respecto a las fechas realizadas en brotación, con 2-3 hojas y con 8 hojas, respectivamente. A partir del 15 de febrero todos los tratamientos llegaron a su máxima concentración y se mantuvieron sin diferencias entre ellos hasta cosecha.

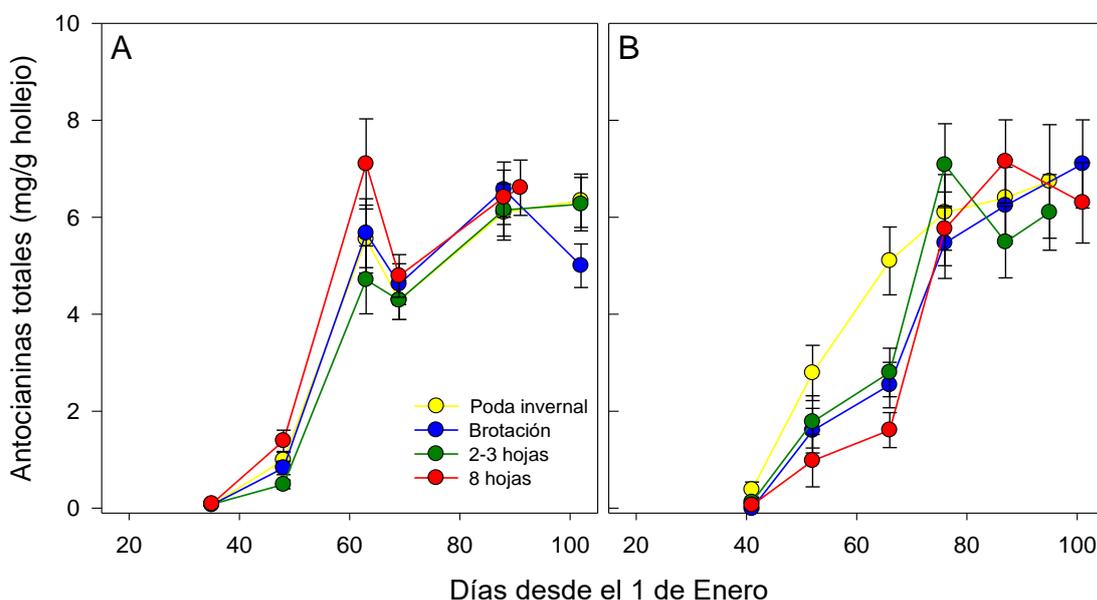


Figura 37. Evolución de la concentración de antocianinas (mg/g hollejo) en 2017-18 (A) y 2018-19 (B) registradas para las distintas fechas de poda durante la madurez de la baya. Los valores son promedios \pm error estándar de 4 repeticiones por tratamiento.

Por otro lado, durante la primera temporada, al analizar la acumulación de antocianinas en función del tiempo térmico desde el envero, las plantas podadas en brotación, con 2-3H y con 8H alcanzaron el valor máximo de concentración de antocianinas con 164, 165 y 125 °Cd menos que el tratamiento testigo, respectivamente (Figura 38, A). Este

valor máximo fue un 7% menor (alrededor de 0,4 mg/g de hollejo menos) para las plantas podadas en brotación y 0,3 mg/g de hollejo más para las plantas podadas con 8 hojas, respecto al testigo. Los tratamientos 2-3H y el PI mostraron una concentración máxima similar entre ellos. Por otra parte, durante 2018-19 (Figura 38, B), sólo los tratamientos 2-3H y 8H alcanzaron su concentración máxima con 155 y 99 °Cd menos que el testigo, mientras que el tratamiento Br alcanzó la máxima concentración con similar GD acumulados que PI. La concentración máxima alcanzada por las plantas de 2-3H fue de aproximadamente 0,7 mg menos por g de hollejo, respecto a PI; mientras que los tratamientos Br y 8H alcanzaron 0,6 y 0,3 mg/g de hollejo más que las plantas testigo.

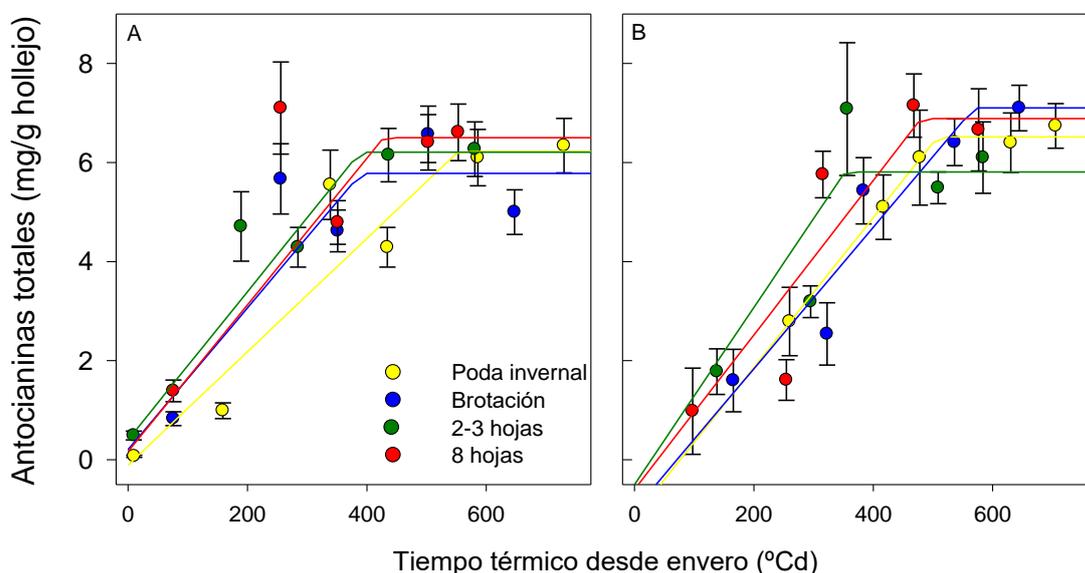


Figura 38. Evolución de la concentración de antocianinas (mg/g hollejo) en 2017-18 (A) y 2018-19 (B) registrada para las distintas fechas de poda respecto a los GD acumulados por cada tratamiento durante la madurez de la baya. Los valores son promedios \pm error estándar de 4 repeticiones por tratamiento. Las líneas suavizadas representan las ecuaciones ajustadas del modelo.

Tabla 27: Valores de F de comparando los ajustes de la concentración de las antocianinas totales respecto al tiempo térmico desde el invierno. El análisis estadístico se realizó para comparar las fechas de poda según la evolución de las antocianinas de hollejo durante la madurez de la baya.

	2017-18				2018-19			
	PI	Br	2-3H	8H	PI	Br	2-3H	8H
PI		1,3 ns	3,0 *	4,2 *		0,1 ns	7,7 *	0,2 ns
Br			0,3 ns	1,1 ns			1,0 ns	1,6 ns
2-3H				0,4 ns				1,1 ns
8H								

*: Modelos distintos ($F_{muestral} > F_{tabla}$, para un p valor de 0.05)

ns: Modelos similares ($F_{muestral} < F_{tabla}$, para un p-valor de 0.05)

Se realizó una regresión entre la concentración de antocianinas y de cantidad de antocianinas por baya respecto a los sólidos solubles (Figura S7, Anexo III). Durante la fase lineal de acumulación (i.e. a partir de aproximadamente 10°Brix), se ajustó una regresión común a todos los tratamientos y se analizaron los residuos de cada tratamiento respecto al ajuste común y se observaron diferencias entre los residuos (Figura 39). El tratamiento 8H presentó residuos siempre mayores al ajuste común, indicando valores de antocianinas mayores al resto, en especial cuando se expresa en cantidad por baya. Estos resultados indican que a un mismo valor de °Brix, el tratamiento de 8H presentó mayor cantidad de antocianinas por baya respecto al resto.

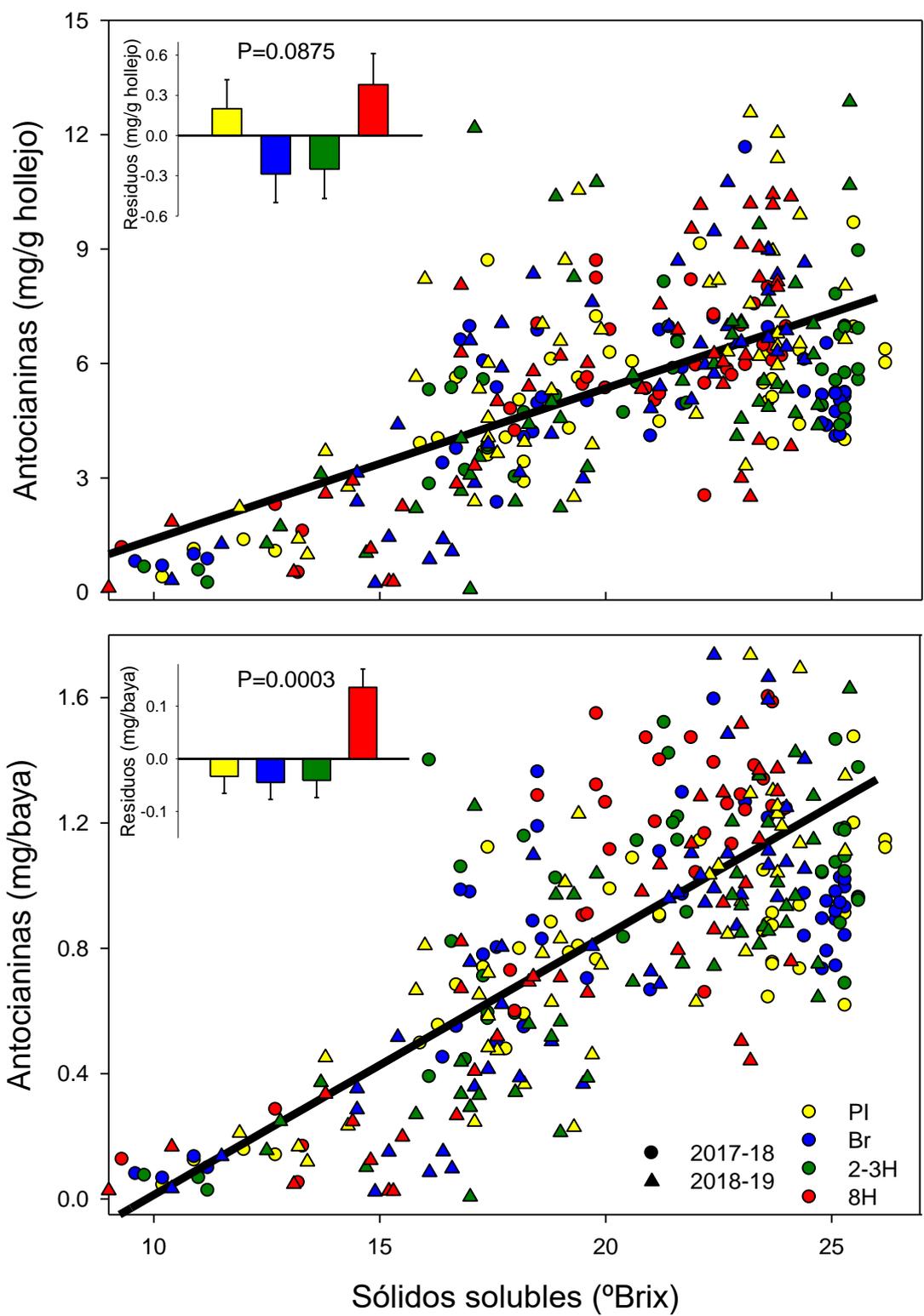


Figura 39. Relación de la concentración de antocianinas (mg/g hollejo) y antocianinas por baya (mg/baya) respecto a los sólidos solubles en su fase lineal. Los gráficos de barra representan los residuos de las regresiones (media + error estándar), comparando las 4 fechas de poda durante 2017-18 (●) y 2018-19 (▲). Los valores son promedios ± error estándar de 4 repeticiones por tratamiento. Las líneas suavizadas representan las ecuaciones ajustadas del modelo.

Por último, se determinó la cantidad de fenoles totales, taninos y antocianinas sobre los hollejos de las bayas de la clase modal (Tabla 28). Como puede verse, la fecha de poda tuvo efecto sólo en la cantidad de antocianinas de las bayas de la primera temporada. Fenoles totales y taninos por baya mantuvieron un valor similar entre tratamientos, ambas temporadas.

Tabla 28. Fenoles totales, taninos totales y antocianinas totales en miligramos por baya a cosecha para las distintas fechas de poda. Las cosechas corresponden a los años 2018 y 2019.

Fecha de poda	Fenoles totales (mg/baya)	Taninos totales (mg/baya)	Antocianinas totales (mg/baya)
2018			
Invernal	1,0 ± 0,1	0,7 ± 0,1 c	0,9 ± 0,1 c
Brotación	1,0 ± 0,1	0,9 ± 0,1 b	0,9 ± 0,1 c
2-3 hojas	1,1 ± 0,1	0,9 ± 0,1 b	1,1 ± 0,1 b
8 hojas	1,2 ± 0,1	1,0 ± 0,1 a	1,4 ± 0,1 a
p-valor	0,0535	0,0008	<0.0001
2019			
Invernal	1,4 ± 0,1	1,4 ± 0,2	1,4 ± 0,1
Brotación	1,4 ± 0,1	1,4 ± 0,2	1,3 ± 0,1
2-3 hojas	1,1 ± 0,1	1,1 ± 0,2	1,1 ± 0,1
8 hojas	1,1 ± 0,1	1,0 ± 0,2	1,4 ± 0,1
p-valor	0,1530	0,2259	0,3063

Dentro de cada parámetro y cada temporada, letras diferentes implican una diferencia estadística entre tratamientos (p -valor <0.05 para la prueba de Fischer).

Composición del vino

Parámetros globales del vino

El análisis químico de los vinos se presenta en la Tabla 29 para cada año del ensayo. Puede observarse que el efecto de la fecha de poda fue similar ambos años en todos los parámetros analizados, manteniendo la diferencia entre los tratamientos. Mientras que el porcentaje de alcohol fue el mismo para los vinos de los tratamientos invernal, brotación y 2-3 hojas, el de 8 hojas presentó una disminución en promedio del 9% respecto al testigo. Si bien la poda tardía no afectó la acidez total de los vinos, el pH fue mayor para todas las podas tardías. La magnitud de esta diferencia fue similar en cada temporada, aunque mientras más tardía fue la poda, mayor fue el pH. En promedio, la diferencia fue de 0.08, 0.12 y 0.3 para las plantas podadas en brotación, con 2-3 hojas y con 8 hojas, respectivamente. Con respecto a la composición de distintos ácidos de los vinos, y analizando los que más aportan a la acidez total (ácidos láctico y tartárico), se puede observar que mientras las plantas podadas en invierno, Br y 2-3H no presentaron diferencias entre sí, las podadas con 8 hojas presentaron una

mayor acidez los dos años del ensayo. Por un lado, presentaron un 50% menos de ácido tartárico, pero por otro lado un 46% más de ácido láctico. Respecto al ácido málico y al cítrico, minoritarios respecto a su aporte en la acidez total, también se percibe un comportamiento contrastante según la fecha de poda. Las plantas podadas con 8 hojas presentaron vinos con 3 veces más ácido málico que las plantas podadas en invierno, aunque sin diferencias significativas con Br y 2-3H. Por otra parte, el ácido cítrico presentó una disminución del 75% en los vinos provenientes de plantas podadas con 8 hojas. La fecha de poda no tuvo efecto sobre la acidez volátil de los vinos ($p \geq 0.05$), aunque la última poda tardía (8H) presentó un 20% más que el testigo en 2018 y un 28% más en 2019. Por último, el glicerol fue mayor para todos los vinos de plantas podadas tardíamente, tanto en 2018 como en 2019. Los vinos de plantas podadas en Br y 2-3H presentaron, en promedio un 7.5 y 6% más de glicerol, respectivamente; mientras que las plantas podadas con 8H produjeron vinos con un 13% más de glicerol los dos años. Tanto los vinos del 2018 como del 2019 presentaron similar cantidad de azúcares residuales, sugiriendo fermentaciones completas.

Tabla 29. Composición química de los vinos durante los años 2018 y 2019, provenientes de las plantas podadas en invierno, en brotación, con 2-3 hojas separadas y con 8 hojas separadas. Los datos se presentan para cada temporada por separado. Dentro de cada temporada, la diferencia significativa entre los tratamientos se indica con letras diferentes ($P < 0.05$ por la prueba de Fisher).

Fecha de poda	Alcohol (%)	Acidez total (g/L)	Ácido málico (g/L)	Ácido tartárico (g/L)	Ácido cítrico (g/L)	Ácido láctico (g/L)	pH	Acidez volátil (g/L)	Glicerol (g/L)	Azúcar residual (g/L)
2018										
Invernal	14,5 ± 0,3 a	4,8 ± 0,1	0,2 ± 0,1 b	1,5 ± 0,1 a	0,4 ± 0,1 a	1,3 ± 0,1 b	3,5 ± 0,0 c	0,5 ± 0,0	10,3 ± 0,2 c	1,3 ± 0,2
Brotación	14,9 ± 0,3 a	4,6 ± 0,1	0,3 ± 0,1 ab	1,3 ± 0,1 a	0,2 ± 0,1 ab	1,6 ± 0,1 b	3,6 ± 0,0 b	0,6 ± 0,0	11,1 ± 0,2 b	1,0 ± 0,2
2-3 hojas	15,2 ± 0,3 a	4,5 ± 0,1	0,3 ± 0,1 ab	1,4 ± 0,1 a	0,3 ± 0,1 a	1,4 ± 0,1 b	3,6 ± 0,0 b	0,5 ± 0,0	11,1 ± 0,2 b	1,1 ± 0,2
8 hojas	13,6 ± 0,3 b	4,7 ± 0,1	0,5 ± 0,0 a	0,8 ± 0,1 b	0,1 ± 0,1 b	2,0 ± 0,1 a	3,8 ± 0,0 a	0,7 ± 0,0	11,7 ± 0,2 a	1,0 ± 0,2
p-valor	0,0110	0,1168	0,0062	0,0025	0,0347	0,0004	0,0002	0,0538	0,0023	0,5493
2019										
Invernal	14,1 ± 0,2 a	4,7 ± 0,1	0,2 ± 0,1 b	1,5 ± 0,1 a	0,4 ± 0,1 a	1,3 ± 0,1 b	3,4 ± 0,0 c	0,4 ± 0,0	10,1 ± 0,2 c	1,2 ± 0,2
Brotación	14,5 ± 0,2 a	4,5 ± 0,1	0,3 ± 0,1 ab	1,3 ± 0,1 a	0,2 ± 0,1 ab	1,5 ± 0,1 b	3,5 ± 0,0 b	0,4 ± 0,0	10,9 ± 0,2 b	1,0 ± 0,2
2-3 hojas	14,5 ± 0,2 a	4,6 ± 0,1	0,3 ± 0,1 ab	1,3 ± 0,1 a	0,3 ± 0,1 a	1,4 ± 0,1 b	3,5 ± 0,0 b	0,4 ± 0,0	10,7 ± 0,2 b	1,1 ± 0,2
8 hojas	13,3 ± 0,2 b	4,4 ± 0,1	0,5 ± 0,0 a	0,8 ± 0,1 b	0,1 ± 0,1 b	1,9 ± 0,1 a	3,7 ± 0,0 a	0,5 ± 0,0	11,5 ± 0,2 a	0,9 ± 0,2
p-valor	0,0071	0,2798	0,0055	0,0026	0,0305	0,0004	0,0015	0,0538	0,0073	0,5216

Dentro de cada parámetro y cada temporada, letras diferentes implican una diferencia estadística entre tratamientos (p -valor < 0.05 para la prueba de Fischer).

