



**UNCUYO**  
UNIVERSIDAD  
NACIONAL DE CUYO

FACULTAD DE CIENCIAS APLICADAS A LA INDUSTRIA

Evaluación de la metodología de discriminación isotópica  $\delta^{13}\text{C}$  como  
indicador de estado hídrico en viñedos cv. Malbec de San Rafael.

MAESTRÍA EN INGENIERÍA QUÍMICA

Nombre de la tesista:

Ing. Irene Carbajal Ramos

Director de tesis:

MSc. Cesar Gabriel Nahüel

Codirectora de tesis:

Dra. Silvia Clavijo

San Rafael, 13 de mayo de 2024

### Acta de Defensa Pública de Tesis

En la ciudad de San Rafael, Mendoza, a los nueve días del mes de agosto del año 2024, se reúne en Acto Público el jurado encargado de evaluar la defensa de tesis de la carrera de posgrado de la Maestría en Ingeniería Química titulada:

***“Evaluación de la metodología de discriminación isotópica  $\delta$  13C como indicador de estado hídrico en viñedos cv. Malbec de San Rafael.”***

Desarrollada por la Ing. Irene Carbajal Ramos cuyo Director es el Mgtr. Cesar Gabriel Nahuel y Co-Directora Dra. Silvia Clavijo. El Jurado fue designado por el Consejo Directivo de la Facultad de Ciencias Aplicadas a la Industria según Resolución N° 085/2024 CD.

*Miembros Titulares:* Dr. Daniel Castro; Mgtr. Jorge De Ondarra; Dra. Carina Lourdes Llanos.

*Miembros Suplentes:* Dr. Ing. Franco Leonardo Redondo; Dra. Ing. Paola Urfalino.

La Ing. Irene Carbajal Ramos efectúa la defensa de tesis.

A continuación, los miembros del jurado realizan preguntas, comentarios y consultas que son contestadas por la Ing. Irene Carbajal Ramos.

Seguidamente el Jurado se reúne en sesión privada para calificar la Tesis defendida.

La calificación obtenida es de:

SOBRESACIENTE CON MENCIÓN DE HONOR

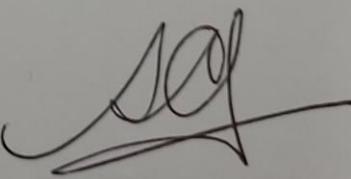
Se comunica a la Ing. Irene Carbajal Ramos la calificación obtenida.

Se cierra este Acto siendo las 12 horas del día 9 de agosto de 2024.

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Ing. Daniel Castro  
JURADO DE TESIS

  
\_\_\_\_\_  
Mgtr. Ing. Jorge de  
Ondarra  
JURADO DE TESIS

  
\_\_\_\_\_  
Dra. Ing. Carina Llanos  
JUARDO DE TESIS

  
\_\_\_\_\_  
Dra. Ing. Silvia Clavijo  
SECRETARIA DE  
POSGRADO E  
INTERNACIONALES  
FCAI UNCUYO

## **Dedicatoria y agradecimientos**

¡Qué difícil sintetizar un agradecimiento, dedicar mi trabajo, cuando es tanta la gente que permitió y colaboró para que hoy, yo, esté escribiendo esto!

Quiero dedicar este trabajo a todos los integrantes de mi familia, porque han sido y son el motor que impulsa mis sueños y metas: a mis cuatro hijos, que aprendieron la importancia del esfuerzo conjunto (mis pequeños, que pudieron comprender a tan temprana edad la quita de tiempo para ellos en pos de otras prioridades; mis hijas adolescentes, que han estado siempre dispuestas a colaborar), a MI ESPOSO JUAN, por ser mi apoyo moral, emocional e incondicional; a mis padres, que siempre están, visibles o invisibles tras de mí, cuidando mi camino. A todos ellos, mis pilares, les agradezco profundamente por acompañarme en esta trayectoria de desarrollo personal.

En lo profesional, esta maestría no hubiese sido posible sin la ayuda y el sostén de muchas personas e instituciones, a quienes quiero expresar mi más sincero agradecimiento:

En primer lugar, al Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, E.E.A. Rama Caída; que me abrió sus puertas, me brindó el espacio físico para desarrollar mi tesis, facilitó los recursos e insumos necesarios, cedió el equipo instrumental y asesoró continuamente mi labor, dándome la oportunidad de avanzar en mi carrera profesional.

A mi director de Tesis, MSc. César Gabriel Nahüel, por sus conocimientos compartidos, su esfuerzo y acompañamiento constante desde el inicio del ensayo hasta el final de esta tesis.

A mi codirectora de tesis y directora de beca SIIP, UNCuyo, Dra. Silvia Clavijo, quien me ha brindado -además de su sapiencia-, su comprensión y empatía para que este trabajo llegara a buen puerto.

A mi codirectora de beca, Dra. Silvina Cabeza, por su dedicación, su guía y su paciencia; valores que me han permitido recorrer este trayecto hasta el final, cumpliendo objetivos personales y académicos.

A mi compañero de la E.E.A. Rama Caída, Víctor Giménez, quien durante meses me acompañó y asesoró en todas las mediciones de campo, demostrando su disposición y cualidades humanas y técnicas.

A la Facultad de Ciencias Aplicadas a la Industria (UNCuyo), que mediante su programa de becas de SIIP, me brindó ayuda económica para poder finalizar mi carrera.

Al personal de IDEVEA-UTN-CONICET, Gisela, Armando y Adolfo; y a la facultad UTN Regional San Rafael, que me apoyaron con la determinación de composición isotópica de carbono.

Esta maestría no hubiese sido posible sin el acompañamiento de todos ellos para que hoy sea una realidad. El apoyo, la confianza, las horas y vivencias compartidas, los trabajos conjuntos, el soporte -económico, humano, profesional-, las palabras de ánimo en momentos de flaqueza, las correcciones y propuestas, los comentarios y sugerencias, los consejos, todo... Todo lo recibido ha contribuido a mi fortaleza para seguir, para superarme; y ha sido fundamental para tan valioso logro. Les estaré eternamente agradecida.

¡GRACIAS, GRACIAS, GRACIAS!

## RESUMEN

La viticultura en la provincia de Mendoza, Argentina; es la principal cadena agroindustrial regional, la primera actividad de exportación y una de las más importantes por su incidencia en el mercado laboral. En zonas áridas como San Rafael (Mendoza) y en un contexto de cambio climático con condiciones ambientales extremas y una baja disponibilidad de recursos naturales como es el caso del agua para riego, el manejo de sistemas productivos agrícolas está ligado a la búsqueda de soluciones a corto plazo. En la actualidad los productores enfrentan el granizo, una condición climática adversa, mediante la instalación de sistemas de protección con mallas antigranizo que modifican el entorno de las cepas y su estado hídrico. Una herramienta en desarrollo en la agricultura es el estudio del ratio isotópico de carbono ( $\delta^{13}\text{C}$ ), el cual en muestras de uva o mosto integra el estado hídrico de las cepas a lo largo del ciclo vegetativo. En este contexto, se exploró el potencial de los valores de  $\delta^{13}\text{C}$ , como indicador de estado hídrico de vides en vendimia. La tesis se estructuró sobre un muestreo de bayas de vid varietal cv. Malbec, con sistema de riego por goteo full, dos sistemas de colocación (Grembiule y Malla unida) y dos colores de mallas antigranizo (perla y negro) en una parcela ubicada en la Estación Experimental Agropecuaria (E.E.A.) de Rama Caída, San Rafael, Mendoza, Argentina; perteneciente al Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). De enero a marzo, se realizó un seguimiento del estado hídrico del cultivo, mediante la técnica de potencial hídrico foliar de preamanecer ( $\Psi_{pd}$ ) y de mediodía ( $\Psi_{md}$ ). En vendimia, se conformaron muestras de bayas para la determinación del ratio isotópico. La determinación del  $\delta^{13}\text{C}$  se realizó con un espectrómetro de masas de relaciones isotópicas. Se obtuvieron valores entre  $-26.3\text{‰}$  y  $-27.6\text{‰}$ . Estos valores hicieron referencia a una temporada de desarrollo enverocosecha 2020 sin estrés hídrico. Estos resultados son acordes al programa de riego por goteo, planteado en función del 100 % ETc; y el rango de valores de potencial hídrico foliar del varietal ( $\Psi_{pd}$ : -0.08, -0.42;  $\Psi_{md}$ : -1.19; -1.34). Además, se analizó una influencia del factor color de malla antigranizo, donde el color perla presentó las condiciones menos favorables para el estado hídrico de los viñedos, frente al color negro de cobertura; independientemente del sistema de instalación. La experiencia demostró la utilidad de la aplicación de  $\delta^{13}\text{C}$  regional, en la determinación del estado hídrico de los viñedos para evaluar un plan de riego aplicado en los viñedos con protección de mallas antigranizo.