Composición fenólica

De manera general, se observó que los tratamientos de poda tardía mantuvieron o aumentaron la concentración de los parámetros fenólicos globales del vino, antocianinas, taninos y fenoles totales (Figura 40). El contenido de antocianinas totales en los vinos de 2018 y 2019, varió de 273 a 546 mg/L. Los vinos de 2018 provenientes de plantas podadas con 2-3 hojas presentaron un 17% más de antocianinas, mientras que los del tratamiento de 8 hojas presentaron un 29% más de antocianinas, respecto al testigo. En 2019, los vinos provenientes de plantas podadas con 8 hojas presentaron un 35% más de antocianinas en el vino, mientras que el resto de los tratamientos no presentó diferencias respecto al control. Los taninos y los fenoles totales tuvieron un comportamiento similar durante 2018 y 2019. Es decir, mientras que en 2018 los vinos provenientes de las plantas podadas con 8 hojas presentaron un aumento en la cantidad de taninos y de fenoles totales, en 2019 no hubo diferencia de estos parámetros entre las distintas fechas de poda.

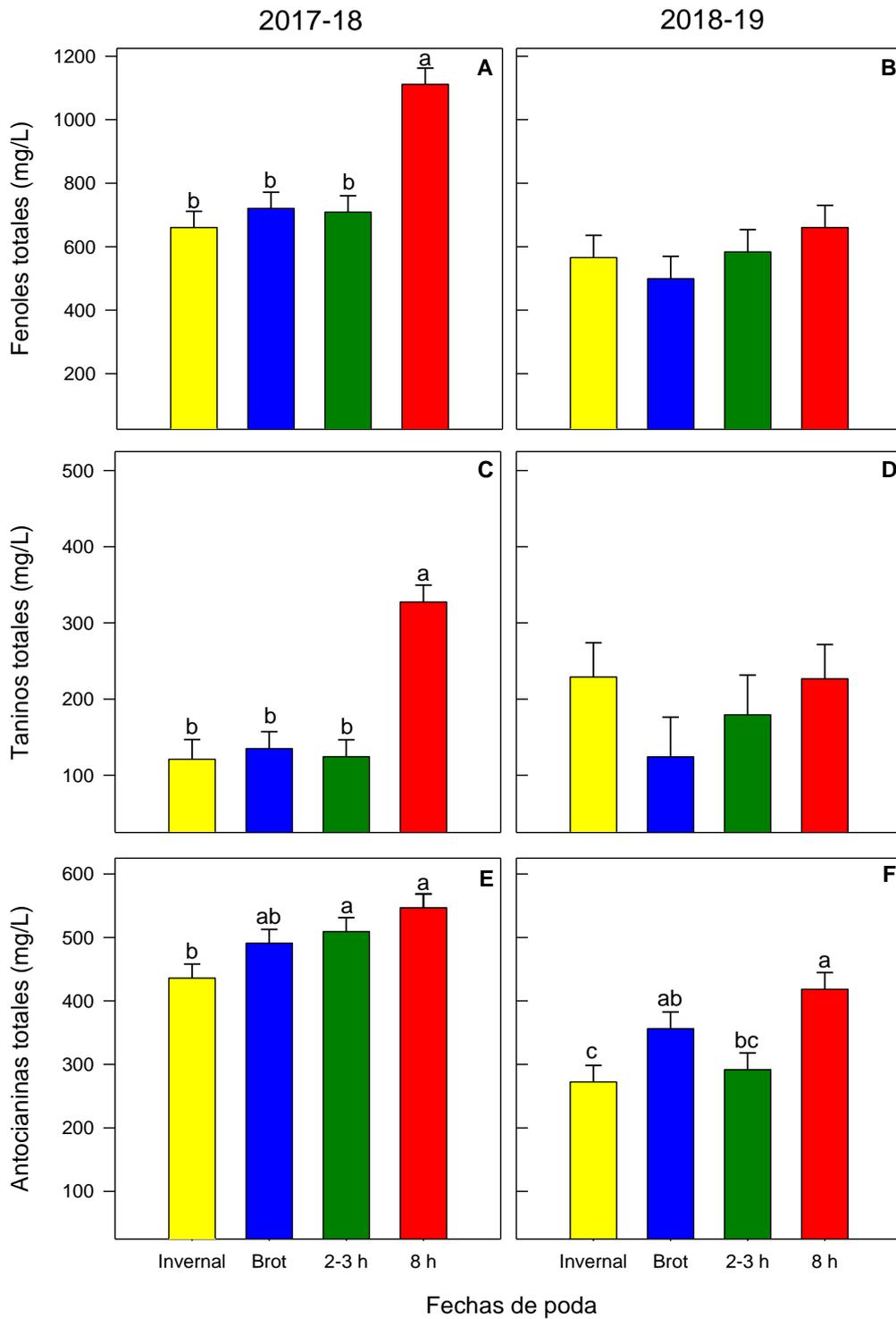


Figura 40. Parámetros fenólicos globales de los vinos para las temporadas 2017-18 (paneles izquierdos) y 2018-19 (paneles derechos) registrados para las distintas fechas de poda. Los valores son promedios \pm error estándar de $n=4$ vinos por tratamiento.

La poda tardía no tuvo efecto sobre los pigmentos poliméricos cortos (SPP, por sus siglas en inglés). Sin embargo, los vinos de 8H de 2018 presentaron una mayor cantidad de pigmentos poliméricos largos (LPP; Tabla 30).

Tabla 30. Pigmentos poliméricos largos (LPP), y cortos (SPP, por sus siglas en inglés) de los vinos 2018 provenientes de plantas podadas en invierno, en brotación, con 2-3 hojas separadas y con 8 hojas separadas. La diferencia significativa entre los tratamientos se indica con letras diferentes ($P < 0.05$ por la prueba de Fisher).

Fecha de poda	Pigmentos poliméricos largos (LPP)	Pigmentos poliméricos cortos (SPP)
2018		
Poda invernal	0,5 ± 0,09 b	1,5 ± 0,2
Brotación	0,6 ± 0,06 b	1,5 ± 0,1
2-3 hojas	0,6 ± 0,13 ab	1,4 ± 0,1
8 hojas	0,8 ± 0,05 a	1,3 ± 0,1
p-valor	0,0235	0,3324
2019		
Poda invernal	0,7 ± 0,16	1,4 ± 0,1
Brotación	0,5 ± 0,08	1,3 ± 0,2
2-3 hojas	0,5 ± 0,12	1,8 ± 0,3
8 hojas	0,4 ± 0,19	1,5 ± 0,1
p-valor	0,6887	0,2396

Dentro de cada parámetro y cada temporada, letras diferentes implican una diferencia estadística entre tratamientos (p -valor < 0.05 para la prueba de Fischer).

Color

En cuanto a los parámetros del color determinados en los vinos del 2018 (Tabla 31), la fecha de poda no tuvo efectos en la saturación (C^*_{ab}) ni en la claridad (L^*). Sin embargo, la tonalidad (h_{ab}), atributo cualitativo del color, fue menor en los vinos provenientes de las plantas podadas con 8 hojas.

En la Figura 41, el espacio de color CIELAB en el plano a^*b^* , ilustra el color de los vinos del 2018. Puede observarse que los vinos provenientes de las fechas de poda invernal, brotación y 2-3 hojas presentan similares valores para a^* y menor valor de b^* que los vinos de plantas podadas con 8 hojas.

Tabla 31. Parámetros de color CIELAB de los vinos 2018 provenientes de plantas podadas en invierno, en brotación, con 2-3 hojas separadas y con 8 hojas separadas. La diferencia significativa entre los tratamientos se indica con letras diferentes ($P < 0,05$ por la prueba de Fisher).

Fecha de poda	Tono (h_{ab})	Claridad (L^*)	Croma (C^*_{ab})
Invernal	$-3,3 \pm 0,3$ b	$69,5 \pm 2,2$	$35,7 \pm 2,0$
Brotación	$-2,9 \pm 0,3$ b	$68,9 \pm 1,5$	$34,8 \pm 2,0$
2-3 hojas	$-2,3 \pm 0,9$ b	$70,6 \pm 3,0$	$33,6 \pm 3,7$
8 hojas	$-0,2 \pm 0,5$ a	$69,0 \pm 1,0$	$30,1 \pm 1,1$
p-valor	0,0043	0,9539	0,0955

Dentro de cada parámetro y cada temporada, letras diferentes implican una diferencia estadística entre tratamientos (p -valor < 0.05 para la prueba de Fischer).

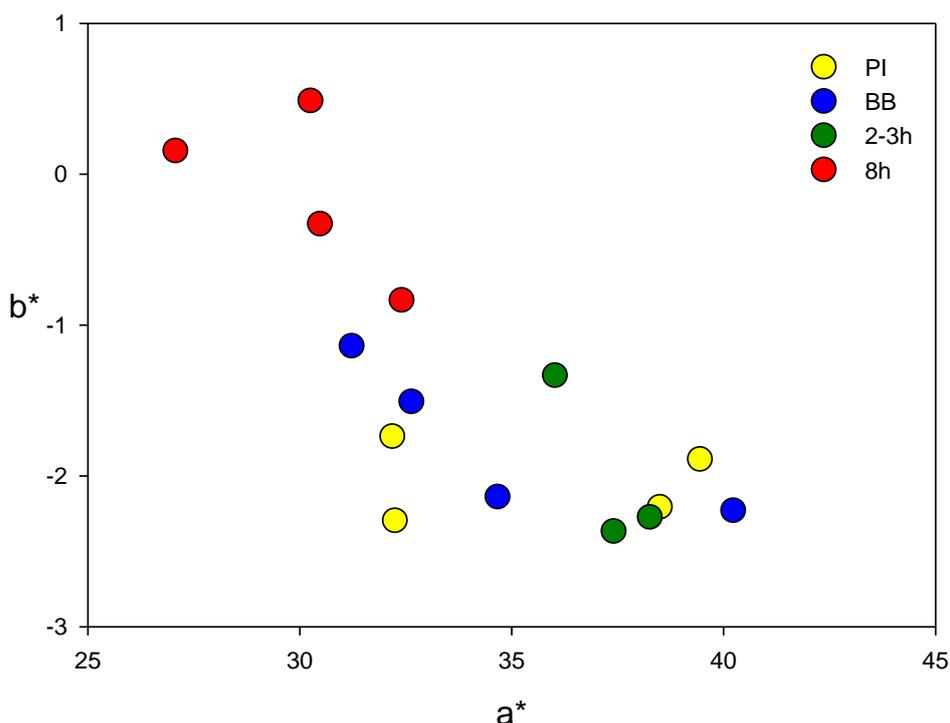


Figura 41. Coordenadas de los vinos obtenidos a partir de las fechas de poda invernal, brotación, 2-3H y 8H en el espacio CIELAB (plano a^*b^*).

Complementariamente, se calculó la diferencia de color (ΔE^*_{ab}) para los vinos de los distintos tratamientos, con el fin de determinar si los vinos provenientes de las plantas podadas tardíamente presentaron diferencias perceptibles visualmente (Tabla 32).

Tabla 32. Diferencia de color entre vinos de los tratamientos invernal, Br, 2-3H y 8H

	PI	Br	2-3H	8H
PI	-	1,2	2,4	5,9
Br	-	-	2,1	4,9
2-3H	-	-	-	4,1
8H	-	-	-	-

Teniendo en cuenta que el ojo humano con visión normal puede percibir diferencias de color con un $\Delta E^*_{ab} > 3$ (Martínez et al., 2001; Pérez Magariño et al., 2003), las plantas podadas con 8 hojas produjeron vinos visualmente diferentes a los de los tratamientos invernal, brotación y 2-3H.

Perfil de antocianinas individuales

En los vinos de la cosecha del 2019 se realizó la determinación del perfil de antocianinas por HPLC-DAD, a fines de conocer su composición de derivados glucosilados, acetilados, cumarilados, y piranoantocianinas (Figura 42). Al analizar la concentración total de compuestos, se observó que los vinos de 8H presentaron un 40% más de antocianinas que PI, mientras que los vinos de Br presentaron un valor intermedio a estos dos. Estos valores coinciden con los niveles determinados por espectrofotometría (Figura 40).

La diferencia entre tratamientos en el contenido de antocianinas totales se debió a los niveles de antocianinas no acetiladas, acetiladas y cumariladas cuantificados en los distintos tratamientos (Figura 42 B, C y D).

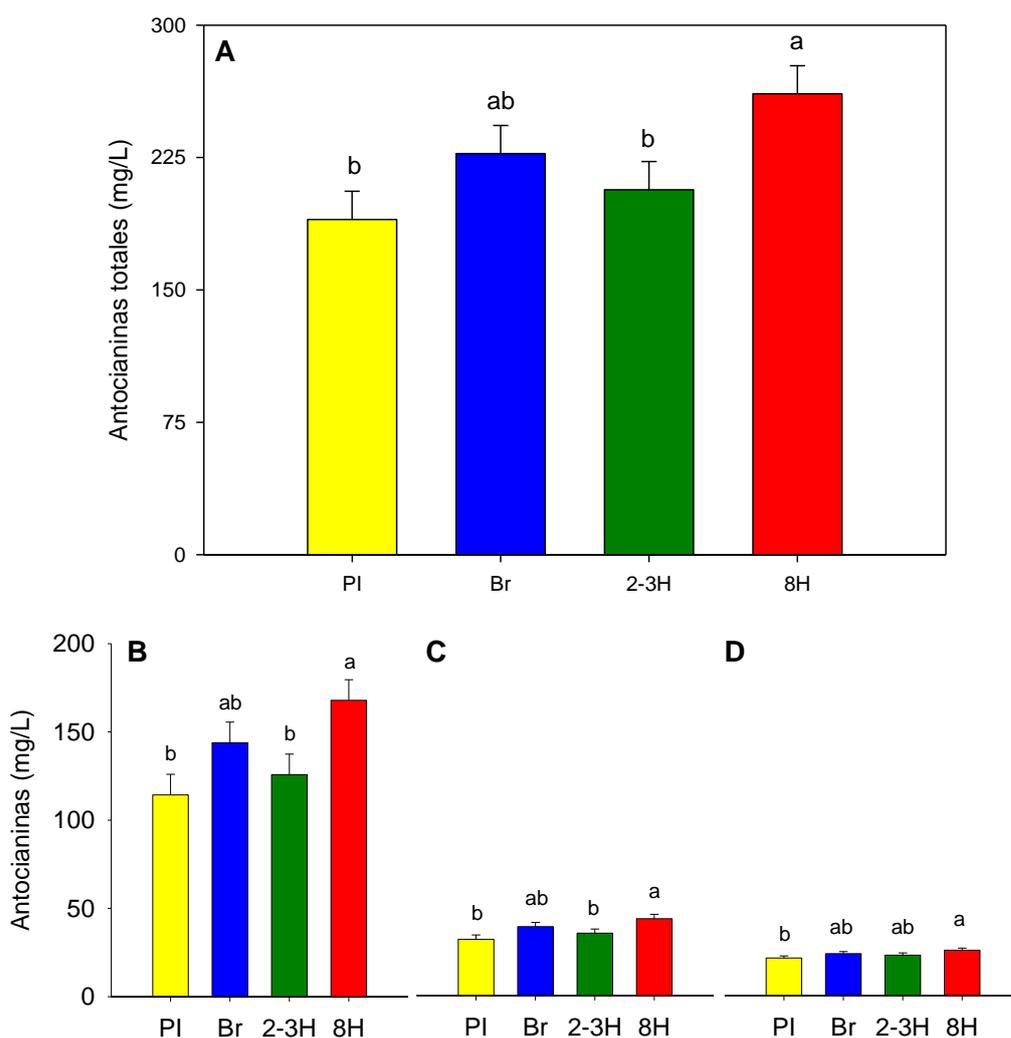


Figura 42. Cuantificación de antocianinas totales (A) y caracterización del perfil antociánico de vinos Malbec provenientes de plantas podadas en invierno (PI), brotación (Br), 2-3 hojas (2-3H) y 8 hojas visibles (8H). En la figura se muestra la cuantificación de antocianinas no acetiladas (B), acetiladas (C) y cumariladas (D).

Los vinos provenientes de plantas podadas con 8 hojas presentaron mayor cantidad de antocianinas no acetiladas y acetiladas (Figura 42). La mayor cantidad de antocianinas glucosiladas se debió principalmente a una mayor concentración de malvidina-3-glucósido. Respecto a derivados acetiladas en vinos 8H, los niveles superiores de malvidina-3-acetil-glucósido y peonidina-3-acetil-glucósido, determinaron las diferencias observadas en esta familia de compuestos antociánicos. Finalmente, los vinos de la última poda tardía (8H) también presentaron mayor cantidad de Vitisina A.

Tabla 33. Cuantificación de antocianinas individuales de vinos cv. Malbec provenientes de plantas podadas en invierno, en brotación, con 2-3 hojas y con 8 hojas (n=4). La diferencia significativa entre los tratamientos se indica con letras diferentes (P <0.05 por la prueba de Fisher).

Grupo	Compuesto	Fechas de poda								p-valor
		Poda invernal		Brotación		2-3 hojas		8 hojas		
No-Aciladas	Delfinidina-3-glucósido	3,2 ± 0,4		2,5 ± 0,4		3,2 ± 0,4		3,3 ± 0,4		0,425
No-Aciladas	Cianidina-3-glucósido	1,8 ± 0,1		1,8 ± 0,1		1,9 ± 0,1		2,1 ± 0,1		0,428
No-Aciladas	Petunidina-3-glucósido	7,7 ± 0,9		6,4 ± 0,9		7,7 ± 0,9		8,4 ± 0,9		0,447
No-Aciladas	Peonidina-3-glucósido	4,1 ± 0,7		3,8 ± 0,7		4,0 ± 0,7		3,9 ± 0,7		0,985
No-Aciladas	Malvidina-3-glucósido	97,4 ± 10,0 c		129,4 ± 10,0 ab		109,0 ± 10,0 bc		150,2 ± 10,0 a		0,019
	<i>No aciladas totales</i>	114,3 ± 11,7 b		143,8 ± 11,7 ab		125,7 ± 11,7 b		167,9 ± 11,7 a		0,038
	Vitisina A	12,53 ± 0,1 b		12,04 ± 1,1 b		13,07 ± 1,1 b		14,38 ± 0,57 a		0,045
	Vitisina B	2,2 ± 0,1		1,9 ± 0,1		2,1 ± 0,1		2,3 ± 0,1		0,247
Acetiladas	Delfinidina-3-acetil-glucósido	2,5 ± 0,2		2,3 ± 0,2		2,4 ± 0,2		2,9 ± 0,2		0,299
Acetiladas	Cianidina-3-acetil-glucósido	2,7 ± 0,2		2,6 ± 0,2		2,8 ± 0,2		3,0 ± 0,2		0,334
Acetiladas	Petunidina-3-acetil-glucósido	4,7 ± 0,5		5,0 ± 0,5		4,8 ± 0,5		6,3 ± 0,5		0,076
Acetiladas	Peonidina-3-acetil-glucósido	4,5 ± 0,3 b		6,0 ± 0,3 a		5,0 ± 0,3 ab		6,0 ± 0,3 a		0,028
Acetiladas	Malvidina-3-acetil-glucósido	17,4 ± 1,6 c		23,1 ± 1,6 ab		20,2 ± 1,6 bc		25,3 ± 1,6 a		0,027
	<i>Acetiladas totales</i>	31,8 ± 2,4 b		39,0 ± 2,4 ab		35,3 ± 2,4 b		43,5 ± 2,4 a		0,033
Cumariladas	Delfinidina-3-cumaril-glucósido	2,2 ± 0,2		2,6 ± 0,2		2,7 ± 0,2		2,9 ± 0,2		0,127
Cumariladas	Petunidina-3-cumaril-glucósido	2,9 ± 0,2		3,0 ± 0,2		3,1 ± 0,2		3,5 ± 0,2		0,198
Cumariladas	Peonidina-3-cumaril-glucósido	2,6 ± 0,2		2,6 ± 0,2		2,7 ± 0,2		3,0 ± 0,2		0,229
Cumariladas	Malvidina-3-cumaril-glucósido cis	2,1 ± 0,1		2,1 ± 0,1		2,1 ± 0,1		2,0 ± 0,1		0,725
Cumariladas	Malvidina-3-cumaril-glucósido trans	9,1 ± 0,7		10,8 ± 0,7		9,8 ± 0,7		11,4 ± 0,7		0,139
	<i>Cumariladas totales</i>	18,8 ± 1,2		21,0 ± 1,2		20,3 ± 1,2		22,7 ± 1,2		0,189
	<i>Antocianinas totales</i>	189,9 ± 16,0 b		227,2 ± 16,0 ab		206,8 ± 16,0 b		± 16,0 a		0,040
	Σ Glucosidades/ Σ Acetiladas	3,6 ± 0,1		3,7 ± 0,1		3,6 ± 0,1		3,9 ± 0,1		0,221
	Σ Glicosidades/ Σ Cumariladas	6,1 ± 0,3 b		6,8 ± 0,3 ab		6,2 ± 0,3 b		7,4 ± 0,3 a		0,023
	Σ Cumariladas/ Σ Acetiladas	0,6 ± 0,1 a		0,5 ± 0,1 bc		0,6 ± 0,1 ab		0,5 ± 0,1 c		0,023
	Σ Acetiladas/ Σ Cumariladas	1,7 ± 0,1 c		1,9 ± 0,1 ab		1,7 ± 0,1 bc		1,9 ± 0,1 a		0,033

Dentro de cada parámetro y cada temporada, letras diferentes implican una diferencia estadística entre tratamientos (p-valor <0.05 para la prueba de Fischer).

Análisis sensorial

Los resultados del análisis sensorial descriptivo de los vinos del 2019 se muestran en la Tabla 34. Con el objetivo de obtener una visualización simplificada de los datos y observar el efecto de las fechas de poda sobre los vinos, se aplicó un análisis de componentes principales (ACP, Figura 43). Los primeros dos componentes (CP1 y CP2) permitieron explicar el 82.3% de la variabilidad de los datos y revelaron la diferenciación parcial de los vinos según la fecha de poda. La dimensión 1 (48.8%) fue descrita principalmente por la intensidad de color, y por los aromas florales, frutales y terrosos; mientras que la dimensión 2 (33.5%) se caracterizó por las características de vegetal, especiado, acidez e intensidad aromática.

Los vinos de PI se separaron claramente de los demás vinos estudiados, caracterizados por notas vegetales y marcada acidez. En este sentido fueron diferentes a los vinos de plantas podadas en brotación, que presentaron mayor intensidad aromática, en relación a PI. Los vinos de 2-3H presentaron notas florales e intensidad de color, mientras que los vinos 8H fueron mayormente amargos.

Tabla 34. Atributos sensoriales de vinos Malbec provenientes de plantas podadas en invierno, en brotación, con 2-3 hojas y 8 hojas visibles. Los atributos fueron descritos por un panel entrenado (n=13).

Fecha de poda	Intensidad de color	Matiz violeta	Matiz rojo	Intensidad aromática	Frutal	Vegetal	Especiado	Terroso	Floral	Astringencia	Amargo	Acidez
Invernal	4.0 ± 0.1 b	3.6 ± 0.1 a	3.1 ± 0.2	5.1 ± 0.2	3.4 ± 0.2 a	1.8 ± 0.2	2.6 ± 0.3 a	1.5 ± 0.3 a	3.4 ± 0.2	3.8 ± 0.2	3.0 ± 0.2 b	3.3 ± 0.1
Brotación	4.3 ± 0.2 a	3.4 ± 0.2 a	2.7 ± 0.2	5.4 ± 0.1	2.7 ± 0.2 b	1.7 ± 0.2	2.7 ± 0.2 a	1.7 ± 0.2 b	2.7 ± 0.2	3.9 ± 0.2	3.0 ± 0.2 b	3.2 ± 0.1
2-3 hojas	4.1 ± 0.1 ab	3.5 ± 0.2 a	2.8 ± 0.2	5.3 ± 0.2	3.0 ± 0.2 ab	1.6 ± 0.1	2.1 ± 0.2 b	1.5 ± 0.3 ab	3.0 ± 0.2	3.7 ± 0.2	3.1 ± 0.2 b	3.0 ± 0.2
8 hojas	3.8 ± 0.1 c	3.1 ± 0.2 b	3.0 ± 0.1	5.2 ± 0.2	3.3 ± 0.2 a	1.7 ± 0.2	2.2 ± 0.2 b	1.2 ± 0.2 b	3.3 ± 0.2	3.8 ± 0.1	3.6 ± 0.2 a	3.2 ± 0.2
p-valores												
Fecha de poda	<0.0001	<0.0001	0.469	0.364	0.029	0.852	0.003	0.431	0.131	0.683	0.021	0.247
Fecha:panelista	0.147	0.062	0.153	0.280	0.829	0.653	0.013	0.789	0.819	0.095	0.003	0.085
Fecha:sesión	<0.0001	0.290	0.782	0.513	0.378	0.087	0.084	0.986	0.790	0.985	0.303	0.642
Sesión:panelista	0.969	0.231	0.703	0.965	0.840	0.752	0.650	0.796	0.777	0.806	0.981	0.034

Dentro de cada parámetro y cada temporada, letras diferentes implican una diferencia estadística entre tratamientos (p-valor <0.05 para la prueba de Fischer).

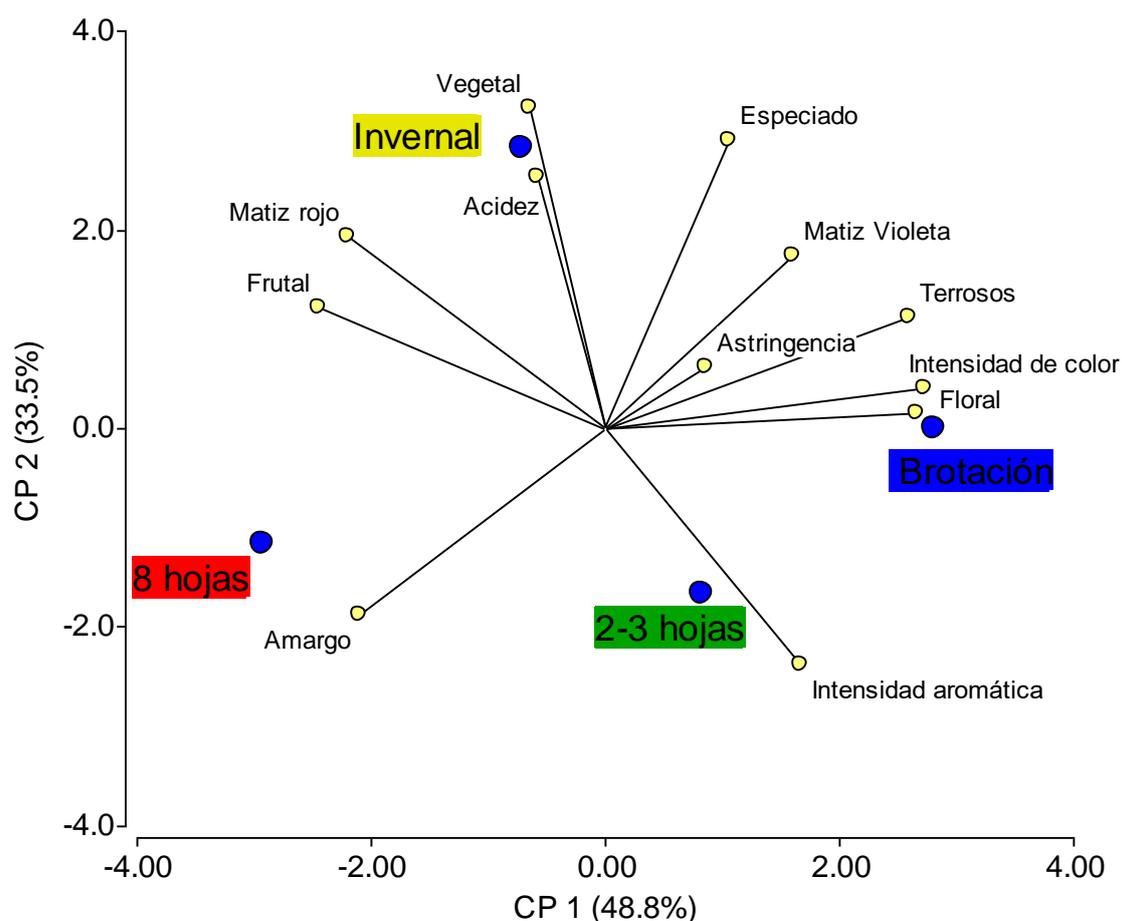


Figura 43. Análisis de componentes principales de vinos Malbec provenientes de plantas podadas en invierno, en brotación, con 2-3 hojas y 8 hojas visibles (2018), con respecto a atributos sensoriales evaluados. Los puntos azules corresponden a las medias de fecha de poda.

Discusión

En este capítulo, los objetivos fueron determinar si el retraso en la fenología producido por la poda tardía permitía retrasar la madurez de la baya, llevándola hacia un periodo más fresco. De esta manera, la baya conservaría altos niveles de acidez y aumentaría el contenido de fenoles, con un efecto positivo en la calidad sensorial de los vinos. Luego de tres años de evaluación, nuestros resultados sugieren que el retraso en el envero producido por la poda tardía, no fue útil para retrasar la acumulación de azúcar, tal como se vio en el capítulo anterior, aunque sí lo fue para retrasar la disminución de la acidez. Por otra parte, los resultados presentados en este capítulo demuestran que la cantidad de fenoles, taninos y antocianinas en la uva y el vino de las plantas podadas tardíamente fueron iguales o mayores a los de las plantas testigo.

La poda tardía afecta la composición química y fenólica de la baya.

Un trabajo reciente de Hernández-Montes et al. (2021) demostró que los cambios que se producen en las bayas durante el envero determinan una rápida sucesión de eventos, empezando por el ablandamiento de las bayas, seguido por la acumulación de azúcar, la expansión de la baya, el catabolismo del malato y, finalmente la acumulación de antocianinas. La poda tardía retrasó todos los estadios fenológicos hasta el envero (estadio medido como el inicio de acumulación de color de las bayas) y, por consiguiente, también la disminución de la acidez total. La acidez total de la baya se compone en un 90% por ácido tartárico, ácido málico y ácido cítrico. Sin embargo, la mayor parte de la variación en la acidez total de la baya es producto de la variación en el ácido málico (Hernández-Montes et al., 2021; Kliewer, 1971; Parra et al., 2010), la cual está fuertemente regulada por la temperatura (Kliewer, 1973; Sweetman et al., 2014). Si bien en este estudio no se midieron ácido málico y ácido tartárico por separado, la acumulación de temperatura diaria fue similar en plantas sometidas a distintas fechas de poda. No obstante, el tiempo de envero a cosecha fue menor para las plantas podadas tardíamente, con la consiguiente disminución en la temperatura acumulada; por lo que es de esperar que las plantas podadas con 8 hojas presentaran un mayor contenido de acidez total a cosecha, ya que presentaron un menor tiempo de degradación del ácido málico. Esto podría ser particularmente importante en vinos blancos, en donde este ácido es deseable. Otros autores reportaron que la poda tardía en estadios similares produjo un retraso en la disminución de la acidez, presentando igual (Buesa et al., 2021) o mayor valor de acidez en la cosecha (Allegro et al., 2020; Petrie et al., 2017; Silvestroni et al., 2018).

Un pH balanceado es necesario para una óptima calidad del vino, expresión del color y estabilidad microbiana. Su nivel en bayas está muy relacionado al contenido de ácidos orgánicos y al de cationes como el potasio. La acumulación de potasio, a su vez, está muy relacionada a la acumulación de azúcar en baya (Mpelasoka et al., 2003). Teniendo en cuenta la rápida acumulación de azúcar en plantas podadas con 8 hojas, esto explicaría que aún con altos niveles de acidez en cosecha, el pH de estas bayas no sea menor al de las plantas testigo.

La división celular parece ser más controlada por la genética de la planta, mientras que la expansión celular es mayormente controlada por factores ambientales (Keller, 2020). Tal como se explicó en el capítulo anterior, el periodo entre floración y envero fue más largo para las plantas podadas tardíamente, acumulando mayor temperatura.

Considerando que en esta fase se produce la división celular y parte de la expansión celular, esto podría explicar el mayor peso de los hollejos debido a la poda tardía.

El efecto de la poda tardía sobre la dinámica de la cantidad de fenoles se diluye cuando los mismos se miden en función de la masa de hollejos. Es decir, la poda tardía incrementó la cantidad de fenoles a lo largo de la madurez de la baya, debido principalmente al mayor espesor de hollejos, resultando en una concentración similar. Esto se diferencia de otros estudios realizados sobre Sangiovese, que reportaron un aumento en la concentración de fenoles totales por unidad de peso de baya (Frioni et al., 2016; Gatti et al., 2016; Alberto Palliotti et al., 2017; Silvestroni et al., 2018).

El efecto de la poda tardía sobre la dinámica de taninos varió mucho de un año a otro. Además, si bien la cantidad de taninos a cosecha fue similar entre tratamientos, las bayas del 2019 presentaron mayor cantidad de los mismos. Según McRae et al. (2016), la dinámica de los taninos en la madurez puede variar según el sitio de cultivo, las características de la temporada y la variedad. Esto coincide con lo reportado hasta el momento en la literatura, en donde se ha visto una variación en la concentración de taninos según la fecha de poda o una interacción con la temperatura de la temporada (Allegro et al., 2020; Moran et al., 2017; Moran, et al., 2018; Petrie et al., 2017)

Las antocianinas comienzan a acumularse en la baya luego de que comienza la entrada activa de azúcares (Haselgrove et al., 2000; Hernández-Montes et al., 2021). En este estudio, el efecto de la poda tardía sobre la acumulación de antocianinas fue diferente según la temporada considerada, aunque siguiendo un comportamiento similar al de la acumulación de azúcar. Además, los tratamientos 2-3H y 8H aumentaron la relación de hoja/fruto respecto a las plantas testigo para las temporadas 2017-18 y 2018-19, la cual está relacionada con la tasa de acumulación de azúcar en la baya (Auzmendi y Holzapfel, 2016; Kliewer y Dokoozlian, 2005). Sin embargo, la cantidad de antocianinas a cosecha fueron mayores sólo la primera temporada para los tratamientos 2-3H y 8H. Esto coincide con lo reportado en otros estudios, en donde, dependiendo de la fecha de poda y de la variedad se reporta un mayor (Buesa et al., 2021; Frioni et al., 2016; Gatti et al., 2016; Moran et al., 2017; Petrie et al., 2017; Zheng et al., 2017) o igual contenido de antocianinas (Moran et al., 2018; Palliotti et al., 2017; Petrie et al., 2017; Silvestroni et al., 2018). Respecto a los sólidos solubles, las podas realizadas con 2-3 hojas y con 8 hojas mostraron una mayor cantidad de antocianinas por baya durante la madurez del 2017-18, lo que podría influir en la calidad del vino (Cadot et al., 2012) o reacoplar la acumulación de azúcares y antocianinas (Sadras y Moran, 2012).

La poda tardía afecta la composición química y fenólica del vino

Respecto a la composición química de los vinos, los vinos provenientes de plantas podadas con 8 hojas mostraron un menor grado alcohólico que el resto de los tratamientos, los primeros dos años del experimento. Esto se debió, en 2018, a un menor tenor azucarino de las bayas (i.e. 1,35 °Brix menos que el testigo). No obstante, el menor grado alcohólico de los vinos del 2019 (i.e. 0,8° menos que el testigo) no se explicó por el tenor azucarino de las bayas, que fue similar entre tratamientos. Por otro lado, la acidez de los que provinieron de las plantas podadas tardíamente fue similar a la de los vinos testigo. Sin embargo, presentaron también un mayor pH. Como se mencionó anteriormente, este parámetro está condicionado no sólo al contenido de ácidos orgánicos libres, sino también a la acumulación de potasio; que a su vez está muy relacionada a la acumulación de azúcar en baya (Mpelasoka et al., 2003; Petrie et al., 2017). Si tenemos en cuenta que las plantas podadas tardíamente acumularon azúcares a mayor velocidad, esto podría indicar que a iguales valores de acidez, el pH de estos vinos haya sido mayor. Por otra parte, si bien los vinos de las plantas podadas con 8 hojas presentaron una acidez total similar, su composición ácida fue diferente. Este tratamiento presentó una menor concentración de ácido tartárico en el vino respecto al resto de los tratamientos (un 50% menos), lo cual puede estar relacionado a una mayor precipitación (en relación a una mayor concentración de K en el mosto) o a una menor síntesis durante el desarrollo de la baya. Sin embargo, no sería posible determinar a través de nuestros datos, la causa de esa posible menor síntesis en la primera etapa de desarrollo de la uva. Asimismo, tampoco se realizó la determinación de K en este estudio que permita interpretar dicha hipótesis.

Al analizar los parámetros fenólicos globales, es decir antocianinas, taninos y fenoles totales, puede decirse que la poda tardía mantiene o aumenta la concentración de estos compuestos en el vino. El contenido de antocianinas totales en los vinos de 2018 y 2019, varió de 273 a 546 mg/L. Estos valores se encuentran dentro de los valores normales reportados por Fanzone et al. (2010) en un estudio de caracterización del Malbec en Mendoza. Los vinos provenientes de las plantas podadas con 8H presentaron mayor cantidad de antocianinas ambos años del estudio, mientras que los de las plantas podadas con 2-3 hojas tuvieron mayor contenido sólo en 2018. Similares resultados han sido obtenidos en las variedades Sangiovese y Syrah (Moran et al., 2018b; Palliotti et al. 2017) para la fecha de poda correspondiente a 2-3 hojas. Debido a la disminución del rendimiento registrada en las dos últimas fechas de poda, la relación hoja/fruto fue significativamente mayor, lo que podría explicar el aumento

en la cantidad de antocianinas (Auzmendi and Holzappel 2016; Kliewer and Dokoozlian 2005). Los taninos y los fenoles totales tuvieron un comportamiento similar durante 2018 y 2019. Es decir, mientras que en 2018 los vinos provenientes de las plantas podadas con 8 hojas presentaron un aumento en la cantidad de taninos y de fenoles totales, en 2019 no hubo diferencia de estos parámetros entre las fechas de poda. Este aumento de fenoles y taninos en 2018 podría deberse al menor rendimiento registrado en este tratamiento. Similares resultados se han obtenido en estudios del efecto del raleo de racimos en Cabernet Sauvignon, Tempranillo y en Vranac (Bogicevic et al., 2015; Ó-Marques et al., 2005). Los taninos interactúan con otros compuestos como proteínas, fenoles y antocianinas los cuales producirían un color más estable en el vino (Versari, Toit, and Parpinello 2012). Una mayor estabilización en el color del vino es una de los efectos más buscados para contrarrestar la potencial pérdida de color y taninos causada por la alta temperatura (Mori et al. 2007; Sadras and Moran 2012a).

Los pigmentos poliméricos puede ser clasificados en largos (LPP) o cortos (SPP), según precipiten o no proteínas. Al mismo tiempo, los LPP son aductos covalentes entre taninos y antocianinas de peso molecular relativamente alto, que pueden provocar astringencia, pero también confieren estabilidad de color a largo plazo (Adams et al., 2004). Los vinos de 8H tuvieron una mayor cantidad de LPP en 2018, lo cual coincidió con una mayor cantidad de taninos y antocianinas para el mismo año. Por otra parte, la diferencia de color entre los vinos del 2018 se debió principalmente a que aquellos provenientes de plantas podadas con 8 hojas, aumentaron la intensidad en un 6% con respecto a los vinos testigo, lo cual implicaría un aumento de tonos rojizos. Similares resultados se obtuvieron en la variedad Syrah con una poda realizada con 2-3 hojas (Moran et al., 2018a). Por otro lado, Buesa et al. (2021) realizaron una poda en brotación en las variedades Bobal y Tempranillo, obteniendo para estos vinos un aumento en los tonos violetas, los cuales suelen estar asociados a una buena aptitud de envejecimiento (Alcalde-Eon et al., 2014).

Los pigmentos derivados de antocianos, como las vitisinas, son de interés enológico porque tienen una alta estabilidad durante el envejecimiento de los vinos tintos. Tal como pudo verse, los vinos 2019 de las plantas 8H, presentaron un mayor contenido de Vitisina A. Estas piranoantocianinas son más resistentes que las antocianinas a los valores elevados de pH y al blanqueo con bisulfito, y presentan un color rojo anaranjado (Bakker y Timberlake, 1997; Fanzone et al., 2010). Si bien el perfil antocianínico corresponde a los vinos del 2019 y la determinación del color a los vinos

del 2018, se observa una coherencia en los datos obtenidos respecto a los vinos provenientes de plantas podadas con 8 hojas.