Palabras Clave: isótopos estables, estado hídrico, malla antigranizo.

## ABSTRACT

Viticulture in the province of Mendoza, Argentina, is the primary regional agroindustrial chain, the leading export activity, and one of the most important sectors due to its impact on the labor market. In arid areas such as San Rafael (Mendoza) and in a context of climate change with extreme environmental conditions and low availability of natural resources such as irrigation water, the management of agricultural production systems is tied to the search for short-term solutions. Currently, producers are dealing with hail, an adverse climatic condition, by installing anti-hail netting systems that modify the environment of the vines and their water status. A developing tool in agriculture is the study of the carbon isotope ratio ( $\delta^{13}\text{C}$ ), which in grape or must samples integrates the water status of the vines throughout the growing season. In this context, the potential of  $\delta^{13}\text{C}$  values as an indicator of vine water status at harvest was explored. The thesis was structured around sampling berries from varietal grapevines cv. Malbec, with a full drip irrigation system, two installation systems (Grembiule and Malla unida), and two colors of anti-hail netting (pearl and black) in a plot located at the Experimental Agricultural Station (E.E.A.) of Rama Caída, San Rafael, Mendoza, Argentina, belonging to the National Institute of Agricultural Technology (INTA). From January to March, the water status of the crop was monitored using the pre-dawn leaf water potential technique ( $\Psi_{pd}$ ) and midday leaf water potential ( $\Psi_{md}$ ). At harvest, berry samples were collected for isotope ratio determination. The  $\delta^{13}\text{C}$  determination was performed with an isotope ratio mass spectrometer. Values between  $-26.3\text{‰}$  and  $-27.6\text{‰}$  were obtained. These values indicated a development season from veraison to harvest in 2020 without water stress. These results are consistent with the drip irrigation program, based on 100% ETc, and the range of leaf water potential values for the variety ( $\Psi_{pd}$ : -0.08, -0.42;  $\Psi_{md}$ : -1.19, -1.34). Additionally, the influence of the anti-hail netting color factor was analyzed, where the pearl color presented less favorable conditions for the water status of the vineyards compared to the black coverage, regardless of the installation system. The experience demonstrated the usefulness of the regional application of  $\delta^{13}\text{C}$  in determining the water status of vineyards to evaluate an irrigation plan applied to vineyards with anti-hail netting protection.

Keywords: stable isotopes, water status, anti-hail netting

## Índice

|   |    |
|---|----|
| Dedicatoria y agradecimientos .....   | 2  |
| RESUMEN .....   | 4  |
| ABSTRACT .....  | 5  |
| Índice .....  | 6  |
| Índice de Figuras.....  | 11 |
| Índice de Tablas .....  | 14 |
| Lista de los símbolos principales y acrónicos .....                               | 16 |
| Capítulo 1.....   | 17 |
| INTRODUCCIÓN .....  | 17 |
| Capítulo 2.....   | 22 |
| MARCO TEÓRICO.....  | 22 |
| 2.1- La célula vegetal.....   | 22 |
| 2.2- Circulación de agua en la planta.....  | 23 |
| 2.3- Transpiración vegetativa.....  | 25 |
| 2.4- Evapotranspiración (ET).....   | 26 |
| 2.5- Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ETc).....          | 27 |
| 2.6- Reposición de agua.....  | 28 |
| 2.7- Cálculo de lámina de agua y programación de riego .....                      | 28 |
| 2.8- Control de riego y estado hídrico del cultivo .....                          | 30 |
| 2.9- Metodologías de análisis de la planta .....                                  | 31 |
| 2.9.1- Medida del potencial hídrico y sus componentes .....                       | 31 |
| 2.9.2- Temperatura del cultivo .....  | 34 |
| 2.9.3- Porómetro .....  | 35 |
| 2.9.4- Dendrómetros .....   | 35 |
| 2.9.5- Medición del flujo de savia mediante el método de disipación de calor..... | 36 |
| 2.10- Teledetección .....   | 37 |

|   |    |
|---|----|
| 2.11- Microclima de canopia y la protección con mallas plásticas antigranizo .....                                  | 38 |
| 2.12- Efecto del microclima en la fotosíntesis, estado hídrico del cultivo y composición de bayas .....             | 42 |
| 2.13- Isótopos Estables .....   | 44 |
| 2.13.1- Ratio o composición isotópica de carbono ( $\delta^{13}\text{C}$ ) y su importancia en la agricultura. .... | 44 |
| 2.13.2- Fraccionamiento isotópico en las plantas.....   | 45 |
| 2.13.3- Variabilidad en la composición isotópica: fuentes.....  | 48 |
| 2.13.4- Espectrómetro de masas de relaciones isotópicas: funcionamiento.....  | 50 |
| Capítulo 3.....   | 52 |
| PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL .....  | 52 |
| 3.1- Localización.....  | 52 |
| 3.2- Características vitícolas.....   | 53 |
| 3.3- Variables climáticas .....   | 53 |
| 3.3.1- Programación de riego.....   | 53 |
| 3.4- Diseño experimental y modelo estadístico.....  | 54 |
| 3.4.1- Diseño del ensayo a campo .....  | 54 |
| 3.4.2- Diseño estadístico.....  | 57 |
| 3.5- Trabajo de campo y análisis estadístico.....   | 57 |
| 3.5.1- Determinaciones realizadas en campo.....   | 57 |
| : estado hídrico del viñedo .....   | 57 |
| 3.5.2- Potencial hídrico foliar preamanecer ( $\Psi_{pd}$ ).....  | 58 |
| 3.5.3- Potencial hídrico foliar de mediodía ( $\Psi_{md}$ ) .....   | 59 |
| 3.6- Determinaciones de laboratorio: Caracterización de bayas .....   | 61 |
| 3.6.1- Sólidos solubles .....   | 63 |
| 3.6.2- pH.....  | 63 |
| 3.6.3- Determinación de acidez total .....  | 63 |