En resumen, la poda tardía mantiene o mejora la calidad de los vinos de la variedad Malbec. Esta potencial mejora en la composición química de la uva y del vino se debe principalmente a una modificación del régimen térmico durante las primeras etapas de desarrollo (hasta envero) y de la relación hoja/fruta generada por una disminución del rendimiento, que en el caso de la poda de 8 hojas visibles puede ser más del doble. Si bien los vinos provenientes de plantas podadas tardíamente presentaron mayores niveles de pH, la variación en la composición antociánica sugiere una mayor estabilidad del color a lo largo del tiempo.

CAPÍTULO V: Conclusiones

Hipótesis específica 1 - Capítulo III

La poda tardía, realizada luego de brotación, produce un atraso en el ciclo fenológico en cv. Malbec.

La formulación de esta hipótesis se basó en el hábito de crecimiento de la vid, el cual es de tipo acrótono. Debido a la inhibición correlativa de las yemas distales del sarmiento sobre las basales, el crecimiento de primavera se da primeramente en la parte superior de la canopia, mientras que las yemas basales de la canopia permanecen dormidas. Con la poda tardía se esperaba retrasar la brotación de las yemas basales y, en consecuencia, retrasar los sucesivos estadios fenológicos. Luego de 3 años de estudio, se comprobó que la poda tardía es una herramienta efectiva para retrasar la fenología desde la brotación hasta el envero, pero que no sería una técnica que permita posponer la acumulación de azúcar, ya que la mayor relación hoja-fruto provoca una acumulación más rápida de sólidos solubles. Por el contrario, esta técnica sería interesante para escapar a las heladas primaverales al comienzo del ciclo. Por lo tanto, esta hipótesis se acepta parcialmente.

Hipótesis específica 2 - Capítulo III

La poda tardía, realizada luego de brotación, produce una disminución en el consumo en agua total durante el ciclo, debido a un menor crecimiento vegetativo y a un ciclo más corto.

Si bien no todas las variables relacionadas a crecimiento vegetativo disminuyeron, si se observó un retraso en el desarrollo de la canopia y menor longitud de brotes de los tratamientos más tardíos. Por otro lado, los tratamientos de poda tardía produjeron un retraso en la brotación que fue consistente y similar en los tres años del estudio mientras que la fecha de cosecha no se pudo atrasar. En este sentido, el acortamiento del ciclo y el retraso y disminución en el desarrollo vegetativo producido por los tratamientos de 2-3H y 8H generaron una disminución en el consumo de agua, en un promedio de 7,5 y 13,5%, respectivamente. Estos resultados permiten aceptar esta hipótesis.

Hipótesis específica 3 - Capítulo III

La poda tardía, aplicada en varias estaciones sucesivas, produce una alteración de los componentes del rendimiento.

La brotación de la vid, al igual que el resto de las plantas de hoja caduca, se hace a expensas de las reservas. A principios de la primavera, cercano a brotación, los primordios florales ya están formados y comienza la diferenciación floral. Luego, la floración coincide con la menor cantidad de reservas de la planta. Es por esto que una poda tardía, al producir una doble brotación removiendo una mayor cantidad de reservas respecto a las plantas podadas en invierno, altera los componentes del rendimiento. En nuestro estudio, mientras más tardía fue la poda, más disminuyó el rendimiento. Es decir, mientras la poda en brotación no afectó el rendimiento, las plantas podadas a 2-3H redujeron el rendimiento en un 18% y las plantas podadas a 8H disminuyeron el rendimiento en un 60%, en relación con PI. Este resultado fue consistente con los años, sin existir un aparente efecto acumulativo lo cual permite aceptar la hipótesis.

Hipótesis específica 4 - Capítulo IV

El atraso en la fenología genera que la madurez de la baya ocurra en épocas más frescas, por lo que conserva niveles superiores de acidez titulable y aumenta el contenido de polifenoles en uvas y en vino.

La hipótesis específica planteada en el capítulo IV se postuló pensando en que el retraso en la fenología producido por la poda tardía, llevaría a las bayas a madurar en épocas más frescas, lo que mejoraría la calidad química y fenólica de las bayas y el vino. Esta hipótesis es rechazada ya que la fecha de cosecha no se pudo atrasar. Sin embargo, más allá de que la fecha de cosecha no se modificó, se observaron efectos de la poda tardía sobre la composición química de la uva y del vino. De manera general, los tratamientos de poda tardía mantienen o mejoran la calidad de los vinos de la variedad Malbec, aunque aumentando su pH. Esta potencial mejora en la composición enológica se debe principalmente a una modificación de la relación hoja/fruta generada por una disminución del rendimiento, que en el caso de la poda de 8 hojas visibles puede ser más del doble. Además la composición antociánica de los vinos aumentaría la estabilidad de los mismos a mayores niveles de pH.

CONSIDERACIONES PRÁCTICAS

El hábito de crecimiento acrótono de la vid hace que los sarmientos broten por su parte distal, siempre y cuando estos se posicionen verticalmente. El sistema de conducción VSP (Vertical Shoot Positioning), podado a cordón bilateral, busca la posición vertical de los brotes en crecimiento. No obstante, en los sarmientos que son muy cortos para llegar al alambre de conducción o quedan inclinados o por fuera del sistema de sostén, pueden brotar las yemas ubicadas en otras posiciones distintas a la apical. Es por esto que una de las recomendaciones prácticas derivadas de este estudio, es contar con plantas podadas en el invierno a modo de control y usarlas para determinar los estadios fenológicos y la fecha de poda de manera más fácil y precisa.

Se recomienda que el seguimiento de la fenología de las plantas podadas en invierno se realice con una alta frecuencia, ya que la diferencia de días entre los momentos de poda es muy pequeña. Por ejemplo, la diferencia de podar en brotación o con 2-3 hojas es sólo de 3 a 5 días. Sin embargo, los efectos sobre el rendimiento, el crecimiento vegetativo y sobre la calidad de la uva y del vino son totalmente diferentes. Por lo tanto, aplicar la poda en el estadio fenológico oportuno es esencial para obtener los resultados deseados.

Si bien no ha sido probado en este ensayo, la prepoda invernal seguida de una terminación de poda manual traería algunas ventajas, ya que el punto de partida son sarmientos más cortos, con menos yemas. Entonces, por un lado, la pérdida de reservas sería menor y por otro, la poda manual se podría realizar de manera más rápida, lo que facilitaría la planificación y ejecución de poda tardía a mayor escala. Sin embargo, restaría evaluar si el retraso en la fenología en plantas prepodadas en invierno es similar al de plantas podadas de manera convencional.

En este estudio, se buscaba un retraso en la fenología en cv. Malbec que llevara el periodo de madurez hacia condiciones de temperatura más favorables, restableciendo el balance entre los distintos compuestos de la uva. Sin embargo, la poda tardía realizada en cv Malbec en nuestras condiciones, también alteró el desarrollo de la canopia y los índices de equilibrio vegetativo-reproductivo de las plantas. Es por esto que muchas de las variables medidas tuvieron una interacción con la temperatura, evidenciando que el efecto de la poda tardía no fue sólo el de retrasar la fenología, sobre todo con las podas realizadas con 2-3 y 8 hojas visibles. Esto disminuye la predictibilidad de los resultados para estas dos fechas en nuestras condiciones, por lo que se sugiere probar estos tratamientos en distintas zonas y variedades de Mendoza. La poda realizada en el momento de brotación podría usarse para postergar el

comienzo de ciclo la planta, lo cual es importante ante la ocurrencia de heladas primaverales, sin repercutir sobre el rendimiento de la planta, en nuestras condiciones.

BIBLIOGRAFÍA

- Abidin M.A., Mahyuddin M.N., Zainuri M.A.. 2021. *Solar photovoltaic architecture and agronomic management in agrivoltaic system: A review*. Sustain 13:18–21.
- Adams, D. O., Harbertson, J. F., & Picciotto, E. A. (2004). *Fractionation of red wine polymeric pigments by protein precipitation and bisulfite bleaching*. ACS Symposium Series, 886, 275–288. <https://doi.org/10.1021/bk-2004-0886.ch017>
- Agosta E.A., Cavagnaro,M. 2010. *Variaciones interanuales de la precipitación de verano y el rendimiento del cultivo de la vid en Mendoza*. Geoacta, 35(2), 1-11.
- Ahumada G.E., Catania A., Fanzone M.L., Belmonte M.J., Giordano C.V., González C.V. 2021. *Effect of leaf-to-fruit ratios on phenolic and sensory profiles of Malbec wines from single high-wire-trellised vineyards*. Journal of the Science of Food and Agriculture, 101(4), 1467-1478.
- Al-Agele H.A., Proctor K., Murthy G., Higgins C. 2021. *A case study of tomato (Solanum lycopersicon var. legend) production and water productivity in agrivoltaic systems*. Sustain 13:1–13.
- Alcalde-Eon, C., García-Estévez, I., Ferreras-Charro, R., Rivas-Gonzalo, J. C., Ferrer-Gallego, R., & Escribano-Bailón, M. T. (2014). *Adding oenological tannin vs. overripe grapes: Effect on the phenolic composition of red wines*. Journal of Food Composition and Analysis, 34(1), 99–113. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2014.01.004>
- Aliquó G., Torres R., Lacombe T., Boursiquot J.M., Laucou V., Gualpa J., Fanzone M., Sari S., Perez Peña J., Prieto J.A., 2017. *Identity and parentage of some South American grapevine cultivars present in Argentina*. Aust. J. Grape Wine Res. 23, 452–460. <https://doi.org/10.1111/ajgw.12282>
- Allegro, G., Pastore, C., Valentini, G., Filippetti, I., 2020. *Post-budburst hand finishing of winter spur pruning can delay technological ripening without altering phenolic maturity of Merlot berries*. Aust. J. Grape Wine Res. 26, 139–147. <https://doi.org/10.1111/ajgw.12427>
- Arrizabalaga-Arriazu M., Gomès E., Morales F., Irigoyen J.J., Pascual I., Hilbert G. 2021. *Impact of 2100-Projected Air Temperature, Carbon Dioxide, and Water Scarcity on Grape Primary and Secondary Metabolites of Different Vitis vinifera cv. Tempranillo Clones*. Journal of Agricultural and Food Chemistry.

- Aruani C. 2009. *Cambio climático y vitivinicultura en Argentina: Evaluación de la situación actual y proyecciones futuras, en base a datos empíricos y opiniones de los distintos sectores de la industria*. Informe de Beca OIV.
- Auzmendi, I., Holzapfel, B.P., 2016. *Leaf area to fruit weight ratios for maximising grape berry weight, sugar concentration and anthocyanin content during ripening*. Acta Hort. 1115, 127–132. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2016.1115.19>
- Bakker, J., & Timberlake, C. F. (1997). *Isolation, Identification, and Characterization of New Color-Stable Anthocyanins Occurring in Some Red Wines*. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 45(1), 35–43. <https://doi.org/10.1021/jf960252c>
- Bangerth, F., 1989. *Dominance among fruits/sinks and the search for a correlative signal*. Physiol. Plant. 76, 608–614. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1989.tb05487.x>
- Barroso R., Carbajal H., Ortiz H., Malaniuk M., Quenol H., Murgo M., Coria C., Videla R., Prieto S., Manzano H., Quini C., Aruani, C. 2019. *High-altitude wines from northwest Argentina-physical-chemical and sensory characteristics*. BIO Web of Conferences (Vol. 15).
- Bogicevic, Marina, Vesna Maras, Milena Mugo, Vesna Kod, Jovana Rai, and Š. Sanja. 2015. “*The Effects of Early Leaf Removal and Cluster Thinning Treatments on Berry Growth and Grape Composition in Cultivars Vranac and Cabernet Sauvignon*.” 1–8. <https://doi.org/10.1186/s40538-015-0037-1>
- Bonada, M., Sadras, V.O., 2015. *Review: Critical appraisal of methods to investigate the effect of temperature on grapevine berry composition*. Aust. J. Grape Wine Res. 21, 1–17. <https://doi.org/10.1111/ajgw.12102>
- Boninsegna J.A., 2014. *Impacto del Cambio Climático en los oasis del oeste argentino*. Ciencia e e Investigación 64–1, 45–58.
- Bota J., Tomás M., Flexas J., Medrano H., Escalona J.M., 2016. *Differences among grapevine cultivars in their stomatal behavior and water use efficiency under progressive water stress*. Agricultural Water Management 164, 91–99. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.07.016> Investigación 64–1, 45–58.
- Buesa, I., Caccavello, G., Basile, B., Merli, M.C., Poni, S., Chirivella, C., Intrigliolo, D.S., 2018. *Delaying berry ripening of Bobal and Tempranillo grapevines by late leaf removal in a semi-arid and temperate-warm climate under different water*

- regimes*. Aust. J. Grape Wine Res. <https://doi.org/10.1111/ajgw.12368>
- Buesa, I., Caccavello, G., Basile, B., Merli, M.C., Poni, S., Chirivella, C., Intrigliolo, D.S., 2019. *Delaying berry ripening of Bobal and Tempranillo grapevines by late leaf removal in a semi-arid and temperate-warm climate under different water regimes*. Aust. J. Grape Wine Res. <https://doi.org/10.1111/ajgw.12368>
- Buesa, I., Yeves, A., Sanz, F., Chirivella, C., & Intrigliolo, D. S. (2021). *Effect of delaying winter pruning of Bobal and Tempranillo grapevines on vine performance, grape and wine composition*. Australian Journal of Grape and Wine Research, 27(1), 94–105. <https://doi.org/10.1111/ajgw.12467>
- Cabré, M.F., Quénol, H., Nuñez, M., 2016. *Regional climate change scenarios applied to viticultural zoning in Mendoza, Argentina*. Int. J. Biometeorol. 60, 1325–1340. <https://doi.org/10.1007/s00484-015-1126-3>
- Cabré F., Nuñez, M. 2020. *Impacts of climate change on viticulture in Argentina*. Regional Environmental Change 20, 1-12. <https://doi.org/10.1007/s10113-020-01607-8>
- Caccavello G., Giaccone M., Scognamiglio P., Forlani M., Basile B. 2017. *Influence of intensity of post-veraison defoliation or shoot trimming on vine physiology, yield components, berry and wine composition in Aglianico grapevines*. Australian Journal of Grape and Wine Research, 23(2), 226-239.
- Cadot, Y., Caillé, S., Samson, A., Barbeau, G., & Cheynier, V. (2012). *Sensory representation of typicality of Cabernet franc wines related to phenolic composition: Impact of ripening stage and maceration time*. Analytica Chimica Acta, 732, 91–99. <https://doi.org/10.1016/J.ACA.2012.02.013>
- Candolfi-Vasconcelos, M., Koblet, W., 1990. *Yield fruit quality, bud fertility and starch reserves of the wood as a function of leaf removal in Vitis vinifera—evidence of compensation and stress recovering*. Vitis 29, 199–221.
- Caravia L., Collins C., Petrie P.R., Tyerman S.D., 2016. *Application of shade treatments during Shiraz berry ripening to reduce the impact of high temperature*. Australian Journal of Grape and Wine Research 22, 422–437. <https://doi.org/10.1111/ajgw.12248>
- Caravia L., Pagay V., Collins C., Tyerman S.D., 2017. *Application of sprinkler cooling within the bunch zone during ripening of Cabernet Sauvignon berries to reduce*

- the impact of high temperature*. Australian Journal of Grape and Wine Research 23, 48–57. <https://doi.org/10.1111/ajgw.12255>
- Carmo Vasconcelos M., Greven M., Winefield C.S., Trought M.C.T., Raw V., 2009. *The flowering process of vitis vinifera: A review*. American Journal of Enology and Viticulture 60, 411–434.
- Chaves M.M., Zarrouk O., Francisco R., Costa, J.M., Santos T., Regalado A.P., Rodrigues M.L., Lopes C.M., 2010. *Grapevine under deficit irrigation: hints from physiological and molecular data*. Annals of Botany 105, 661–676. <https://doi.org/10.1093/aob/mcq030>
- Chopard J, Bisson A, Lopez G, Persello S, Richert C, Fumey D. 2021. *Development of a decision support system to evaluate crop performance under dynamic solar panels*. AgriVoltaics2020 Conference AIP Conf. Proc. 2361, 050001-1–050001-7; <https://doi.org/10.1063/5.0055119>.
- Chorti E., Guidoni S., Ferrandino A., Novello V., 2010. *Effect of different cluster sunlight exposure levels on ripening and anthocyanin accumulation in Nebbiolo grapes*. Am. J. Enol. Vitic. 61, 23–30.
- CIMA 2015. *Tercer Informe de Cambio Climatico en Argentina; tendencias y proyecciones*. Resumen Ejecutivo. 1, 1–19. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Clingeffer P.R. 2009. *Influence of canopy management systems on vine productivity and fruit composition*. In Recent Advances in Grapevine Canopy Management, pp. 13-18. University of California, Davis.
- Coombe, B.G., 1964. *The winter treatment of grapevines with zinc and its interaction with time of pruning*. Aust. J. Exp. Agric. 4, 241–246. <https://doi.org/10.1071/EA9640241>
- Coombe, B.G., 1995. *Growth Stages of the Grapevine: Adoption of a system for identifying grapevine growth stages*. Aust. J. Grape Wine Res. 1, 104–110. <https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.1995.tb00086.x>
- Coombe, B.G., McCarthy, M.G., 2000. *Dynamics of grape berry growth and physiology of ripening*. Aust. J. Grape Wine Res. 6, 131–135. <https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2000.tb00171.x>
- Cuppari R.I., Higgins C.W., Characklis G.W. 2021. *AgriVoltaics and weather risk: A*

- diversification strategy for landowners*. Appl Energy 291:116809.
- Dai, Z. W., Vivin, P., Barrieu, F., Ollat, N., & Delrot, S. (2010). *Physiological and modelling approaches to understand water and carbon fluxes during grape berry growth and quality development: A review*. In Australian Journal of Grape and Wine Research (Vol. 16, Issue SUPPL. 1, pp. 70–85). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2009.00071.x>
- De Bei, R., Fuentes, S., Gilliam, M., Tyerman, S., Edwards, E., Bianchini, N., Smith, J., & Collins, C. (2016). *Viticanopy: A free computer app to estimate canopy vigor and porosity for grapevine*. Sensors (Switzerland), 16(4). <https://doi.org/10.3390/s16040585>
- de Medeiros, g. A. De, arruda, f. B., sakai, e., fujiwara, m., & boni, n. R. (2000). Crescimento vegetativo e coeficiente de cultura do feijoeiro relacionados a graus-dia acumulados. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 35(9), 1733–1742. <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2000000900005>
- de Rosas I., Ponce M.T., Malovini E., Deis L., Cavagnaro B., Cavagnaro P., 2017. *Loss of anthocyanins and modification of the anthocyanin profiles in grape berries of Malbec and Bonarda grown under high temperature conditions*. Plant Science 258, 137–145. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2017.01.015>
- Deis L., de Rosas I., Malovini E., Cavagnaro M., Cavagnaro J.B., 2015. *Impacto del cambio climático en Mendoza. Variación climática en los últimos 50 años*. Mirada desde la fisiología de la vid. Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias 47, 67–92.
- Deloire, A., 2011. *The concept of berry sugar loading*. Wineland 257, 93–95.
- 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>
- Elamri Y., Cheviron B., Lopez J.M., Dejean C., Belaud G. 2018. *Water budget and crop modelling for agrivoltaic systems: Application to irrigated lettuces*. Agric Water Manag 208:440–453.
- Fanzone, M., Peña-Neira, Á., Jofre, V., Assof, M., & Zamora, F. (2010). Phenolic characterization of Malbec wines from Mendoza province (Argentina). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58(4), 2388–2397.

<https://doi.org/10.1021/jf903690v>

- Fanzone, M. (2012). *Caracterización de la composición fenólica de uvas y vinos de la variedad Malbec (Vitis vinifera L.): su relación con el origen geográfico, factores vitivinícolas y valor comercial*. Tesis doctoral. Universitat Roviri i Virgili, Tarragona, España. 368 p.
- Fanzone, M. L., Sari, S. E., Mestre, M. V., Catania, A. A., Catelén, M. J., Jofré, V. P., González-Miret, M. L., Combina, M., Vazquez, F., & Maturano, Y. P. (2020). *Combination of pre-fermentative and fermentative strategies to produce Malbec wines of lower alcohol and pH, with high chemical and sensory quality*. *Oeno One*, 54(4), 1041–1058. <https://doi.org/10.20870/OENO-ONE.2020.54.4.4018>
- Filippetti I., Movahed N., Allegro G., Valentini G., Pastore C., Colucci E., Intrieri C. 2015. *Effect of post-veraison source limitation on the accumulation of sugar, anthocyanins and seed tannins in Vitis vinifera cv. Sangiovese berries*. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 21(1), 90-100.
- Flexas J., Galmés J., Gallé A., Gulías J., Pou A., Ribas-Carbó M., Tomàs M., Medrano H., 2010. *Improving water use efficiency in grapevines: Potential physiological targets for biotechnological improvement*. *Australian Journal of Grape and Wine Research* 16, 106–121. <https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2009.00057.x>
- Friend, A.P., Trought, M.C.T., 2007. *Delayed winter spur-pruning in New Zealand can alter yield components of Merlot grapevines*. *Aust. J. Grape Wine Res.* 13, 157–164. <https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2007.tb00246.x>
- Frioni, T., Tombesi, S., Silvestroni, O., Lanari, V., Bellincontro, A., Sabbatini, P., Gatti, M., Poni, S., Palliotti, A., 2016. *Postbudburst spur pruning reduces yield and delays fruit sugar accumulation in sangiovese in central Italy*. *Am. J. Enol. Vitic.* 67, 419–425. <https://doi.org/10.5344/ajev.2016.15120>
- Frioni T., Pirez F.J., Diti I., Ronney L., Poni S., Gatti M., 2019. *Post-budbreak pruning changes intra-spur phenology dynamics, vine productivity and berry ripening parameters in Vitis vinifera L. cv. 'Pinot Noir.'* *Sci. Hortic. (Amsterdam)*. 256, 108584. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108584>
- Gallo A.E., Perez Peña J.E., Prieto J.A. 2020. *Mechanisms underlying photosynthetic acclimation to high temperature are different between Vitis vinifera cv. Syrah and Grenache*. *Functional Plant Biology*, 48(3), 342-357.

- Gallo, A. E. (2022). *Respuestas de dos variedades de vid (Vitis vinifera) contrastantes al aumento de temperatura : fotosíntesis , eficiencia en el uso del agua y composición química de la baya*. Tesis doctoral. Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza, Argentina.
- Gama, J. (2016). *Colorscience: Color science methods and data, R package version 1.0.4*. Disponible en: <https://cran.r-project.org/package=colorscience>
- Gatti, M., Pirez, F.J., Chiari, G., Tombesi, S., Palliotti, A., Merli, M.C., Poni, S., 2016. *Phenology, Canopy Aging and Seasonal Carbon Balance as Related to Delayed Winter Pruning of Vitis vinifera L. cv. Sangiovese Grapevines*. Front. Plant Sci. 7:659. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00659>
- Gatti M., Pirez F.J., Frioni T., Squeri C., Poni S., 2018. *Calibrated, delayed-cane winter pruning controls yield and significantly postpones berry ripening parameters in Vitis vinifera L. cv. Pinot Noir*. Aust. J. Grape Wine Res. 24, 305–316. <https://doi.org/10.1111/ajgw.12330>
- Gatti M., Garavani A., Krajecz K., Ughini V., Parisi M., Frioni T., Poni S. 2019. *Mecahnical mid-shoot leaf removal on Ortrugo (Vitis vinifera L.) at pre- or mid-veraison alters fruit growth and maturation*. American Journal of Enology and Viticulture 70, 88-97.
- Gautam, D., Ostendorf, B., Pagay, V., 2021. *Estimation of grapevine crop coefficient using a multispectral camera on an unmanned aerial vehicle*. Remote Sens. 13, 1–16. <https://doi.org/10.3390/rs13132639>
- González C.V., Prieto J.A., Mazza C., Jeréz D.N., Biruk L.N., Jofre M.F., Giordano C.V. 2021. *Grapevine morphological shade acclimation is mediated by light quality whereas hydraulic shade acclimation is mediated by light intensity*. Plant Science, 307, 110893.
- Gordillo, B., F.J. Rodríguez-Pulido, M.L. Escudero-Gilete, M.L. González-Miret, and F.J. Heredia (2012). *Comprehensive colorimetric study of anthocyanic copigmentation in Model Solutions. Effects of pH and molar ratio*. J. Agric. Food Chem. 60, 2896-2905.
- Gouot J.C., Smith J.P., Holzapfel B.P., Walke, A.R., Barril C., 2019. *Grape berry flavonoids: A review of their biochemical responses to high and extreme high temperatures*. Journal of Experimental Botany 70, 397–423. <https://doi.org/10.1093/jxb/ery392>

- Greer D.H., Weston C., 2010. *Heat stress affects flowering, berry growth, sugar accumulation and photosynthesis of Vitis vinifera cv. Semillon grapevines grown in a controlled environment*. Functional Plant Biology 37, 206–214. <https://doi.org/10.1071/FP09209>
- Gu S., Jacobs S.D., McCarthy B.S., Gohil H.L. 2012. *Forcing vine regrowth and shifting fruit ripening in a warm region to enhance fruit quality in 'Cabernet Sauvignon' grapevine (Vitis vinifera L.)*. The Journal of Horticultural Science and Biotechnology, 87(4), 287-292.
- Gutiérrez-Gamboa G., Liu S.Y., Pszczółkowski P., 2020. *Resurgence of minority and autochthonous grapevine varieties in South America: a review of their oenological potential*. J. Sci. Food Agric. 100, 465–482. <https://doi.org/10.1002/jsfa.10003>
- Gutiérrez-Gamboa G., Zheng W., Martínez de Toda F., 2021a. *Current viticultural techniques to mitigate the effects of global warming on grape and wine quality: A comprehensive review*. Food Res. Int. 139. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109946>
- Gutiérrez-Gamboa G., Zheng W., Martínez de Toda F., 2021b. *Strategies in vineyard establishment to face global warming in viticulture: a mini review*. J. Sci. Food Agric. 101, 1261–1269. <https://doi.org/10.1002/jsfa.10813>
- Harbertson, J. F., Kennedy, J. A., & Adams, D. O. (2002). *Tannin in skins and seeds of Cabernet Sauvignon, Syrah, and Pinot noir berries during ripening*. American Journal of Enology and Viticulture, 53(1), 54–59.
- Harbertson, J. F., Picciotto, E. A., & Adams, D. O. (2003). *Measurement of Polymeric Pigments in Grape Berry Extracts and Wines Using a Protein Precipitation Assay Combined with Bisulfite Bleaching*. American Journal of Enology and Viticulture, 54(4), 301–306.
- Haselgrove, L., Botting, D., Van Heeswijck, R., Høj, P. B., Dry, P. R., Ford, C., & 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(2), 141–149. <https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2000.tb00173.x>
- Heredia, T. M., Adams, D. O., Fields, K. C., Held, P. G., & Harbertson, J. F. (2006). *Evaluation of a Comprehensive Red Wine Phenolics Assay Using a Microplate Reader* Theresa. 4, 497–502.

- Hernández-Montes, E., Zhang, Y., Chang, B. M., Shcherbatyuk, N., & Keller, M. (2021). *Soft, sweet, and colorful: Stratified sampling reveals sequence of events at the onset of grape ripening*. *American Journal of Enology and Viticulture*, 72(2), 137–151. <https://doi.org/10.5344/ajev.2020.20050>
- Hidalgo, L. (2011). *Tratado de Viticultura General* (4 Edition). Ediciones Mundi-Prensa.
- Holzappel, B.P., Smith, J.P., Field, S.K., Hardie, W.J., 2010. *Dynamics of Carbohydrate Reserves in Cultivated Grapevines*. *Horticultural Reviews*. pp. 143–211.
- Hopfer H, Ebeler SE, Heymann H. *The combined effects of storage temperature and packaging type on the sensory and chemical properties of Chardonnay*. *J. Agric. Food Chem.* 2012; 60: 10743-10754.
- Howell, G.S., Wolpert, J.A., 1978. *Nodes per cane , primary bud phenology, and spring freeze damage to concord grapevines*. A preliminary note. 29, 5–8.
- Hulme M., Sheard N., 1999. *Climate Change Scenarios for Argentina*, University of East Anglia.
- Husain A.A., Hasan W.Z., Shafie S., Hamidon M.N., Pandey S.S. 2018. *A review of transparent solar photovoltaic technologies*. *Renew Sustain Energy Rev* 94:779–791.
- Instituto Nacional de Vitivinicultura (INV), 2020. *Informe Anual De Superficie 2020*.
- Intrieri C., Filippetti I., Allegro G., Valentini G., Pastore C., Colucci E. 2011. *The semi-minimal-pruned hedge : A novel mechanized grapevine training system*. *American Journal of Enology and Viticulture* 62, 312-318.
- Jonckheere, I., Fleck, S., Nackaerts, K., Muys, B., Coppin, P., Weiss, M., & Baret, F. (2004). *Review of methods for in situ leaf area index determination Part I. Theories, sensors and hemispherical photography*. *Agricultural and Forest Meteorology*, 121(1–2), 19–35. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2003.08.027>
- Jones G. V., White M.A., Cooper O.R., Storchmann K., 2005. *Climate change and global wine quality*. *Climatic Change* 73, 319–343. <https://doi.org/10.1007/s10584-005-4704-2>
- Jones G. Schultz H. (2016) *Climate change and emerging cool climate wine regions*. *Wine & Viticulture Journal*, November/december 2016 (VOL31,N6), 51-53
- Keller, M., 2020. *The Science of grapevines - Anatomy and Phisiology*, Third edit. ed.

Academic Press - Elsevier.

- Keller, M., Tarara, J.M., Mills, L.J., 2010. *Spring temperatures alter reproductive development in grapevines*. Aust. J. Grape Wine Res. 16, 445–454. <https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2010.00105.x>
- Kliewer, W. M. (1971). *Effect of day temperature and light intensity on concentration of malic and tartaric acids in Vitis vinifera L. grapes*. Journal of the American Society for Horticultural Science, 96, 372–377. <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US201302388714>
- Kliewer, W. M., & Schultz, H. B. (1973). *Effect of Sprinkler Cooling of Grapevines on Fruit Growth and Composition*. American Journal of Enology and Viticulture, 24(1), 17–26.
- Kliewer, W.M., Dokoozlian, N.K., 2005. *Leaf area/crop weight ratios of grapevines: Influence on fruit composition and wine quality*. Am. J. Enol. Vitic. 56, 170–181.
- Lamichhane J. R. 2021. *Rising risks of late-spring frosts in a changing climate*. Nature Climate Change, 11(7), 554-555.
- Lawless HT, Heymann H. En: *Sensory Evaluation of Food. Principles and Practices*. Second Edition. New York: Springer; 2010. 620 p.
- Lobos G.A., Acevedo-Opazo C., Guajardo-Moreno A., Valdés-Gómez H., Taylor J.A., Laurie V.F. 2015. *Effects of kaolin-based particle film and fruit zone netting on Cabernet Sauvignon grapevine physiology and fruit quality*. OENO One, 49, 137-144.
- Lucero C., Filippo M., Vila H., Venier M. 2017. *Comparing water deficit and saline stress between 1103P and 101-14 Mgt rootstocks, grafted with Cabernet Sauvignon*. Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Cuyo, 49(1), 33-43.
- Malu P.R., Sharma U.S., Pearce J.M. 2017. *Agrivoltaic potential on grape farms in India*. Sustain Energy Technol Assessments 23:104–110.
- Marrou H., Guillioni L., Dufour L., Dupraz C., Wery J. 2013a. *Microclimate under agrivoltaic systems: Is crop growth rate affected in the partial shade of solar panels?* Agric For Meteorol 177:117–132.
- Marrou H., Dufour L., Wery J. 2013b. *How does a shelter of solar panels influence water flows in a soil-crop system?* Eur J Agron 50:38–51.

- Martinez-Luscher J., Chen C.C.L., Brillante L., Kurtural S.K. 2017. *Partial solar radiation exclusion with color shade nets reduces the degradation of organic acids and flavonoids of grape berry (Vitis vinifera L.)*. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 65(49), 10693-10702.
- Martínez, J.A; Melgosa, M.; Pérez, M.M.; Hita, E.; Negueruela, A.I. Note. *Visual and instrumental color evaluation in red wines*. Food Sci. Technol. Int. 2001, 7, 439–444.
- Martínez-Moreno, A., Sanz, F., Yeves, A., Gil-Muñoz, R., Martínez, V., Intrigliolo, D.S., 2019. *Forcing bud growth by double-pruning as a technique to improve grape composition of Vitis vinifera L . cv . Tempranillo in a semi-arid Mediterranean climate*. Sci. Hortic. (Amsterdam). 256, 108614. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108614>
- Martínez de Toda, F., Sancha, J.C., 1999. *Long-term Effects of Simulated Mechanical Pruning on Grenache Vines Under Drought Conditions*. Am. J. Enol. Vitic. 50, 87–90.
- Martínez de Toda F., Sancha, J.C., Zheng, W., Balda, P. 2014. *Leaf area reduction by trimming, a growing technique to restore the anthocyanins: sugars ratio decoupled by the warming climate*. Vitis 53 (4), 189–192.
- Martínez de Toda, F., 2021. *Double cropping in vitis vinifera l. pinot noir: Myth or reality?* IVES Tech. Rev. 10, 22–23. <https://doi.org/10.3390/agronomy10060799>
- McRae, J. M., Bindon, K. A., Hixson, J. L., & Smith, P. A. (2016). *Wine tannin structure and extraction: review of current research*. In *Tannins: Biochemistry, Food Sources and Nutritional Properties* (Issue January).
- Medrano H., Tomàs M., Martorell S., Escalona J.M., Pou A., Fuentes S., Flexas J., Bota J., 2015. *Improving water use efficiency of vineyards in semi-arid regions. A review*. Agronomy 35, 499–517. <https://doi.org/10.1007/s13593-014-0280-z>
- Mira de Orduña R., 2010. *Climate change associated effects on grape and wine quality and production*. Food Research International 43, 1844–1855. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.05.001>
- Morales-Castilla I., de Cortázar-Atauri I.G., Cook B.I., Lacombe T., Parker A., Van Leeuwen C., ... Wolkovich E. M. 2020. Diversity buffers winegrowing regions from climate change losses. Proceedings of the National Academy of Sciences, 117(6),

2864-2869.

- Moran, M.A., Sadras, V.O., Petrie, P.R., 2017. *Late pruning and carry-over effects on phenology , yield components and berry traits in Shiraz*. Aust. J. of Grape Wine Res. <https://doi.org/10.1111/ajgw.12298>
- Moran, M. A., Bastian, S. E., Petrie, P. R., & Sadras, V. O. (2018a). *Late pruning impacts on chemical and sensory attributes of Shiraz wine*. Australian Journal Of Grape and Wine Research, 24(4), 469–477. <https://doi.org/10.1111/ajgw.12350>
- Moran, M. A., Petrie, P. R., & Sadras, V. O. (2018b). *Effects of late pruning and elevated temperature on phenology, yield components, and berry traits in shiraz*. American Journal of Enology and Viticulture, 70(1), 9–18. <https://doi.org/10.5344/ajev.2018.18031>
- Moran, M. A., Sadras, V. O., & Petrie, P. R. (2017). *Late pruning and carry-over effects on phenology , yield components and berry traits in Shiraz*. Australian Journal Of Grape and Wine Research. <https://doi.org/10.1111/ajgw.12298>
- Mori K., Goto-Yamamoto N., Kitayama M., Hashizume K., 2007. *Loss of anthocyanins in red-wine grape under high temperature*. Journal of Experimental Botany 58, 1935–1945. <https://doi.org/10.1093/jxb/erm055>
- Mosedale J.R., Abernethy K.E., Smart R.E., Wilson R.J., Maclean I.M. 2016. *Climate change impacts and adaptive strategies: lessons from the grapevine*. Global Change Biology, 22(11), 3814-3828.
- Mpelasoka, B. S., Schachtman, D. P., Treeby, M. T., & Thomas, M. R. (2003). *A review of potassium nutrition in grapevines with special emphasis on berry accumulation*. Australian Journal of Grape and Wine Research, 9(3), 154–168. <https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2003.tb00265.x>
- Naulleau A., Gary C., Prévot L., Hossard L. 2021. *Evaluating strategies for adaptation to climate change in grapevine production—A systematic review*. Frontiers in Plant Science, 11, 2154.
- Netzer, Y., Yao, C., Shenker, M., Bravdo, B. A., & Schwartz, A. (2009). *Water use and the development of seasonal crop coefficients for Superior Seedless grapevines trained to an open-gable trellis system*. Irrigation Science, 27(2), 109–120. <https://doi.org/10.1007/s00271-008-0124-1>
- Noble AC, Arnold RA, Buechsenstein J, Leach EJ, Schmidt JO, Stern PM. *Modification*

- of a standardized system of wine aroma terminology. *Am. J. Enol. Vitic.* 1987; 38 (2): 143-146.
- O.I.V. 2017 *Distribution of the world's grapevine varieties*. Focus OIV 2017, <https://www.oiv.int/public/medias/5888/en-distribution-of-the-worlds-grapevine-varieties.pdf>.
- O.I.V. 2021. *Actualidad de la coyuntura del sector vitivinícola mundial en 2020*. <https://www.oiv.int/public/medias/7903/actualidad-oiv-de-la-coyuntura-del-sector-vitivin-cola-mundi.pdf>
- Ojeda, H., 2007. *Riego cualitativo de precisión en vid*. Síntesis de la relación presentada en el Enoforum.
- Ollat N., Carde J. P., Gaudillère J.P., Barrieu F., Diakou-Verdin P., Moing A. 2002. Grape berry development: a review. *œno One*, 36(3), 109-131.
- Ó-Marques, Joao;, Rui Reguinga, Olga Laureano, and Jorge M. Ricardo-da-silva. 2005. "Changes in grape seed , skin and pulp condensed tannins during berry ripening : effect of fruit pruning Article in *Ciência e Técnica Vitivinícola* • January 2005." (January 2017).
- Pallioti A., Panara F., Silvestroni O., Lanari V., Sabbatini P., Howell G.S., Poni S. 2013. *Influence of mechanical postveraison leaf removal apical to the cluster zone on delay of fruit ripening in Sangiovese (Vitis vinifera L.) grapevines*. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 19(3), 369-377.
- Pallioti, A., Tombesi, S., Silvestroni, O., Lanari, V., Gatti, M., Poni, S., 2014. *Changes in vineyard establishment and canopy management urged by earlier climate-related grape ripening: A review*. *Sci. Hortic. (Amsterdam)*. 178, 43–54. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.07.039>
- Pallioti, A., Frioni, T., Tombesi, S., Sabbatini, P., Cruz-castillo, J. G., Lanari, V., Silvestroni, O., Gatti, M., & Poni, S. (2017). *Double-Pruning Grapevines as a Management Tool to Delay Berry Ripening and Control Yield*. *American Journal of Enology and Viticulture*, doi: 10.5344/ajev.2017.17011. <https://doi.org/10.5344/ajev.2017.17011>
- Parker A., de Cortázar-Atauri I.G., Chuine I., Barbeau G., Bois B., Boursiquot J.M., Cahurel J.Y., Claverie M., Dufourcq T., Gény L., Guimberteau G., Hofmann R.W., Jacquet O., Lacombe T., Monamy C., Ojeda H., Panigai L., Payan J.C., Lovelle