|   |    |
|---|----|
| 3.7- Ratio isotópico de carbono ( $\delta^{13}\text{C}$ ).....      | 64 |
| 3.7.1- Ensayo metodológico.....                                     | 64 |
| 3.7.2- Muestreo de bayas para determinación de ratio isotópico..... | 67 |
| 3.8- Determinaciones de variables auxiliares de microclima.....     | 68 |
| 3.8.1- Temperatura y humedad relativa.....                          | 68 |
| 3.8.2- Velocidad del viento.....                                    | 69 |
| 3.9- Análisis estadístico de los datos.....                         | 69 |
| Capítulo 4.....   | 70 |
| RESULTADOS.....   | 70 |
| 4.1- Condiciones climáticas.....                                    | 70 |
| 4.1.1. Temperatura.....   | 70 |
| 4.1.2. Precipitaciones.....   | 71 |
| 4.2- Diseño y programación de riego por goteo.....                  | 72 |
| 4.2.1- Simulación en CROPWAT 8.0.....                               | 72 |
| 4.3- Variables auxiliares: caracterización de microclima.....       | 73 |
| 4.3.1- Temperatura de canopia.....                                  | 73 |
| 4.3.2- Humedad relativa.....  | 77 |
| 4.3.2.1- Humedad relativa máxima y media.....                       | 77 |
| 4.3.2.2- Humedad relativa mínima.....                               | 78 |
| 4.3.2.3- Coeficiente de correlación y probabilidad HR vs T.....     | 79 |
| 4.4- Velocidad del viento.....                                      | 80 |
| 4.5- Composición de bayas.....                                      | 81 |
| 4.5.1- Evolución de peso de bayas.....                              | 81 |
| 4.5.2- Evolución de sólidos solubles ( $^{\circ}$ Brix).....        | 82 |
| 4.5.3- Evolución de pH.....   | 83 |
| 4.5.4- Evolución de acidez total (g/L ácido tartárico).....         | 84 |
| 4.6- Potencial hídrico.....   | 84 |
| 4.6.1- Potencial hídrico de preamanecer.....                        | 84 |

|  |     |
|--|-----|
| 4.6.2- Análisis valores: mínimos y máximos .....   | 85  |
| 4.6.3- Potencial hídrico foliar de mediodía .....  | 86  |
| 4.6.5- Potencial hídrico foliar; integral de estrés hídrico de Myers ( $S\Psi$ ) y<br>área del trapecioide o método de exhaución, (A)..... | 87  |
| 4.7- Ratio o composición isotópica de carbono ( $\delta^{13}C$ ). .....  | 89  |
| 4.8- Coeficientes de correlación de Pearson.....   | 90  |
| Capítulo 5.....  | 92  |
| DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES.....  | 92  |
| 5.1- Potencial hídrico foliar .....  | 92  |
| 5.2- Isótopos.....   | 93  |
| 5.3- Potencial hídrico foliar y carbono 13.....  | 93  |
| 5.4- Protección con mallas antigranizo – Análisis de su efecto en el<br>fraccionamiento isotópico .....                                    | 95  |
| 5.5- Análisis de composición de bayas: .....   | 98  |
| 5.5.1- Peso .....  | 98  |
| 5.5.2- Evolución de sólidos solubles (° Brix).....   | 98  |
| 5.5.3- pH.....   | 99  |
| 5.5.4- Acidez titulable total .....  | 99  |
| Capítulo 6.....  | 100 |
| CONCLUSIONES.....  | 100 |
| BIBLIOGRAFÍA .....   | 102 |
| ANEXO 1: Cálculo de la ETc y Programa de riego .....   | 122 |
| 7.1- Caracterización climática.....  | 123 |
| 7.2- Cálculo de precipitación efectiva .....   | 125 |
| 7.3- Caracterización del cultivo .....   | 126 |
| 7.3.1- Ajustes de Kc por condiciones climáticas .....  | 126 |
| 7.4- Caracterización del suelo .....   | 128 |
| 7.4.1- Resumen de las principales capacidades hídricas del suelo ....  | 128 |

|   |     |
|---|-----|
| 7.4.2- Determinación de láminas estratégicas..... | 128 |
| 7.5- Requerimientos de agua para el cultivo.....  | 130 |
| 7.6- Criterios para la programación de riego..... | 132 |
| 7.6.1- Programa del riego.....                    | 132 |

## Índice de Figuras

Figura 1. Representación esquemática de una célula del parénquima de una planta. Fuente: Fundamentos de Fisiología Vegetal. (Azcón-Bieto y Talón, 2008)

Figura 2. Representación esquemática de un estoma. Fuente: Allen et al., 2006.

Figura 3. Factores que afectan la evapotranspiración con referencia a conceptos de ET. Fuente Allen et al., 2006.

Figura 4. Procedimiento de cálculo para la evapotranspiración del cultivo (ET<sub>c</sub>) en función de variables climáticas y condiciones del cultivo. E<sub>o</sub> se calcula solamente con datos climáticos, y ET<sub>c</sub> se modifica según el cultivo (sin restricciones hídricas, edáficas, nutritivas ni sanitarias) Fuente Allen et al., 2006.

Figura 5. Agua en el suelo: agua disponible, consumida y remanente. El agua no disponible es la presente en el suelo en forma higroscópica y que la planta no puede aprovechar. Fuente Schiliardi, 2021.

Figura 6. Cámara de Schölander. Detalle de válvulas de circulación, medidor de presión de gas inerte (manómetro), y ubicación de muestra vegetal en la medición. Fuente Azcon-Bieto y Talón, 2008

Figura 7 – Comparativo de plantas sometidas a estrés y su relación con la apertura y cierre estomático. ABA (ácido abscísico, tiene gran importancia en la respuesta de la planta frente al estrés) (Peter y Vider, 2017)

Figura 8. Localización de la Estación experimental Rama Caída Fuente: <https://www.argentina.gob.ar/inta/sedes>

Figura 9. A-Tratamiento 1: (Te) Testigo; B- Tratamiento 2: (NG), Malla antigranizo Negra, instalada en sistema Grempiule; C- Tratamiento 3: (PG), Malla antigranizo Perla, instalada en sistema Grempiule; D- Tratamiento 4: (NM), Malla antigranizo Negra, instalada en sistema Grempiule modificado; E- Tratamiento 5: (PM), Malla antigranizo Perla, instalada en sistema Grempiule modificado.

Figura 10. Diseño experimental: tratamientos, parcelas y bloques

Figura 11 Configuración de las 25 unidades experimentales identificadas por cada tratamiento: TE, NG, PG, NM y PM. Cada color corresponde a cada uno de los tratamientos empleados, donde los números superiores corresponden al número de fila, comenzando de derecha a izquierda.

Figura 12. Cámara Schölander para medición de potencial hídrico foliar

Figura 13. Medición potencial hídrico foliar preamanecer. Fecha 31/01/2020. Valor de lectura -0.22 MPa.

Figura 14. Medición de potencia hídrico foliar de mediodía. Procedimiento de carga de la hoja en cámara de presión, donde se evita la rotura de esta.

Figura 15. Muestreo de bayas para ensayos fisicoquímicos por parcela.

Figura 16. Pesaje de muestra de 30 bayas en vendimia. Se observa la integridad de los granos, sanos, enteros y sin sustancias extrañas.

Figura 17. Recolección de muestra de baya, en fase envero 80% determinada por control visual de racimos en campo.

Figura 18. Muestra de parcela N°25, constituida en forma aleatoria por 50 bayas. Se observan las diferencias entre bayas coloreadas y verdes.

Figura 19. Bandeja de horno deshidratador con base perforada para favorecer la circulación de aire calefaccionado.

Figura 20. Horno de circulación forzada ascendente, con capacidad para 11 bandejas.

Figura 21. Equipo de determinación de actividad acuosa, Rotronic Hygropalm.

Figura 22. a) Bayas enteras y secas b) Polvo generado después de la molienda

Figura 23. Recolección de bayas con pedicelo, previo a vendimia 2020.

Figura 24. Disposición de 50 bayas para el secado, en recipientes de base con malla antigranizo, para favorecer el proceso de deshidratado.

Figura 25. Curvas de evolución de temperaturas medias año 2020, respecto de medias históricas de registro INTA Rama Caída

Figura 26. Gráfico de barras de precipitaciones medias mensuales expresadas en mm de agua, ordenados de enero a diciembre (1-12), color celeste registro histórico y anaranjado año 2020.

Figura 27. Box-plot de temperaturas temporada 2020 para los días de determinación de potencial hídrico foliar. Se observa que la amplitud térmica es muy marcada en la región, coincidente con las características de climas desérticos.