- B.R., Rouchaud E., Schneider C., Spring J.L., Storchi P., Tomasi D., Trambouze W., Trought M., van Leeuwen C., 2013. *Classification of varieties for their timing of flowering and veraison using a modelling approach: A case study for the grapevine species Vitis vinifera L.* Agric. For. Meteorol. 180, 249–264. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.06.005>
- Parker, A.K., Hofmann, R.W., Van Leeuwen, C., Mclachlan, A.R.G., Trought, M.C.T., 2015. *Manipulating the leaf area to fruit mass ratio alters the synchrony of total soluble solids accumulation and titratable acidity of grape berries.* Aust. J. Grape Wine Res. 21, 266–276. <https://doi.org/10.1111/ajgw.12132>
- Parker A., Raw V., Martin D., Haycock S., Sherman E., Trought, M.C. 2016. *Reduced grapevine canopy size post-flowering via mechanical trimming alters ripening and yield of Pinot Noir.* Vitis 55, 1–9.
- Parra, C. S., Aguirreolea, J., Sánchez-díaz, M., & Irigoyen, J. J. (2010). *Effects of climate change scenarios on Tempranillo grapevine (Vitis vinifera L .) ripening : response to a combination of elevated CO 2 and temperature , and moderate drought.* Plant and Soil, 337, 179–191. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0514-z>
- Pérez-Magariño, S.; González-Sanjosé, M.L. Application of absorbance values used in wineries for estimating CIELAB parameters in red wines. Food Chem. 2003, 81, 301–306
- Petrie P.R., Sadras V.O., 2008. *Advancement of grapevine maturity in Australia between 1993 and 2006: putative causes, magnitude of trends and viticultural consequences.* Australian Journal of Grape and Wine Research 14, 33–45. <https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2008.00005.x>
- Petrie, P. R., Brooke, S. J., Moran, M. A., & Sadras, V. O. (2017). *Pruning after budburst to delay and spread grape maturity.* Australian Journal of Grape and Wine Research, 23(3), 378–389. <https://doi.org/10.1111/ajgw.12303>
- Phogat V., Cox J.W., Mallants D., Petrie P.R., Oliver D.P., Pitt T.R. 2020. *Historical and future trends in evapotranspiration components and irrigation requirement of winegrapes.* Australian Journal of Grape and Wine Research, 26(4), 312-324.
- Picón-Toro, J., González-Dugo, V., Uriarte, D., Mancha, L.A., Testi, L., 2012. *Effects of canopy size and water stress over the crop coefficient of a “Tempranillo” vineyard in south-western Spain.* Irrig. Sci. 30, 419–432. <https://doi.org/10.1007/s00271-012-0351-3>

- Pinheiro, J; Bates D; DebRoy, S; Sarkar, D. R. C. T. (2022). *nlme: Linear and Nonlinear Mixed Effects Models. R package version 3.1-155*. <https://cran.r-project.org/package=nlme>
- Poni S., Del Zozzo F., Santelli S., Gatti M., Magnanini E., Sabbatini P., Frioni T. 2021. *Double cropping in Vitis vinifera L. cv. Pinot Noir: agronomical and physiological validation*. Australian Journal of Grape and Wine Research, 27(4), 508-518.
- Poni, S., Sabbatini, P., & Palliotti, A. (2022). Facing Spring Frost Damage in Grapevine: Recent Developments and the Role of Delayed Winter Pruning – A Review. American Journal of Enology and Viticulture, ajev.2022.22011. <https://doi.org/10.5344/ajev.2022.22011>
- Prieto J.A., Louarn G., Perez Peña J., Ojeda H., Simonneau T., Lebon E. 2013 *Impact of training system on gas exchanges and water use efficiency: a 3D modeling study with Topvine*. 18th International Symposium GiESCO 563-567. Porto, Portugal.
- Proctor K.W., Murthy G.S., Higgins C.W. 2021. *Agrivoltaics align with green new deal goals while supporting investment in the us' rural economy*. Sustain 13:1–11
- Quénol H., Aruani C., Fourment M., Trapateau L., Grassin M., Briche E., Quini C., Ortiz H., Ferrer M., Barbeau G., Neethling E., Pinson L., Polimeni M. 2015. *Changement climatique dans les vignobles d’Amérique du Sud. En Changement climatique et terroirs viticoles*. Edición Tech&Doc, Editores: Lavoisier
- Ramos M., Martinez de Toda F. 2020. Variability in the potential effects of climate change on phenology and on grape composition of Tempranillo in three zones of the Rioja DOCa (Spain). European Journal of Agronomy, 115, 126014.
- Rienth M., Vigneron N., Darriet P., Sweetman C., Burbidge C., Bonghi C., Walker R.P., Famiani F., Castellarin S.D., 2021. *Grape Berry Secondary Metabolites and Their Modulation by Abiotic Factors in a Climate Change Scenario—A Review*. Frontiers in Plant Science 12. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.643258>
- Rodriguez G, Hough G, Secreto J. *Soldesa: Freely available software for descriptive analysis data acquisition*. J. Sens.Stud. 2014; 29: 233.
- Rusticucci M., Barrucand M. 2004. *Observed trends and changes in temperature extremes over Argentina*. Journal of Climate, 17(20), 4099-4107.
- Sadok W., Lopez J.R., Smith K.P., 2021. *Transpiration increases under high-*

- temperature stress: Potential mechanisms, trade-offs and prospects for crop resilience in a warming world.* Plant, Cell & Environment 44, 2102-2116.
<https://doi.org/10.1111/pce.13970>
- Sadras V.O., Soar C.J. 2009. Shiraz vines maintain yield in response to a 2-4 °C increase in maximum temperature using an open-top heating system at key phenostages. European Journal of Agronomy 31, 250–258.
<https://doi.org/10.1016/j.eja.2009.09.004>
- Sadras, V.O., Petrie, P.R., 2011a. *Quantifying the onset , rate and duration of sugar accumulation in berries from commercial vineyards in contrasting climates of Australia* 190–198. <https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2011.00135.x>
- Sadras, V.O., Petrie, P.R., 2011b. *Climate shifts in south-eastern Australia: early maturity of Chardonnay , Shiraz and Cabernet Sauvignon is associated with early onset rather than faster ripening.* Aust. J. Grape Wine Res. 17, 199–205.
<https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2011.00138.x>
- Sadras, V.O., Moran, M.A., 2012a. *Nonlinear effects of elevated temperature on grapevine phenology.* Agric. For. Meteorol. 173, 107–115.
<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.10.003>
- Sadras, V.O., Moran, M.A., 2012b. *Elevated temperature decouples anthocyanins and sugars in berries of Shiraz and Cabernet Franc.* Aust. J. Grape Wine Res. 18, 115–122. <https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2012.00180.x>
- Sadras, V.O., Moran, M.A., Bonada, M., 2012. *Effects of elevated temperature in grapevine. I Berry sensory traits.* Aust. Soc. Vitic. Oenology Inc 19, 95–106.
<https://doi.org/10.1111/ajgw.12007>
- Sadras V.O., Petrie P.R., Moran M.A. 2013. Effects of elevated temperature in grapevine. II juice pH, titratable acidity and wine sensory attributes. Australian Journal of Grape and Wine Research 19, 107–115.
<https://doi.org/10.1111/ajgw.12001>
- Sanchez E., 2020. *Programa Nacional Frutales. Superficie ocupada por plantaciones frutales en el país y cambios en su estructura productiva.* INTA Ediciones, Estación Experimental Agropecuaria Balcarce.
- Santillán D., Iglesias A., La Jeunesse I., Garrote L., Sotes V., 2019. *Vineyards in transition: A global assessment of the adaptation needs of grape producing*

regions under climate change. Science of the Total Environment 657, 839–852.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.079>

Santos J., Fraga, H., Malheiro A., Moutinho-Pereira J., Dinis L., Correia C., Moriondo M., Leolini L., Dibari C., Costafreda-Aumedes S., Karstchall T., Menz C., Molitor D., Junk J., Beyer M., Schultz, H. 2020. *A review of the potential climate change impacts and adaptation options for European viticulture*. Applied Sciences, 10(9), 3092.

Schultz, H.R., Kiefer, W., Gruppe, W., 1996. *Photosynthetic duration, carboxylation efficiency and stomatal limitation of sun and shade leaves of different ages in field-grown grapevine* Schultz H., Hoffman M. 2014. *The ups and downs of environmental impact on grapevines: future challenges in temperate viticulture*. In *Grapevine in a changing environment. A molecular and ecophysiological perspective*. Edited by Gerós H., Chaves M., Medrano H., Delrot S. Wiley Blackwell, pp. 18-37. (*Vitis vinifera* L.). Vitis 35, 169–176.

Schultz H. 2019. Water in a warmer world – is atmospheric evaporative demand changing in viticultural areas?. BIO Web of Conferences 12, 01011. 41st World Congress of Vine and Wine. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20191201011>

Silvestroni, O., Lanari, V., Lattanzi, T., & Palliotti, A. (2018). *Delaying winter pruning, after pre-pruning, alters budburst, leaf area, photosynthesis, yield and berry composition in Sangiovese (Vitis vinifera L.)*. Australian Journal of Grape and Wine Research, 24(4), 478–486. <https://doi.org/10.1111/ajgw.12361>

Smith, M., 1994. *CROPWAT: A Computer Program for Irrigation Planning and Management*.

Soar C.J., Collins M.J., Sadras V.O. 2009. Irrigated Shiraz vines (*Vitis vinifera*) upregulate gas exchange and maintain berry growth in response to short spells of high maximum temperature in the field. Functional Plant Biology 36, 801–814.

Sweetman, C., Sadras, V. O., Hancock, R. D., Soole, K. L., & Ford, C. M. (2014). *Metabolic effects of elevated temperature on organic acid degradation in ripening Vitis vinifera fruit*. Journal of Experimental Botany, 65(20), 5975–5988. <https://doi.org/10.1093/jxb/eru343>

Tarara, J.M., Lee, J., Spayd, S.E., Scagel, C.F., 2008. *Berry temperature and solar radiation alter acylation, proportion, and concentration of anthocyanin in Merlot grapes*. Am. J. Enol. Vitic. 59, 235–247.

- The GIMP Development Team, 2019. GIMP, Available at: <https://www.gimp.org>
- Tortosa I., Escalona J. M., Toro G., Douthe C., Medrano H. 2020. Clonal Behavior in Response to Soil Water Availability in Tempranillo Grapevine cv: From Plant Growth to Water Use Efficiency. *Agronomy*, 10(6), 862.
- Touil S., Richa A., Fizir M. 2021. Shading effect of photovoltaic panels on horticulture crops production: a mini review. *Rev Environ Sci Biotechnol* 20, 281–296. <https://doi.org/10.1007/s11157-021-09572-2>
- van Houten S., Muñoz C., Bree L., Bergamín D., Sola C., Lijavetzky D. 2020. *Natural genetic variation for grapevine phenology as a tool for climate change adaptation*. *Applied Sciences*, 10(16), 5573.
- Van Leeuwen C., Roby J.P., Alonso-Villaverde V., Gindro K., 2013. Impact of clonal variability in *Vitis vinifera* cabernet franc on grape composition, wine quality, leaf blade stilbene content, and downy mildew resistance. *J. Agric. Food Chem.* 61, 19–24. <https://doi.org/10.1021/jf304687c>
- Van Leeuwen, C., Darriet, P., 2016. *The Impact of Climate Change on Viticulture and Wine Quality*. *J. Wine Econ.* 11, 150–167. <https://doi.org/10.1017/jwe.2015.21>
- Van Leeuwen C., Destrac-irvine A., Dubernet M., Duchêne E., Gowdy M., Marguerit E., Pieri P., Parker A.K., de Rességuier L., Ollat N., 2019. *An Update on the Impact of Climate Change in Viticulture and Potential Adaptations*. *Agronomy* 10, 1–20.
- Van Passel S., Massetti E., Mendelsohn R. 2017. *A Ricardian analysis of the impact of climate change on European agriculture*. *Environmental and Resource Economics*, 67(4), 725-760.
- Vasconcelos, M.C., Castagnoli, S., 2000. *Leaf canopy structure and vine performance*. *Am. J. Enol. Vitic.* 51, 390–396.
- Vasconcelos, M.C., Greven, M., Winefield, C.S., Trought, M.C.T., Raw, V., 2009. *The Flowering Process of Vitis vinifera : A Review*. *Am. J. Enol. Vitic.*
- Venios X., Korkas E., Nisiotou A., Banilas G., 2020. Grapevine responses to heat stress and global warming. *Plants* 9, 1–15. <https://doi.org/10.3390/plants9121754>
- Versari, A., Toit, W., & Parpinello, G. P. (2012). Oenological tannins : a review. 19, 1–10. <https://doi.org/10.1111/ajgw.12002>
- Vicente-serrano, S.M., Lopez-Moreno, J., Beguería, S., Lorenzo-La Cruz, J., Sanchez-

- Lorenzo, A., García-Ruiz, J.M., Azorin-Molina, C., Morán-Tejada, E., Revuelto, J., Trigo, R., Coelho, F., Espejo, F., 2014. *Evidence of increasing drought severity caused by temperature rise in southern Europe*. Environ. Res. Lett. Lett. 9, 044001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/4/044001>
- Villalba R., 2007. *Cambios Climáticos Regionales en el Contexto del Calentamiento Global*. Director 6.
- Webb L. B., Whetton P.H., Bhend J., Darbyshire R., Briggs, P.R., Barlow E.W. 2012. Earlier wine-grape ripening driven by climatic warming and drying and management practices. *Nature Climate Change*, 2(4), 259-264
- Williams, L.E., Phene, C.J., Grimes, D.W., Trout, T.J., 2003. *Water use of mature Thompson Seedless grapevines in California*. Irrig. Sci. 22, 11–18. <https://doi.org/10.1007/s00271-003-0067-5>
- Williams, L.E., Ayars, J.E., 2005. *Grapevine water use and the crop coefficient are linear functions of the shaded area measured beneath the canopy*. Agric. For. Meteorol. 132, 201–211. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2005.07.010>
- Winkler AJ, Cook JA, Kliewere WM, Lider LA (1974) *General viticulture*. University of California Press, Berkeley
- Winkler B., Lewandowski I., Voss A., Lemke S. 2018. *Transition towards renewable energy production? Potential in smallholder agricultural systems in West Bengal, India*. Sustain 10:1–24.
- Wolkovich E.M., Burge D., Walker M.A., Nicholas K.A. 2017. *Phenological diversity provides opportunities for climate change adaptation in winegrapes*. *Journal of Ecology*, 105(4), 905-912.
- Wolkovich E.M., de Cortázar-Atauri I.G., Morales-Castilla I., Nicholas K.A., Lacombe T. 2018. *From Pinot to Xinomavro in the world's future wine-growing regions*. *Nature Climate Change*, 8(1), 29-37.
- Zheng, W., García, J., Balda, P., & De Toda, F. M. (2017). *Effects of late winter pruning at different phenological stages on vine yield components and berry composition in La Rioja, north-central Spain*. *Oeno One*, 51(4), 363–372. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2017.51.4.1863>

ANEXOS

Anexo I: Caracterización agrometeorológica de la época de madurez de baya

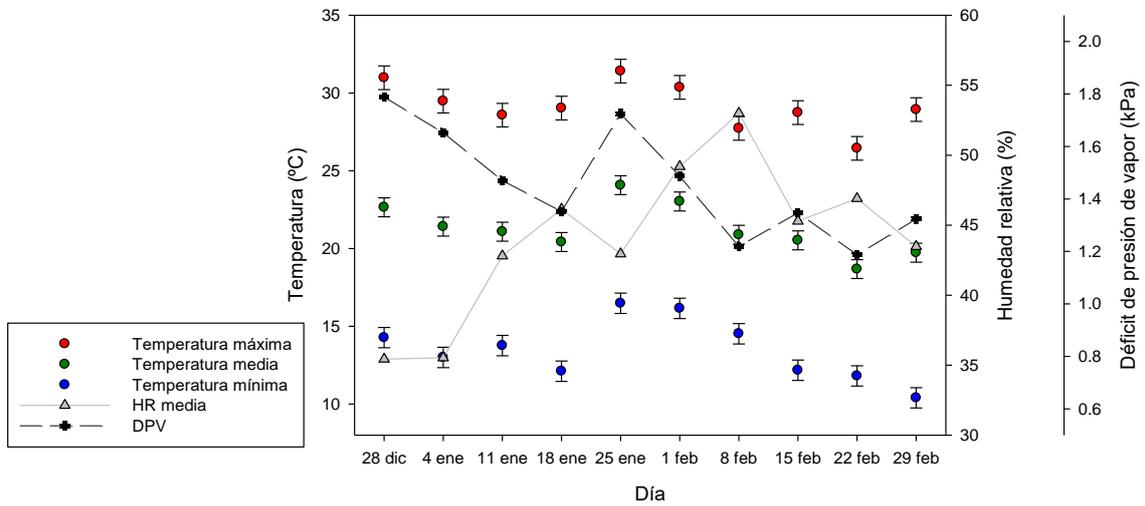


Figura S1. Progresión durante las tres temporadas del experimento de la temperatura media diaria (●), temperatura máxima diaria (●), temperatura mínima diaria (●), la humedad relativa media (▲) y el déficit de presión de vapor. Cada punto representa el promedio de 7 días, desde la última semana de diciembre hasta la última semana de febrero. Los valores son medias \pm error estándar.

Anexo II: Evolución de la madurez de la baya respecto a los grados días acumulados

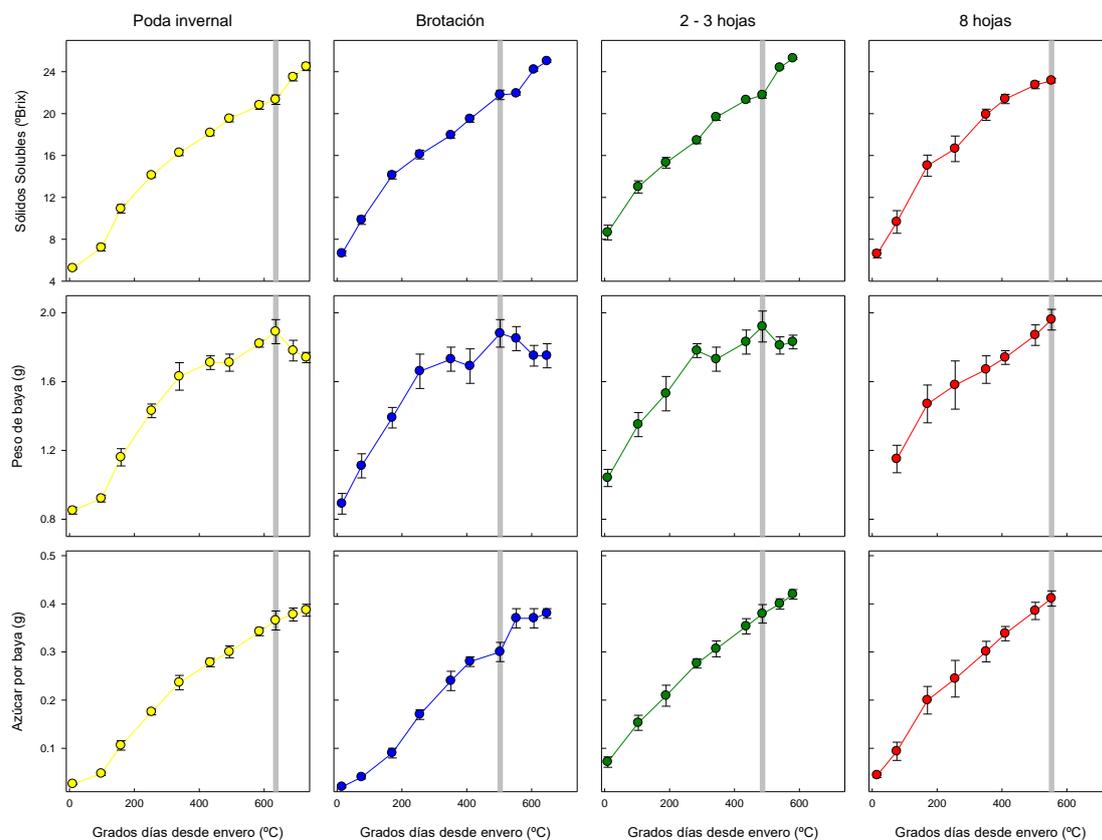


Figura S2. Progresión de sólidos solubles totales (°Brix), peso de baya (g) y azúcar por baya (g) respecto a los grados día acumulados desde enero durante la temporada 2017-18. Los valores son medias \pm error estándar. La línea gris vertical corresponde al momento en el que se alcanza el peso máximo de baya para cada tratamiento.