Figura 28. Evolución de la temperatura de canopia (°C) registrada en los distintos tratamientos cv. Malbec. para el factor color. Curva roja: testigo; azul: color de malla antigranizo negra y gris: color de malla antigranizo perla.

Figura 29. Evolución de la temperatura de canopia (°C) registrada en los distintos tratamientos cv. Malbec.

Figura 30. Comportamiento de la humedad relativa (%) máxima y media diaria registrada para los distintos sistemas de colocación de la malla antigranizo en viñedos cv. Malbec, en el interior de la canopia. Color de curva amarillo: sistema Grembiule, color azul: Grembiule modificado y rojo: testigo.

Figura 31. Comportamiento de la humedad relativa (%) máxima y media diaria registrada para los distintos colores de la malla antigranizo en viñedos cv. Malbec, en el interior de la canopia. Color de curva gris: malla perla, color azul: malla negra y rojo: testigo

Figura 32. Comportamiento de la humedad relativa (%) mínima registrada para los distintos tratamientos realizados en los viñedos cv. Malbec, en el interior de la canopia, desde el 25-01-2020 (DDB 113) hasta el 10-03-2020 (DDB 160).

Figura 33. Evolución del peso de una baya (g) registrada, en los distintos tratamientos cv. Malbec, desde 23-01-2020 hasta 13-03-2020. Las barras indican error estándar.

Figura 34. Evolución del contenido de sólidos solubles en baya (°Brix) registrada, en los distintos tratamientos cv. Malbec, desde 23-01-2020 hasta 13-03-2020. Las barras indican error estándar.

Figura 35. Evolución de la dispersión del pH registrado en los distintos tratamientos cv. Malbec, desde 23-01-2020 hasta 13-03-2020.

Figura 36. Evolución del contenido de acidez total, expresada en g/L de ácido tartárico, en los distintos tratamientos cv. Malbec, desde 23-01-2020 hasta 13-03-2020. Las barras indican error estándar.

Figura. 37. Evolución de medias para potencial hídrico de preamanecer (MPa).

Figura 38. Evolución temporada 2020 para potencial hídrico foliar de mediodía por tratamiento, para la temporada envero-vendimia 2020.

Figura 39. Gráfico de puntos con desviación estándar por tratamiento.

Figura 40. Clasificación de medias por tratamiento de composición isotópica en función del factor color.

Figura 41. Resultado de interfase CROPWAT 8.0. Registros estación AERO San Rafael, base histórica vinculada a CROPWAT 8.0, con velocidad corregida a 2 metros de altura.

Figura 42. Datos de simulación CROPWAT 8.0, período septiembre – abril.

Figura 43. Interfase de CROPWAT 8.0. Requerimientos de agua para el cultivo. El valor de la lámina de agua anual calculada es de  $544.6 \text{ mm/año} = 544.6 \text{ mm/ciclo} = 5446 \text{ m}^3/\text{ha.año}$

Figura 44. Requerimientos de agua del cultivo, y evolución del Etc (mm/dec), para el ciclo anual de enero (mes 1) a diciembre (mes 12).

## Índice de Tablas

Tabla 1. Metodologías y parámetros de determinación en el estado hídrico de plantas

Tabla 2. Modelo estadístico factorial

Tabla 3. Temperaturas medias históricas período 1950-2021 y año 2020.

Tabla 4. Precipitaciones medias históricas del período 1927-2021 y año 2020.

Tabla 5. Valores de temperatura medias de clima (datos históricos - año 2020) y microclima.

Tabla 6. Resultado factorial para temperaturas máximas y medias de canopia. El factor sistema es significativo para ambas variables.

Tabla 7. Resultados de modelos lineales generales y mixtos para la temperatura máxima de canopia (color y sistema) y temperatura media (sistema).

Tabla 8. Medias ajustadas y errores estándares para Tratamiento LSD Fisher (Alfa=0,05). NM, Sistema de colocación Grebbiule modificado color negro; PM, sistema de colocación Grebbiule modificado color perla; TE, testigo; PG, sistema de colocación Grebbiule color perla y NG, sistema de colocación Grebbiule color negro.

Tabla 9. Correlación de Pearson. Coeficientes/Probabilidades. Variables: Temperatura máxima, media y mínima de canopia (Tmáx, Tmed y Tmín). Humedad Relativa máxima, media y mínima de canopia (HRmáx, HRmín, HRmed).

Tabla 10. Velocidad media en canopia (m/s). Medias ajustadas y errores estándares para cada hora. LSD Fisher (alfa=0,05). p-valor= 0,0194. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ ).

Tabla 11. Velocidad media en canopia (m/s). Medias ajustadas y errores estándares para cada hora. LSD Fisher (alfa=0,05). p-valor= 0,0004. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ ).

Tabla 12. Resultado de análisis factorial para el peso de una baya.

Tabla 13. Resultado de modelos lineales generales y mixtos para el peso de una baya, para el factor color. Medias con letras iguales no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ ).

Tabla 14. Resultado de análisis factorial aplicado a potencial hídrico foliar de preamanecer y mediodía, integral de Myers y área del trapezoide. Factores: sistema, color e interacción sistema\*color. (significativo para p-valor<0,05).

Tabla 15. Resultado del análisis de datos con modelo lineales, generales y mixtos, para potencial hídrico foliar de preamanecer.

Tabla 16. Medias ajustadas y errores estándares. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ ).

Tabla 17. Tabla de correlación de Pearson: Coeficientes/Probabilidades.

Tabla 18. Valores de velocidad del viento ajustados a la altura de canopia en función de las velocidades medias registradas por la estación meteorológica AERO San Rafael.

Tabla 19. Precipitación (mm) y Precipitación efectiva (mm) en CROPWAT 8.0

Tabla 20. Resultado de las capacidades hídricas del suelo, a partir del programa Soil Water Characteristics. Donde  $W_{ur} = W_c - (p \times (W_c - W_m))$  y  $p = 45\%$  (agua fácilmente disponible) (Cuadro 22-FAO 56)

Tabla 21. Valores de capacidad de campo ( $W_c$ ), capacidad de umbral de riego ( $W_{ur}$ ) y punto de marchitez permanente ( $W_m$ ); en función de características de composición del suelo y láminas de riego. El factor de agotamiento de  $p=0,45$ ; marca el límite para conservar el agua disponible fácilmente aprovechable por las cepas.

Tabla 22. Programa de riego con los requerimientos reales del cultivo, expresados en lámina bruta (mm). Se expresan los totales para 10 días consecutivos, con frecuencia de riego cada 2 días.