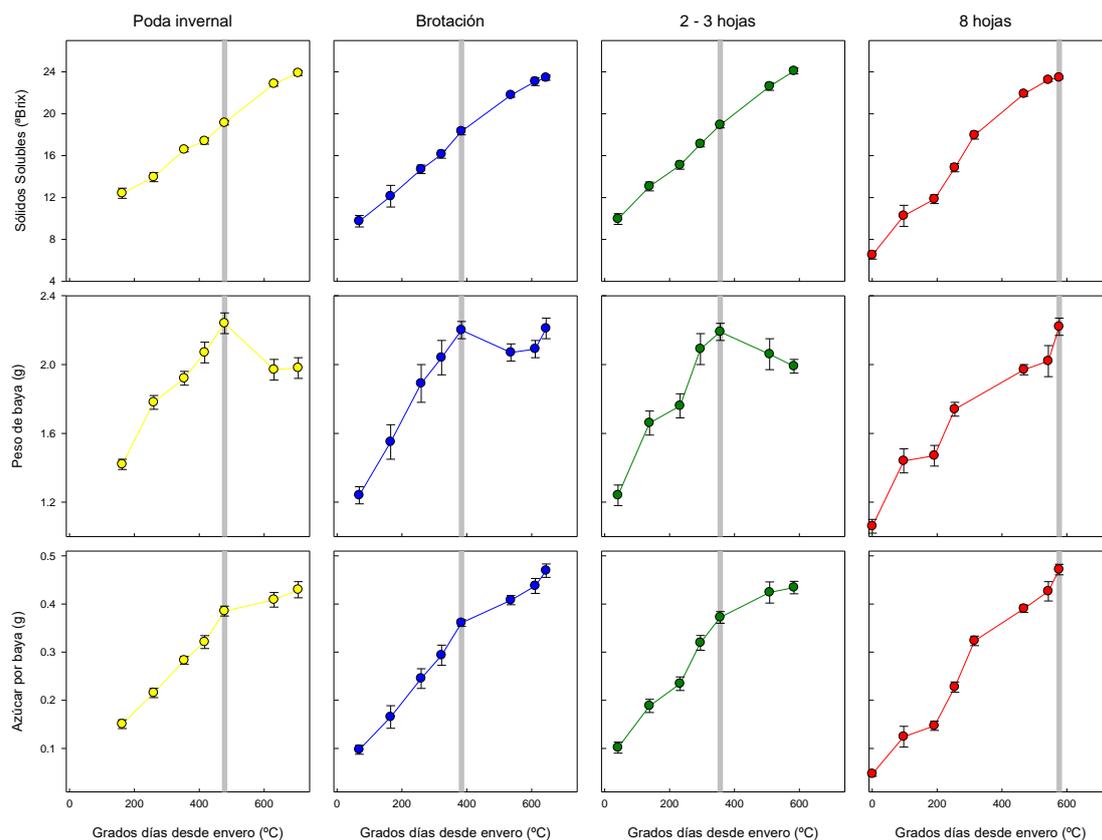


Figura S3. Progresión de sólidos solubles totales (°Brix), peso de baya (g) y azúcar por baya (g) respecto a los grados día acumulados desde enero durante la temporada 2018-19. Los valores son medias \pm error estándar. La línea gris vertical corresponde al momento en el que se alcanza el peso máximo de baya para cada tratamiento.

El azúcar por baya de los tratamientos de poda tardía fue mayor a igual valor de grados día respecto al testigo (Figura S4). La cantidad de azúcar por baya a cosecha (23 °Brix) fue similar entre tratamientos, en ambas temporadas. En la temporada 2017-18 (Figura S4 A) la cantidad de azúcar a los 23 °Brix se estimó en 0.37, 0.37, 0.38 y 0.40 g/baya para los tratamientos PI, Br, 2-3H y 8H, respectivamente. La cantidad de azúcar de la segunda temporada fue un poco mayor a la de la primera (Figura S4 B) y se calculó para bayas de PI, Br, 2-3H y 8H en 0.42, 0.44, 0.43 y 0.44 g/baya, respectivamente.

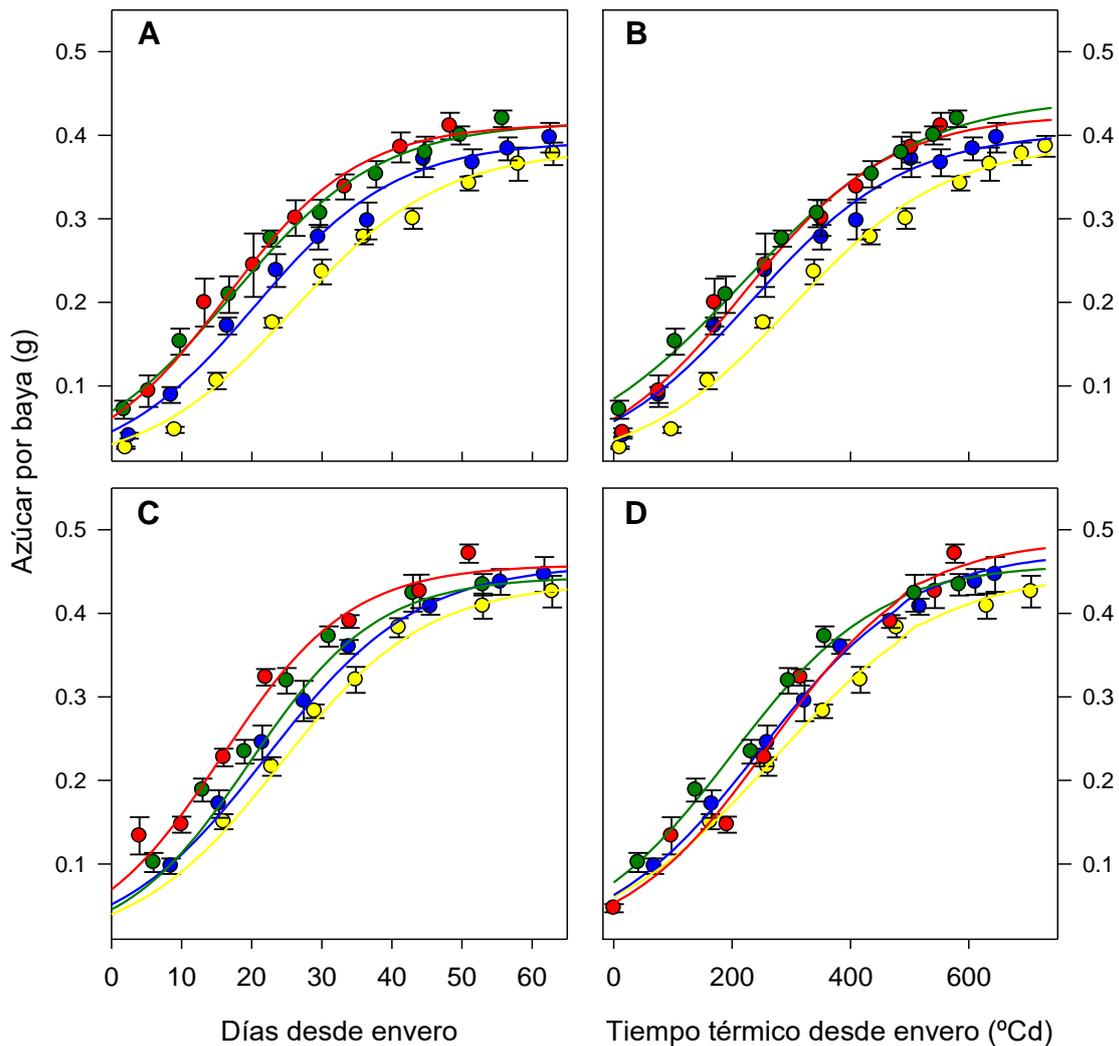


Figura S4. Evolución del azúcar por baya respecto a los días (A y C) y al tiempo térmico (B y D) desde el enero hasta la cosecha para las temporadas 2017-18 (paneles de arriba) y 2018-19 (paneles de abajo) para plantas de Malbec podadas durante el invierno (PI, ●), en brotación (Br, ●), con 2-3 hojas (2-3H, ●) y con 8 hojas expandidas (8H, ●). Los puntos representan la media de 4 repeticiones \pm error estándar de cada fecha de muestreo.

Tabla S1: Valores de F de comparando los ajustes del azúcar por baya respecto a los días desde el comienzo del enero y a la acumulación de temperatura. El análisis estadístico se realizó para comparar las fechas de poda sobre la evolución del azúcar por baya.

Azúcar por baya respecto al tiempo transcurrido desde el enero

	2017-18				2018-19			
	PI	Br	2-3H	8H	PI	Br	2-3H	8H
PI		12.6 *	48.0 *	35.8 *		4.0 *	10.8 *	34.5 *
Br			8.7 *	7.7 *			1.4 ns	13.8 *
2-3H				0.4 ns				9.0 *
8H								

Azúcar por baya respecto al tiempo térmico transcurrido desde el enero

	2017-18				2018-19			
	PI	Br	2-3H	8H	PI	Br	2-3H	8H
PI		14.5 *	47.3 *	20.2 *		6.5 *	17.3 *	9.1 *
Br			6.2 *	1.8 ns			3.5 *	0.6 ns
2-3H				0.9 ns				6.3 *
8H								

*: Modelos distintos ($F_{muestral} > F_{tabla}$, para un p valor de 0.05)

ns: Modelos similares ($F_{muestral} < F_{tabla}$, para un p -valor de 0.05)

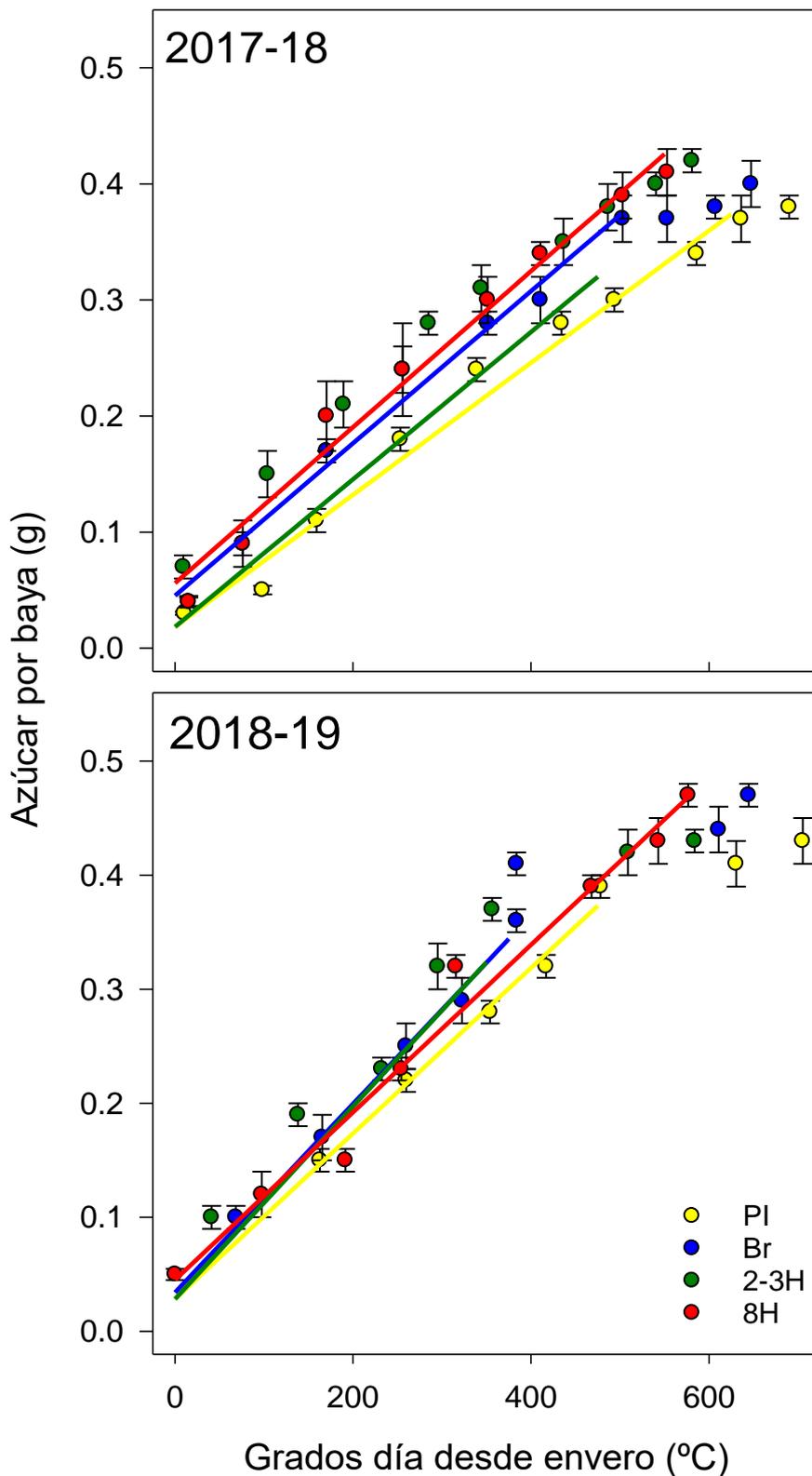


Figura S5. Regresiones entre azúcar por baya y grados día para la fase de carga rápida de azúcar (desde comienzo del enero hasta el peso máximo de baya) para las temporadas 2017-18 y 2018-19. Los valores son medias de 4 repeticiones \pm error estándar de cada fecha de muestra.

Anexo III: Evolución de los fenoles de la baya

Fenoles Totales

Respecto a la cantidad de fenoles por baya (Figura S6), mientras que en la primera temporada se percibió una disminución en la cantidad por baya para todas las fechas de poda, durante la segunda temporada, los fenoles por baya mantuvieron valores similares ($p=0.3862$) entre el principio y fin de madurez. Durante 2017-18 (Figura S6, A), las plantas podadas con 8H presentaron mayores valores respecto a las plantas podadas en invierno, resultando en una mayor cantidad de fenoles por baya en cosecha. Por otra parte, no hubo diferencias para las distintas fechas de muestreo entre los tratamientos invernal, brotación y 2-3 hojas. Respecto al 2018-19 (Figura S6, B), los valores de fenoles por baya se mantuvieron sin variaciones a lo largo del tiempo, excepto para el tratamiento de 2-3 hojas que presentó un mayor valor de fenoles por baya, el 22 de enero ($p=0.0069$). La cantidad de fenoles por baya a cosecha fue similar entre tratamientos.

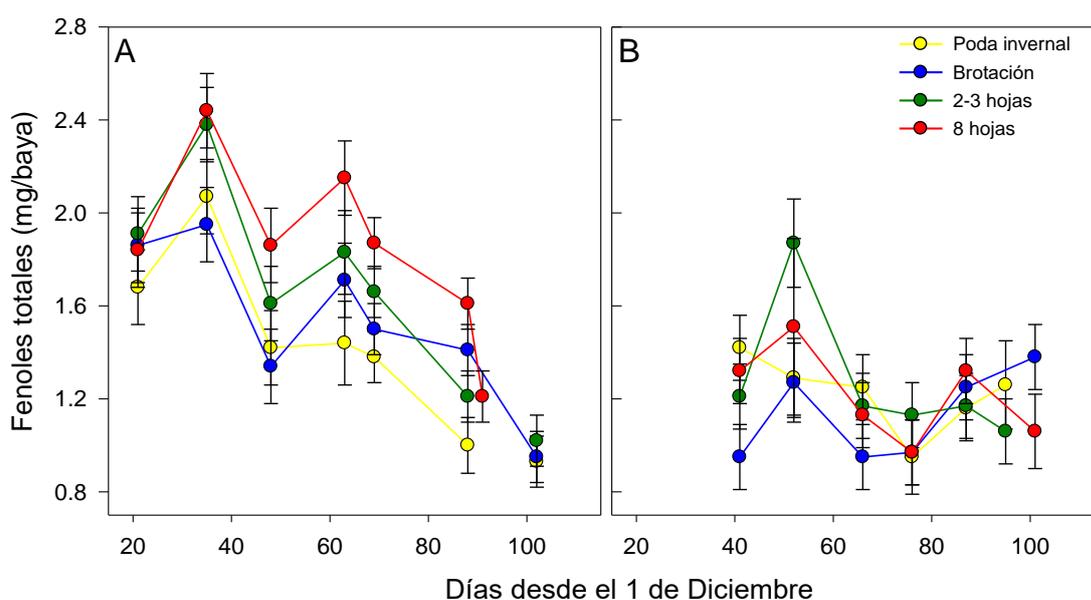


Figura S6 Evolución de la cantidad de fenoles (mg/baya) en 2017-18 (A) y 2018-19 (B) registradas para las distintas fechas de poda durante la madurez de la baya. Los valores son promedios \pm error estándar de 4 repeticiones por tratamiento, 20 bayas por unidad experimental.

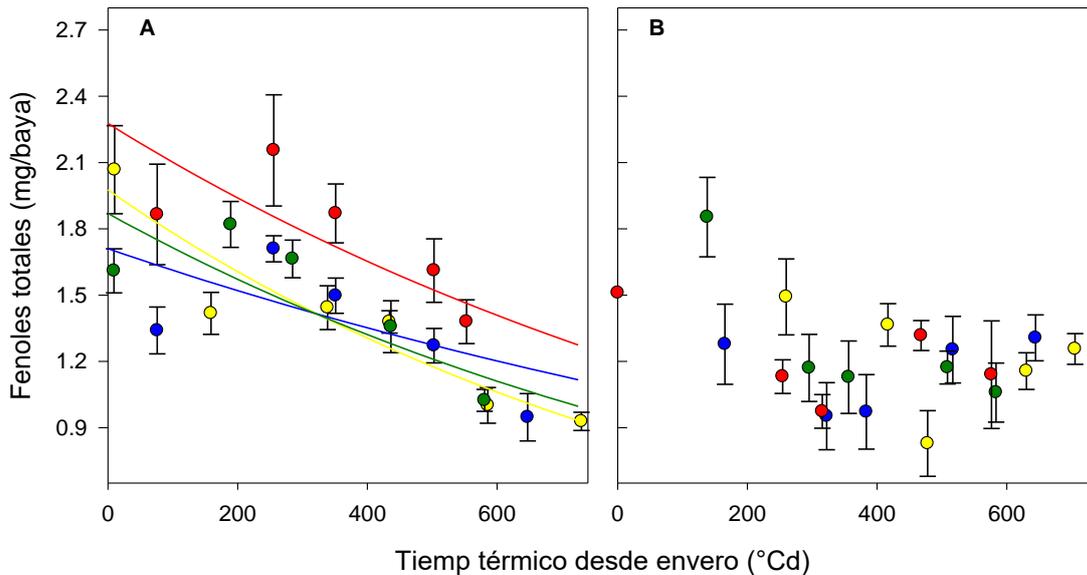


Figura S7. Evolución de la cantidad de fenoles (mg/) en 2017-18 (A) y 2018-19 (B) registradas para las distintas fechas de poda respecto al tiempo térmico (°Cd) por cada tratamiento durante la madurez de la baya. Los valores son promedios \pm error estándar de 4 repeticiones por tratamiento. Las líneas suavizadas representan las ecuaciones ajustadas del modelo.

Tabla S2: Valores de F de comparando los ajustes de la concentración de los fenoles totales respecto al tiempo térmico desde el invierno. El análisis estadístico se realizó para comparar las fechas de poda según la evolución de los fenoles de hollejo durante la madurez de la baya.

	2017-18				2018-19			
	PI	Br	2-3H	8H	PI	Br	2-3H	8H
PI		1.8 ns	0.3 ns	8.5 *		1.9 ns	0.9 ns	0.1 ns
Br			0.4 ns	5.6 *			4.2 *	1.0 ns
2-3H				6.1 *				0.9 ns
8H								

*: Modelos distintos ($F_{muestral} > F_{tabla}$, para un p valor de 0.05)

ns: Modelos similares ($F_{muestral} < F_{tabla}$, para un p-valor de 0.05)

Taninos

Respecto a la cantidad de taninos por baya, durante 2017-18 (Figura S7, A) se observó una disminución en la cantidad para todas las fechas de poda. Esta disminución fue mayor para el tratamiento invernal y menor para las podas tardías. Finalmente, en cosecha se observó una mayor concentración en los tratamientos de brotación (20%), 2-3 hojas (20%) y de 8 hojas (40%) respecto al testigo (Tabla 9). Durante la segunda temporada (Figura S7, B), y al igual que para los fenoles, los taninos por baya presentaron una mayor variabilidad de una fecha de muestreo a la otra y mantuvieron valores similares ($p=0.0591$) entre el principio y fin de madurez.