## Lista de los símbolos principales y acrónicos

Apd Área del trapecioide de mediodía  
Apd Área del trapecioide de preamanecer  
ADS Agua disponible en el suelo  
Ws Capacidad de saturación del suelo  
Wc Capacidad de campo  
Wm Capacidad de marchitez permanente  
Wur Capacidad de umbral de riego o agua fácilmente aprovechable  
Wd Agua disponible total  
Kc coeficiente del cultivo [-]  
Kc ini Coeficiente del cultivo durante la etapa inicial de crecimiento [-]  
Kc med Coeficiente del cultivo durante la etapa de mediados de temporada [-]  
Kc fin Coeficiente del cultivo al finalizar la etapa final de crecimiento [-]  
Kc max Valor máximo del coeficiente del cultivo (a continuación de una lluvia o riego) [-]  
Kc min Valor mínimo del coeficiente del cultivo (suelo seco sin cobertura del suelo) [-]  
CWSI Crop Water Stress Index ó Índice de Estrés Hídrico de los Cultivos [-]  
K Constante dieléctrica  
pea Densidad aparente del suelo  
EAP Eficiencia de aplicación [-]  
ECI Eficiencia de conducción interna [-]  
G Energía libre de Gibbs  
ET Evapotranspiración [mm día<sup>-1</sup>]  
ET<sub>o</sub> Evapotranspiración del cultivo de referencia [mm día<sup>-1</sup>]  
ETc Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar [mm día<sup>-1</sup>]  
p factor de agotamiento del agua en el suelo [-]  
HR humedad relativa [%]  
SΨmd Integral de estrés hídrico de Myers de mediodía  
SΨpd Integral de estrés hídrico de Myers de preamanecer  
dt Lámina disponible total  
drop lámina de riego óptima u objetivo  
dre lámina remanente óptima u objetivo  
n Número de moles  
τ Potencial matricial  
μ Potencial químico  
PM Potencial mátrico  
O Potencial osmótico  
Pc Presión aplicada en la cámara de presión de Schölander  
Π Presión osmótica  
Ψ potencial hídrico total.  
Ψp Potencial de presión celular  
Ψg Potencial gravitacional. Su valor puede ser positivo, negativo o cero, según la localización del plano de comparación.  
Ψo Potencial capilar, matriz o mátrico, con valores que varían entre  $\psi_m = 0$  en suelo saturado y negativos. Rango de 0 a -15 bares o atm.  
Ψm Potencial osmótico, sus valores varían entre cero y negativos.  
Ψp Potencial de presión, que considera la variación de presión externa respecto al nivel de referencia.  
PAR Radiación fotosintéticamente activa  
TDR Reflectometría en el dominio tiempo  
FDR Reflectometría en el dominio de las frecuencias  
RDC Riego Deficitario Controlado  
T<sub>máx</sub> temperatura máxima diaria del aire [°C]  
T<sub>media</sub> temperatura media diaria del aire [°C]  
T<sub>mín</sub> temperatura mínima diaria del aire [°C]  
V Volumen molar del agua [l/mol]

## Capítulo 1

### INTRODUCCIÓN

En la actualidad, ante un panorama de deterioro ambiental paulatino y creciente, la única opción válida, si se quieren preservar las riquezas naturales para generaciones venideras, consiste en comenzar a utilizar los recursos naturales de forma más austera y racional (Secretaría de Ambiente y Ordenamiento Territorial Gobierno de Mendoza, 2022). Esto lleva a nuestra sociedad, a la necesidad de desarrollar técnicas para enfrentar los problemas que surgen de los nuevos escenarios ambientales.

La provincia de Mendoza enfrenta una marcada escasez o déficit hídrico, el cual se ha sostenido durante los últimos 12 años. Además del déficit hídrico sostenido, el 89 % del agua disponible se destina a riego, en su mayoría, mediante sistemas de riego poco eficientes, lo que exige una mejora para optimizar su uso (Mateo, 2022). La crisis hídrica en Mendoza se ha evidenciado por la escasez de precipitaciones y la inexistencia de nieve acumulada en las nacientes de las cuencas de los ríos; alcanzando valores de disponibilidad de agua del 60% respecto de un año medio, respecto al registro histórico de 63 años (DGI., 2019). Por lo tanto, la gestión de este recurso deberá garantizar las actividades destinadas a la protección y el buen uso de aguas provenientes de cuencas hidrográficas, balanceando la provisión de agua para el desarrollo urbano, agropecuario, forestal, industrial y energético (Golberg *et al.*, 2011). Por ello, es de suma importancia incrementar la eficiencia de los sistemas de riego con estrategias de mejora, reduciendo tiempos, costos y las pérdidas de un recurso fundamental para la producción de alimentos (Mateo, 2022). El déficit hídrico afecta la productividad y origina diversas respuestas en los cultivos, por ejemplo: mecanismos de protección para la preservación de la turgencia y contenido de agua a nivel celular, tales como: ajustes o variaciones estomácicos, de conductancia hidráulica, de área foliar y de elasticidad de los tejidos (Vila *et al.*, 2013).

En las regiones semiáridas, como Mendoza, existen dos condicionantes importantes relacionados con la producción vegetal: la restricción impuesta por las lluvias escasas, a lo que se le suma una elevada evapotranspiración (Golberg *et al.*, 2011). En estos escenarios, los cultivos que mejor se desarrollan son aquellos que pueden convivir con algún grado de déficit hídrico. Este tipo de cultivos, entre los que se encuentra la vid, soportan grandes demandas de humedad, suelos secos, alta irradiancia y temperaturas por sobre el límite óptimo de las plantas en general, que es de 30 °C (Lovisoló *et al.*, 2002; Chaves *et al.*, 2010). Sin embargo, las limitaciones hídricas afectan directamente a los cultivos. Entre los principales parámetros

evidenciados en los viñedos como consecuencia de la escasez de agua se encuentran: bajo rendimiento, concentración de azúcares, disminución de peso de baya, alteración de concentración de ácidos y fenoles (Martínez *et al.*, 2018). En nuestra región, se presenta otro fenómeno climático condicionante de la producción vitivinícola, que es el granizo. Este fenómeno climático genera grandes pérdidas económicas en los oasis de la provincia de Mendoza (Van den Bosch, 2022). Las coberturas con malla antigranizo constituyen un método de defensa muy efectivo por lo que se ha incrementado la superficie protegida (Nahuel, 2013; Muskaan *et al.*, 2022). En los departamentos de San Rafael y General Alvear, la protección con esta técnica, está implementada en 3.109 ha que representan el 18,4% de la superficie de vid de la zona (INV, 2019). Es uno de los principales desafíos de viticultores, conocer estos parámetros, planificar y programar labores culturales en función de la disponibilidad de agua de riego (Bota *et al.*, 2015). Por ello es fundamental conocer el estado hídrico de las cepas y la influencia de los sistemas de protección mediante mallas plásticas.

En la provincia de Mendoza, la vitivinicultura es una de las principales actividades económicas (Barzola-Elizagaray y Engelman, 2020). Donde el destino mayoritario de la uva es la vinificación (elaboración de vinos principalmente y fabricación de mostos), registrando volúmenes inferiores en la producción de pasas y el destino a consumo en fresco (Hernández, 2021). El varietal emblemático y de gran interés productivo es el cv. Malbec. Este permite lograr excelentes vinos que son apreciados y reconocidos por los consumidores a nivel nacional e internacional. Hay una tendencia creciente en las ventas de este varietal hacia el mercado externo, con un incremento del 51,8% en los últimos 10 años. Así mismo, el volumen comercializado en el mercado local creció un 103% en el mismo período. El 95,4% del total exportado de variedades de Malbec corresponde a varietal puro y 4,6% a cortes con otras variedades. La provincia de Mendoza tiene la mayor cantidad de Malbec del país, alcanzando en 2021 las 39.248 ha, que representa el 84,6% de la superficie cultivada (INV, 2022). Argentina, y Mendoza como principal productora, se inserta en el mercado mundial como nueva zona de producción vitivinícola de prestigio internacional (Mathey y Van den Bosch, 2021). En el año 2021, se censaron 39248 ha cultivadas con Malbec, el varietal emblemático de la provincia de Mendoza, que representa el 84,6% de la producción total en el país. Asimismo, las ventas de vinos Malbec representa el 54,5% del total de las ventas de vinos varietales. Si a ese volumen se suman los vinos Malbec con cortes de otras variedades, esa participación llega al 57,9%. (INV, 2022). La calidad de un vino está determinada en parte por la calidad de la uva vinificada. Esto es válido no sólo para el azúcar, la acidez y el pH; sino que también se consideran para los polifenoles,

compuestos determinantes de color y astringencia en tintos y también para los aromas, igualmente importantes en blancos y tintos (Vila *et al.*, 2009). Estas variables se definen por la relación clima-suelo-agua que influyen en el crecimiento de la vid, composición de la fruta y la calidad del vino (Urvieta *et al.*; 2021).

El manejo de sistemas productivos en un contexto de cambio climático, las condiciones ambientales extremas y una baja disponibilidad de recursos naturales, como es el caso del agua para riego, están ligadas a la búsqueda de soluciones a corto plazo (van Leeuwen, 2019). La segunda labor cultural aplicada a fin de remediar los efectos negativos del clima, es el mayor aporte de agua a las plantas (39%), donde las variables de diseño son tipos y frecuencias de irrigación (Aruani y Quini, 2020). En la viticultura regadía de zonas áridas, las estrategias de riego deficitario controlado (RDC) pretenden un ahorro de recursos hídricos además de modificar la calidad del vino asociado a cambios en la composición de la baya (van Leeuwen, 2009; Gutiérrez Ulloa, 2023). Es por ello necesario, disponer de herramientas de análisis y control de variables de riego. Debido a que el déficit hídrico afecta la productividad y origina diversas respuestas en los cultivos, como mecanismos de protección para la preservación de la turgencia y contenido de agua a nivel celular, tales como: ajustes o variaciones estomáticos, de conductancia hidráulica, de área foliar y de elasticidad de los tejidos (Vila *et al.*, 2013). En este contexto, la gestión del riego debe basarse en mediciones objetivas del estado hídrico de las cepas, siendo estos valores los que permitan a los productores tomar decisiones rápidas y efectivas sobre cuándo y cuánto regar (Naor, 2006). Ante el cambio climático, por lo tanto, existe la necesidad de desarrollar marcadores de fácil implementación, que permitan determinar la deficiencia de agua en las plantas, para optimizar la gestión hídrica y reducir los efectos adversos en el rendimiento de los cultivos. Una técnica aplicada, es el uso de la cámara de presión de Schölander, la cual proporciona una estimación relativamente rápida, flexible y precisa del estado del agua en la planta a través de la medición del potencial hídrico foliar ( $\Psi$ ). Otra forma a emplear, para determinar el estado hídrico de las plantas, consiste en determinar la composición del isótopo de carbono ( $\delta^{13}\text{C}$ ) presente en los tejidos vegetales (Spangenberg *et al.*, 2020).

Por lo tanto, el presente estudio tiene el objeto de explorar herramientas analíticas que faciliten la determinación del estado hídrico de los viñedos Malbec por su importancia económica-productiva en la provincia. Donde se propone evaluar el potencial de la composición de isótopos estables como instrumento de medición del estado hídrico de las cepas, comparando esta metodología de trabajo con el potencial hídrico foliar de preamanecer y mediodía determinado a través de la técnica Schölander.

Se plantea trabajar en el primer nivel de estado hídrico de los viñedos, que corresponde a plantas desarrolladas sin estrés hídrico o leve, que marca la base para diseños de riegos deficitarios.

#### Formulación y fundamentación del problema a investigar

Se ha identificado la necesidad de diversificar técnicas directas de control del estado hídrico en cultivos vitivinícolas, con el fin de optimizar el manejo eficiente del agua de riego, y así mejorar la calidad de los procesos de vitivinícolas.

El presente estudio se enmarca en dos técnicas: el potencial hídrico foliar y la composición isotópica de carbono. La primera, aunque es una de los procedimientos vigentes de mayor precisión, tiene desventajas, tales como: ser una medición de interpretación indirecta que no permite la automatización del riego (García Petillo, 2008); requiere de operarios entrenados para evitar errores de lectura; el equipamiento es pesado y difícil para trasladar; requiere de gas comprimido para su funcionamiento (por lo general  $N_2$ ), el cual debe ser constantemente controlado para evitar filtraciones y accidentes; es una determinación destructiva y lenta (Vila *et al.*, 2010), donde implica excesivo consumo de tiempo y mano de obra (Baena *et al.*, 2016). Respecto a la segunda técnica propuesta, en nuestro país, actualmente no se ha investigado en profundidad la medición de la discriminación isotópica de  $\delta^{13}C$  aplicada a la vitivinicultura de precisión en la determinación del estado hídrico de las cepas. Conocerlo, permite optimizar el riego en tiempos de sequía, definir características de cosecha y evaluar materia prima de vinificación.

El desarrollo de nuevas técnicas de medición directa, superadoras o complementarias, es fundamental para mejorar producciones vitivinícolas de precisión y la productividad de los viñedos. Esto sería muy beneficioso para nuestra región, debido a las prolongadas y habituales sequías, permitiendo un uso eficiente y racional del recurso hídrico disponible a partir de planes de riego acordes a las necesidades objetivas de los cultivos.

Asimismo, es importante analizar el impacto que produce el sistema de protección con malla plástica (sistema de colocación y color de malla), sobre el estado hídrico de las cepas, dada la relevancia a nivel provincial de esta técnica de mitigación los daños producidos por la inclemencia climática: granizo.

Por lo anteriormente expuesto, el presente trabajo tiene como objetivo general monitorear el estado hídrico en viñedos durante el período envero-cosecha, a través de la metodología de composición isotópica  $\delta^{13}C$  y potencial hídrico foliar.

Para lograr este objetivo se plantearon los siguientes objetivos específicos:

1) Medir el potencial hídrico foliar de la variedad cv. Malbec según el estado fenológico, desde el envero hasta la maduración de las bayas.

2) Optimizar un procedimiento analítico para relacionar el potencial hídrico foliar con la medición de discriminación isotópica de carbono en bayas de vid.

3) Calcular valores máximos, mínimos, promedio e integral del potencial hídrico foliar de preamanecer y mediodía, e interpretar sus resultados en función de la temporada.

4) Verificar la equivalencia entre los indicadores de discriminación isotópica y potencial hídrico foliar, en la determinación del estado hídrico de las cepas.

5) Analizar la influencia de los tratamientos de cobertura y su relación con el estado hídrico.

Las hipótesis por corroborar se presentan a continuación:

- Es posible determinar el estado hídrico de las cepas, mediante el uso de las relaciones isotópicas de carbono,  $\delta^{13}\text{C}$ .

- El potencial hídrico foliar de preamanecer y mediodía, permitirá referenciar los resultados de las composiciones isotópicas de carbono, para establecer el nivel de estrés hídrico de los viñedos.

- El estudio de nuevas técnicas de aplicación de isótopos estables, podrán ser fácilmente aplicados en actividades vitícolas de campo.

## Capítulo 2

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1- *La célula vegetal*

La unidad funcional básica de las plantas es la célula. Presenta una pared celular que rodea el protoplasto, delimitado externamente por la membrana plasmática o plasmalema. El material vivo en el interior del protoplasto recibe el nombre de protoplasma. El protoplasma no posee una estructura homogénea, ya que incluye al citoplasma y a diversos orgánulos inmersos en el propio citoplasma, los cuales están delimitados por membranas (sencillas o dobles) y cumplen funciones específicas. A su vez, el citoplasma contiene en suspensión distintas estructuras no rodeadas de membrana, como ribosomas, microtúbulos e inclusiones. La fase acuosa del citoplasma recibe el nombre de citosol (Figura 1). La membrana plasmática establece una división en compartimientos: por una parte, el protoplasma, tradicionalmente identificado con el interior de las células; por otra, el espacio externo o espacio extracelular, que debe describirse como un compartimiento más de las células, con la peculiaridad de que se prolonga en el de las células adyacentes, recibiendo el nombre de apoplasto (Azcón-Bieto y Talón, 2008).

La pared celular les permite acumular solutos en su protoplasto en concentraciones mayores de las que existen en el medio externo, apoplasto. En estas condiciones, el agua tenderá a entrar en el protoplasto por ósmosis, provocando un aumento de volumen por la elasticidad de la membrana plasmática.