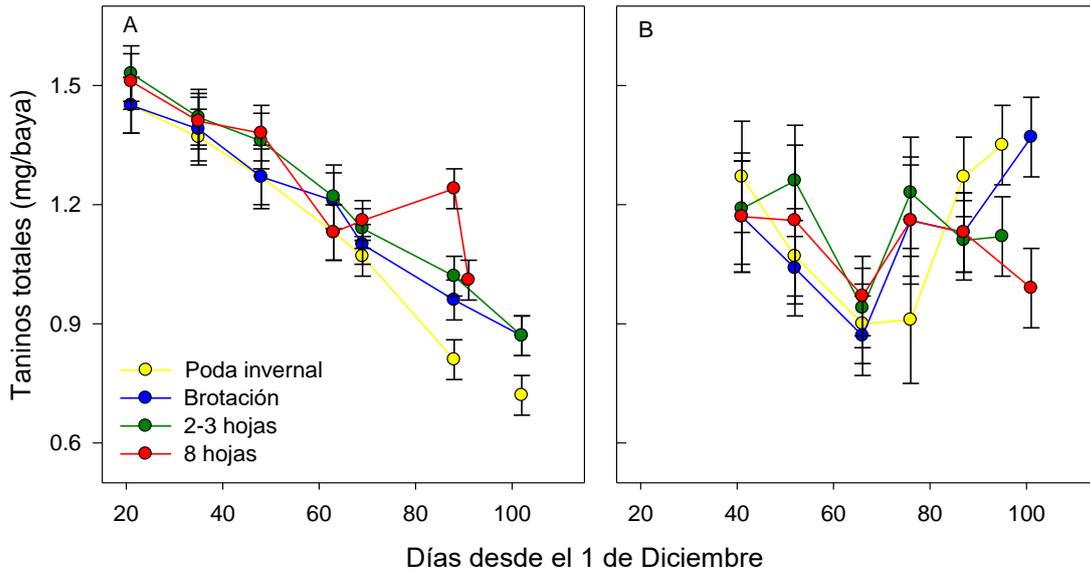


Figura S7. Evolución de la cantidad de taninos (mg/baya) en 2017-18 (A) y 2018-19 (B), registradas para las distintas fechas de poda durante la madurez de la baya. Los valores son promedios \pm error estándar de 4 repeticiones por tratamiento.

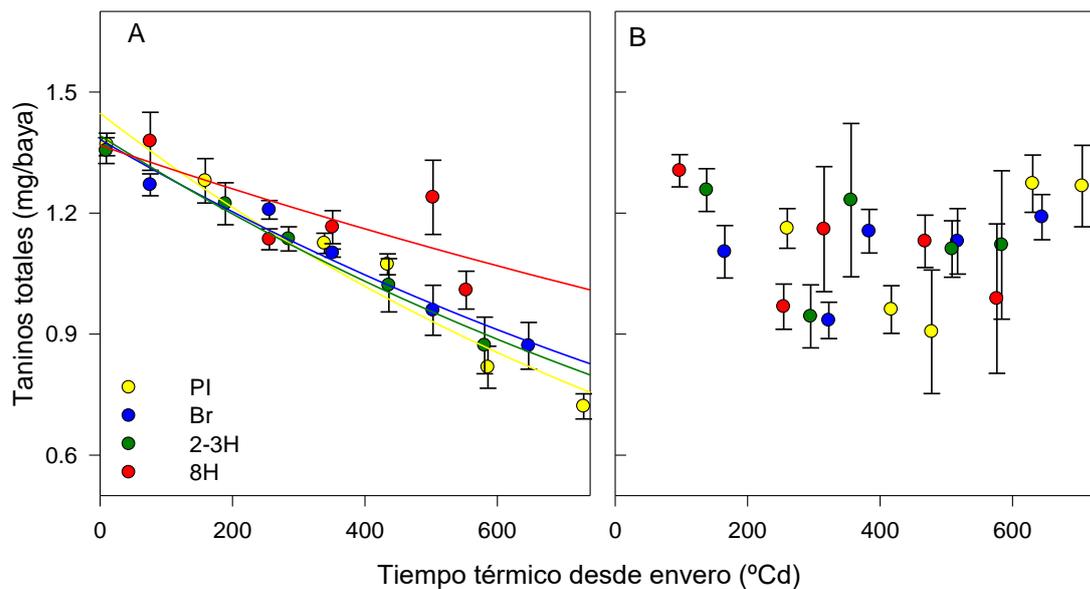


Figura S8. Evolución de la cantidad de taninos (mg/baya) en 2017-18 (A) y 2018-19 (B) registradas para las distintas fechas de poda respecto al tiempo térmico ($^{\circ}$ Cd) por cada tratamiento durante la madurez de la baya. Los valores son promedios \pm error estándar de 4 repeticiones por tratamiento. Las líneas suavizadas representan las ecuaciones ajustadas del modelo.

Tabla S3. Valores de F de comparando los ajustes de la cantidad y la concentración de los taninos totales respecto al tiempo térmico desde el envero. El análisis estadístico se realizó para comparar las fechas de poda según la evolución de los taninos de hollejo durante la madurez de la baya.

	2017-18				2018-19			
	PI	Br	2-3H	8H	PI	Br	2-3H	8H
PI		1.3 ns	0.5 ns	9.7 *		0.3 ns	0.9 ns	0.9 ns
Br			0.1 ns	4.8 *			2.1 ns	2.1 ns
2-3H				4.9 *				0.2 ns
8H								

*: Modelos distintos ($F_{muestral} > F_{tabla}$, para un p valor de 0.05)

ns: Modelos similares ($F_{muestral} < F_{tabla}$, para un p-valor de 0.05)

Antocianinas

Respecto a la cantidad de antocianinas durante la primera temporada, se observa que a partir del 1 de febrero las plantas podadas con 8 hojas presentaron un mayor valor de antocianinas y se mantuvieron en un nivel superior hasta cosecha. Las plantas podadas con 2-3 hojas presentaron un mayor valor a las podadas en invierno a partir del 5 de febrero y hasta cosecha. El tratamiento testigo presentó valores menores y a cosecha fue similar al tratamiento Br (Figura S9, A).

La evolución de antocianinas por baya en 2018-19 (Figura S9, B) fue similar a la descrita respecto a la concentración en la misma temporada. Se observó un retraso de los tratamientos de poda tardía respecto a la invernal en la acumulación de antocianinas por baya hasta el 5 de febrero, cuando los tratamientos se acoplaron. No obstante, mientras que los tratamientos de poda invernal, brotación y 2-3 hojas alcanzaron el máximo valor de antocianinas en cosecha, las plantas podadas con 8 hojas lo hicieron el 26 de febrero (15 días antes) y lo mantuvieron hasta cosecha. Finalmente y tal como puede verse en la tabla 8, durante 2018-19 la cantidad de antocianinas por baya a cosecha no presentó diferencias estadísticas.

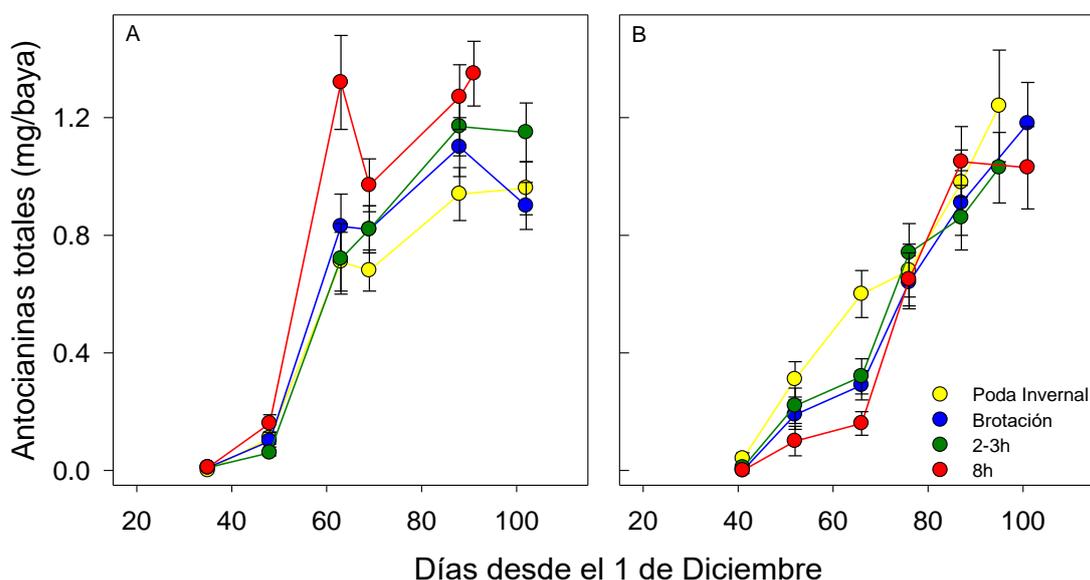


Figura S9. Evolución de la cantidad de antocianinas (mg/baya) en 2017-18 (A) y 2018-19 (B) registradas para las distintas fechas de poda durante la madurez de la baya. Los valores son promedios \pm error estándar de 4 repeticiones por tratamiento.

Al analizar la evolución de la cantidad de antocianinas por baya (figura S10, A y B), se pudo observar que, independientemente del valor máximo de antocianinas alcanzado, la acumulación de temperatura desde el envero varió entre tratamientos. Durante 2017-18 (Figura 35, C), se observó que las plantas podadas en invierno y en brotación alcanzaron similar valor máximo de antocianinas por baya (0.96/baya), aunque las segundas- acumularon 300 °Cd menos (acumulados desde el comienzo de envero) que PI. Por otra parte, las plantas podadas con 2-3 hojas alcanzaron un 16% más y las plantas podadas con 8 hojas un 47% más de antocianinas por baya que PI, acumulando para ello 171 y 95 °Cd menos que el testigo, respectivamente.

Las curvas ajustadas para el 2018-19 (Figura S10, B), indicaron que la evolución de las antocianinas por baya de la poda realizada con 8 hojas fue mayor al resto de los tratamientos, que mostraron un comportamiento similar. Durante esta temporada no se observó una estabilización hacia el final de la madurez en la cantidad de antocianinas por baya. No obstante, al estimar el tiempo térmico para llegar al máximo de antocianinas por baya en cosecha, se observó que las plantas podadas en brotación, con 2-3 hojas y con 8 hojas acumularon 54, 126 y 181 °Cd menos que el tratamiento testigo, respectivamente.

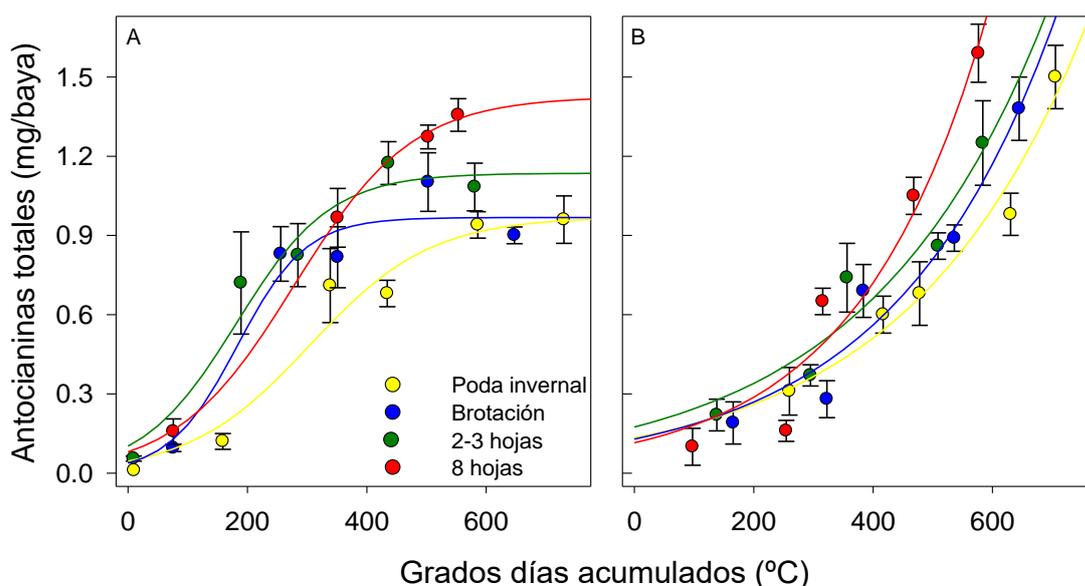


Figura S10. Evolución de la cantidadde antocianinas (mg/baya) en 2017-18 (A) y 2018-19 (B) registrada para las distintas fechas de poda respecto a los GD acumulados por cada tratamiento durante la madurez de la baya. Los valores son

promedios \pm error estándar de 4 repeticiones por tratamiento. Las líneas suavizadas representan las ecuaciones ajustadas del modelo.

Tabla S4: Valores de F de comparando los ajustes de la concentración de los antocianinas totales respecto al tiempo térmico desde el envero. El análisis estadístico se realizó para comparar las fechas de poda según la evolución de los antocianinas de hollejo durante la madurez de la baya.

	2017-18				2018-19			
	PI	Br	2-3H	8H	PI	Br	2-3H	8H
PI		3.3 *	8.1 *	18.6 *		2.3 ns	4.0 *	26.8 *
Br			1.1 ns	14.3 *			2.3 ns	16.2 *
2-3H				8.4 *				5.3 *
8H								

*: Modelos distintos ($F_{muestral} > F_{tabla}$, para un p valor de 0.05)

ns: Modelos similares ($F_{muestral} < F_{tabla}$, para un p-valor de 0.05)

La evolución de la concentración de antocianinas respecto a los sólidos solubles se muestra en la figura S11 (paneles A y B). Como puede observarse, tanto en 2017-18, como en 2018-19, la evolución de la concentración fue similar entre tratamientos respecto a la acumulación de sólidos solubles.

Con la regresión obtenida en la primera temporada (Figura S11, A), se estimó la concentración de antocianinas a los 23° Brix. Este valor fue similar entre PI, 2-3H y 8H, mientras que las bayas de Br alcanzaron una concentración 0.7 mg menor. Durante la segunda temporada, la concentración de antocianinas a los 23°Brix fue de 7.8, 7.1, 6.6 y 7.5 mg/g hollejo para los tratamientos PI, Br, 2-3H y 8H, respectivamente, aunque sin diferencia estadística entre ellos.

La evolución de la cantidad de antocianinas en función de los sólidos solubles se ajustó a una función sigmoidea el primer año y exponencial el segundo (Figura S11, paneles C y D). Respecto a la temporada 2017-18, las regresiones de las fechas de poda con 8 hojas y con 2-3 hojas fueron diferentes de la de brotación e invernada, que fueron iguales entre ellas. Al mismo tiempo, no hubo diferencias entre las últimas dos podas tardías. A los 23 °Brix, las antocianinas por baya serían de 0.97, 1.02, 1.12, 1.3 mg/baya para los tratamientos invernada, brotación, 2-3 hojas y 8 hojas, respectivamente.

Durante 2018-19, el tratamiento realizado con 8 hojas no se ajustó a una regresión logística sino que lo hizo a una exponencial. En esta temporada, la poda realizada con 8 hojas fue diferente a la poda invernada y a la de 2-3 hojas, mientras que no fue diferente a la de brotación. Con la regresión obtenida, se realizó una estimación de la cantidad de antocianinas por baya para 23 y para 25 °Brix. La poda realizada en

brotación mantuvo niveles similares a las de la poda invernal, mientras que la realizada con 2-3 hojas mantuvo en promedio un 12% menos de antocianinas para ambas concentraciones de sólidos solubles. Por otra parte, el tratamiento con 8 hojas presentó un 18% y un 35% más de antocianinas para cada concentración de sólidos solubles. Cabe destacar que la primera parte de la función logística es una exponencial, por lo que este ajuste sugiere que no se llegó al plateau de antocianinas por baya respecto a la acumulación de azúcar.

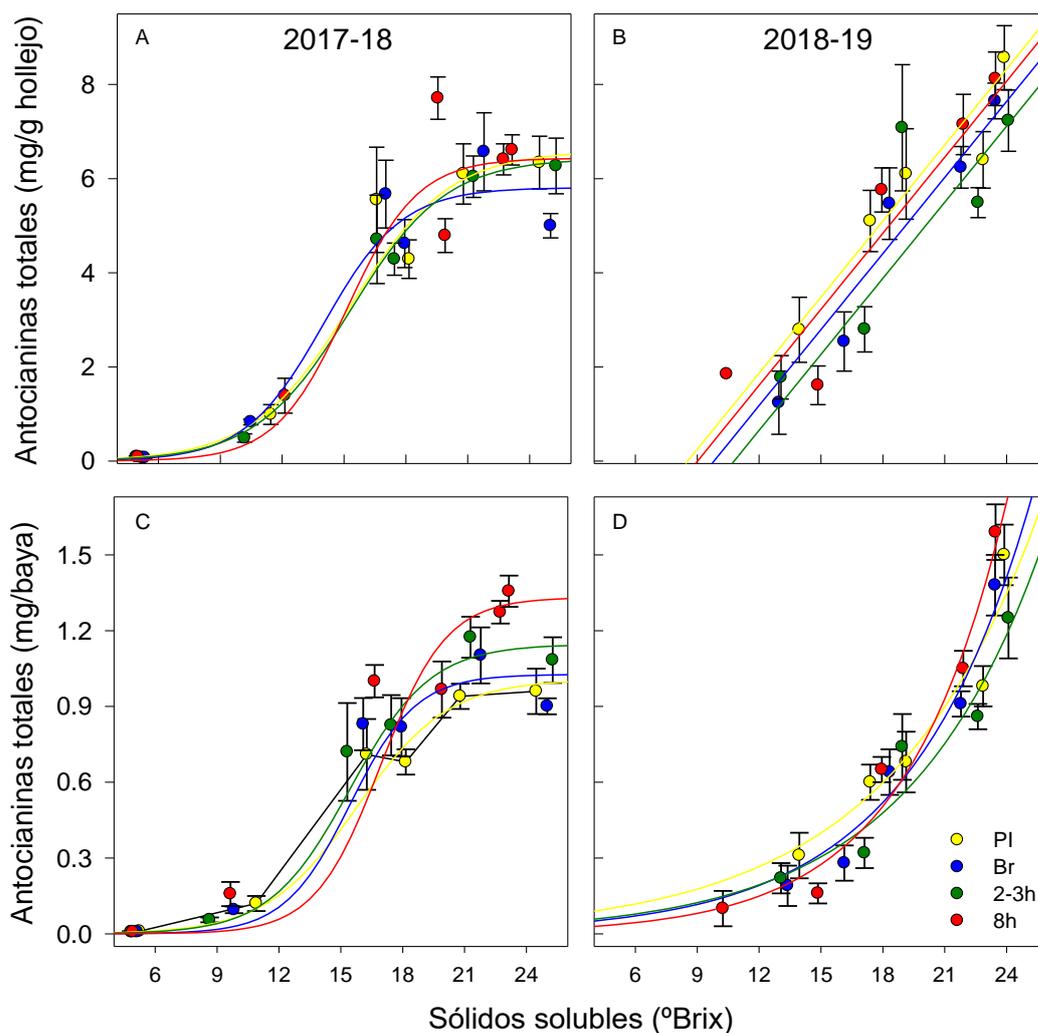


Figura S11. Evolución de la concentración de antocianinas (mg/g hollejo) y de antocianinas por baya (mg/baya) en 2017-18 (paneles A y C) y 2018-19 (paneles B y D) registradas para las distintas fechas de poda respecto a los GD acumulados por cada tratamiento durante la madurez de la baya. Los valores son promedios \pm error estándar de 4 repeticiones por tratamiento. Las líneas suavizadas representan las ecuaciones ajustadas del modelo.