El aumento de volumen está limitado por la pared celular, la cual, debido a su resistencia mecánica, ejerce una presión sobre el protoplasto que equilibra los potenciales hídricos entre la célula y el medio externo. También cumple la función de limitar el volumen del protoplasto, permiten el crecimiento de las células y condicionan la dirección en que lo hacen. El simplasto es el espacio constituido por el citoplasma de las distintas células que presentan continuidad a través de los plasmodesmos, mientras que el apoplasto es el espacio externo a la membrana plasmática donde se encuentra la pared celular (Azcón-Bieto y Talón, 2008).

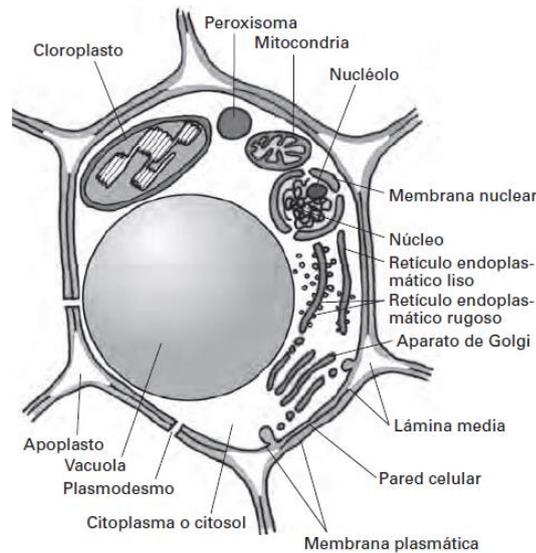


Figura 1. Representación esquemática de una célula del parénquima de una planta. Fuente: Fundamentos de Fisiología Vegetal. (Azcón-Bieto y Talón, 2008)

## 2.2- Circulación de agua en la planta

La capacidad de las moléculas de agua para moverse en un sistema particular se define como potencial hídrico ( $\Psi$ ), que es una medida de la energía libre del agua en el sistema.

La magnitud que rige los movimientos del agua, y que de manera más habitual se ha venido utilizando para expresar el estado hídrico de la planta, es el potencial químico,  $\mu$  (2.1), es decir, la variación de la energía libre (energía libre de Gibbs) del agua en un punto, debido a una variación,  $\delta n$ , de moles de agua que entran o salen de este punto, siendo constantes los otros parámetros (temperatura, presión, etc.). De donde:

$$\mu = \frac{\delta G}{\delta n} \quad (2.1)$$

El agua circula entre dos puntos siempre que el potencial termodinámico entre dichos puntos no sea idéntico, y una sustancia fluye espontáneamente de mayor a menor potencial químico. El potencial hídrico,  $\Psi$ , deriva de esta magnitud. Constituye la resultante de fuerzas de orígenes diversos (osmótica, capilar, de imbibición, turgente, etc.) que liga el agua al suelo o a los diferentes tejidos del vegetal.

Desde el punto de vista energético, el potencial hídrico corresponde al trabajo que habría que suministrar a una unidad de masa de agua ligada al suelo, o a los tejidos de una planta, para llevarla de este estado de unión a un estado de referencia, correspondiente al del agua pura (a menudo denominada libre, por oposición a ligada) a la misma temperatura y a la presión atmosférica. Como para este potencial de

referencia se adopta el valor cero, todos los  $\Psi$  que caracterizan al agua ligada son negativos, puesto que sería necesario suministrar un trabajo para llevar este agua a un  $\Psi=0$ .

La relación entre  $\Psi$  y  $\mu$  se describe,

$$\Psi = \frac{\mu - \mu^{\circ}}{V} \quad (2.2)$$

Siendo:

$\Psi$ , potencial hídrico de la muestra, se expresa en el SI en Pa

$\mu$ , potencial químico del agua en la muestra

$\mu^{\circ}$ , potencial químico de referencia del agua

$V$ , volumen molar del agua.

En un sistema particular, el potencial hídrico total es la suma algebraica de varios componentes:

$$\Psi = \Psi_p + \Psi_s + \Psi_m + \Psi_g \quad (2.3)$$

Donde,  $\Psi_s + \Psi_m + \Psi_g$ , son componentes debidos a fuerzas de presión osmótica, mátrica y gravitacional, respectivamente.

El componente  $\Psi_p$ , representa la diferencia en presión hidrostática con la referencia, y puede ser positivo o negativo. Cuando el agua entra en la célula, el volumen vacuolar aumenta y se ejerce una presión sobre las paredes celulares denominada presión de turgencia. Al mismo tiempo, se desarrolla en dirección opuesta una presión igual a la presión de turgencia, es decir, desde las paredes al interior celular. Esta última presión, denominada presión de pared, actúa como una presión hidrostática, aumenta el estado energético del agua en la célula y representa el potencial de presión celular ( $\Psi_p$ ). Naturalmente, adquiere valores positivos siempre que la vacuola ejerza una presión sobre las paredes circundantes. A medida que el agua de la célula se pierde, la vacuola se contrae progresivamente, con una caída concomitante en la turgencia celular y  $\Psi_p$ . Se hace cero en una etapa denominada plasmólisis incipiente, en la cual la vacuola cesa de presionar sobre las paredes. Ocasionalmente se ha informado de la existencia de valores negativos de  $\Psi_p$ , como un efecto ventosa sobre el interior de las paredes a consecuencia de la contracción vacuolar.

El componente osmótico,  $\Psi_s$ , consecuencia de los solutos disueltos, disminuye la energía libre del agua y es siempre negativo. Está determinado por la concentración de sustancias osmóticamente activas en la vacuola y es idéntico a la presión osmótica del jugo vacuolar.

El  $\Psi_m$ , es consecuencia de fuerzas en las superficies de los sólidos. Surge como consecuencia de las fuerzas que retienen moléculas de agua por capilaridad, adsorción e hidratación, principalmente en la pared celular y el citoplasma (matriz). La distinción entre  $\Psi_s$ , y  $\Psi_m$  es hasta cierto punto arbitraria, porque suele ser difícil decidir si las partículas son solutos o sólidos, de manera que, muy a menudo, se suele incluir  $\Psi_m$  en  $\Psi_s$ .

El  $\Psi_g$ , es consecuencia de diferencias en energía potencial debidas a la diferencia de altura con el nivel de referencia, siendo positivo si es superior al de referencia, y negativo cuando es inferior. Por lo general es ignorado en sistemas vegetales (Azcón-Bieto y Talón, 2008).

### 2.3- Transpiración vegetativa

La transpiración consiste en la vaporización del agua líquida contenida en los tejidos de la planta y su posterior remoción hacia la atmósfera. Los cultivos pierden agua predominantemente a través de los estomas. Estos pequeños órganos, son aberturas en la hoja de la planta a través de las cuales atraviesan los gases y el vapor de agua de la planta hacia la atmósfera (Figura 2). El agua, junto con algunos nutrientes, es absorbida por las raíces y transportada a través de la planta. La vaporización ocurre dentro de la hoja, en los espacios intercelulares, y el intercambio del vapor con la atmósfera es controlado por la abertura estomática. Casi toda el agua absorbida del suelo se pierde por transpiración y solamente una pequeña fracción se convierte en parte de los tejidos vegetales (Allen *et al.*, 2006).

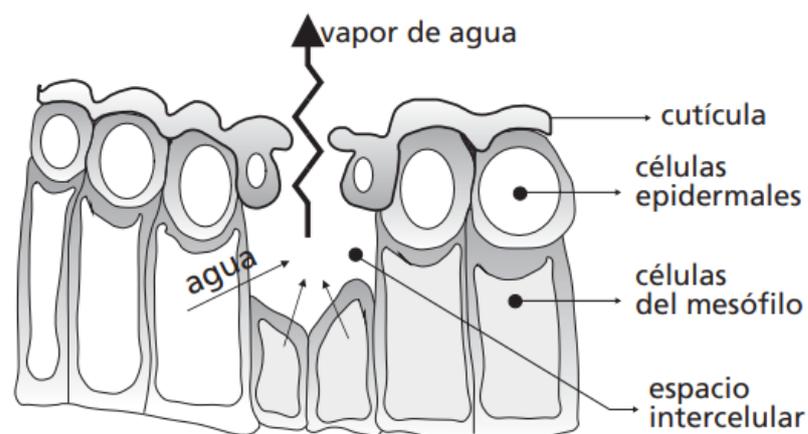


Figura 2. Representación esquemática de un estoma. Fuente: Allen *et al.*, 2006.

La transpiración, igual que la evaporación directa, depende del aporte de energía, del gradiente de presión del vapor y de la velocidad del viento. Por lo tanto, la radiación, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y el viento también deben ser

considerados en su determinación. El contenido de agua del suelo y la capacidad del suelo de conducir el agua a las raíces también determinan la tasa de transpiración, así como la salinidad del suelo y del agua de riego. La tasa de transpiración también es influenciada por las características del cultivo, el medio donde se produce y las prácticas de cultivo. Diversas clases de plantas pueden tener diversas tasas de transpiración. Por otra parte, no solamente el tipo de cultivo, sino también su estado de desarrollo, el medio donde se produce y su manejo, deben ser considerados al evaluar la transpiración (Allen et al., 2006).

#### 2.4- Evapotranspiración (ET)

La evaporación es un fenómeno que ocurre en el suelo y la transpiración en el cultivo. Ambos ocurren simultáneamente y no hay una manera sencilla de distinguir entre estos dos procesos. Su determinación es fundamental para conocer el balance hídrico en la agricultura y diseñar un sistema de riego.

La evaporación de un suelo cultivado es determinada principalmente por la fracción de radiación solar que llega a la superficie del suelo. Esta fracción disminuye a lo largo del ciclo del cultivo a medida que el dosel del cultivo proyecta más y más sombra sobre el suelo. En las primeras etapas del cultivo, el agua se pierde principalmente por evaporación directa del suelo, pero con el desarrollo del cultivo y finalmente cuando este cubre totalmente el suelo, la transpiración se convierte en el proceso principal. En el momento de la siembra, casi el 100% de la ET ocurre en forma de evaporación, mientras que cuando la cobertura vegetal es completa, más del 90% de la ET ocurre como transpiración. El clima, las características del cultivo, el manejo y el medio de desarrollo son factores que afectan la evaporación y la transpiración. Los conceptos relacionados a la ET y presentados en la Figura 3 se describen en la sección sobre conceptos de evapotranspiración (Allen et al., 2006).

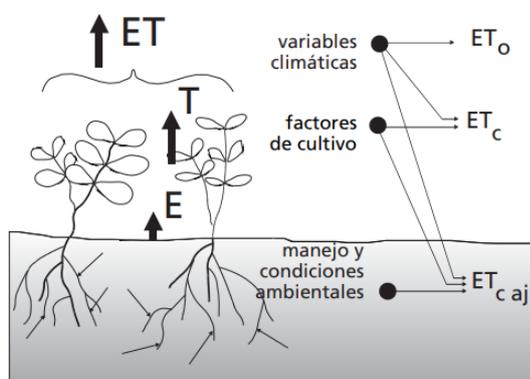


Figura 3. Factores que afectan la evapotranspiración con referencia a conceptos de ET.

Fuente Allen et al., 2006.

## 2.5- Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET<sub>c</sub>)

La evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar se denomina ET<sub>c</sub>, y se refiere a la evapotranspiración de cualquier cultivo cuando se encuentra exento de enfermedades, con buena fertilización y que se desarrolla en parcelas amplias, bajo óptimas condiciones de suelo y agua, y que alcanza la máxima producción de acuerdo a las condiciones climáticas reinantes (Figura 4). Los métodos de determinación de la evapotranspiración son: medición directa de la evapotranspiración, método de balance de energía, balance de agua en el suelo, lisímetro, tanques de evaporación y ecuaciones basadas en datos meteorológicos (Gavilán, 2019). El método FAO Penman-Monteith se recomienda actualmente como el método estándar para la definición y el cálculo de la evapotranspiración de referencia, ET<sub>o</sub>. La ET del cultivo bajo condiciones estándar se determina utilizando los coeficientes de cultivo (K<sub>c</sub>) que relacionan la ET<sub>c</sub> con la ET<sub>o</sub>. La ET de superficies cultivadas bajo condiciones no estándar se ajusta mediante un coeficiente de estrés hídrico (K<sub>s</sub>) o modificando el coeficiente de cultivo. Para determinar las necesidades hídricas de los cultivos y programar calendarios de riego, es necesario calcular la ET<sub>c</sub> (Ecuación 4.1) (Allen *et al.*, 2006).

Los factores que afectan la ET<sub>c</sub> son: el clima (ET<sub>o</sub> método indirecto: localización, temperatura-humedad del aire, radiación solar y velocidad del viento), cultivo (tipo y etapa de crecimiento estacional del cultivo, tamaño de canopia y espaciamiento entre hileras, estado hídrico de la planta, balances de energía) y evaporación del suelo (Allen *et al.*, 2006). En la Figura 4 se esquematiza el procedimiento.

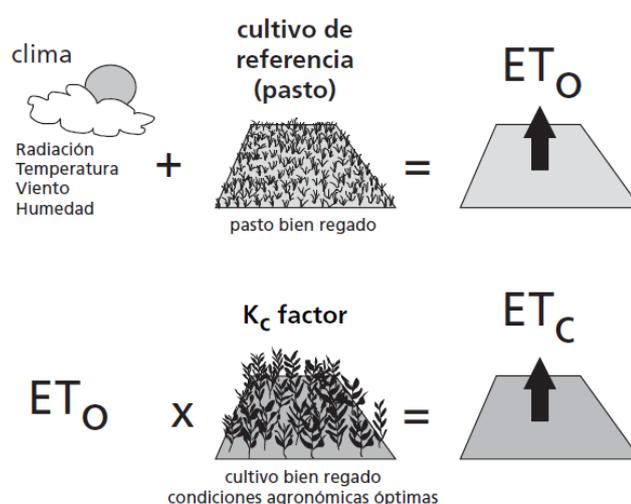


Figura 4. Procedimiento de cálculo para la evapotranspiración del cultivo (ET<sub>c</sub>) en función de variables climáticas y condiciones del cultivo. E<sub>to</sub> se calcula solamente con datos climáticos, y ET<sub>c</sub> se modifica según el cultivo (sin restricciones hídricas, edáficas, nutritivas ni sanitarias) Fuente Allen *et al.*, 2006.

## 2.6- Reposición de agua.

Una vez definida la Etc, es necesario definir la necesidad de agua de las plantas. La técnica del riego tiene por finalidad mantener el suelo en un nivel hídrico que le permita al cultivo prosperar exitosamente y rendir una más alta producción económica, particularmente en aquellas regiones donde la precipitación anual es menor a 500 – 600 mm/año. Caso contrario suele utilizarse la técnica del riego especialmente en aquellos cultivos de mayor rendimiento económico, pero en este caso son “riegos complementarios”. La necesidad de agua es la cantidad total de agua que un cultivo necesita para cumplir su ciclo y rendir los beneficios esperados. La misma, se provee artificialmente al cultivo para que cumpla su período vegetativo y produzca una cosecha económica, es decir la cantidad de agua que será necesario añadir mediante el riego para que sumada a la que llega a la planta en forma natural por medio de la lluvia, nieve, rocío, freática, etc. alcance para satisfacer la necesidad de agua (Luque, 2011). La estimación de cantidad lámina de agua a aplicar y fecha determinada de aplicación, conforma el programa de riego. La programación del riego debe ser reactiva, precisa y anticipada para optimizar la rotación y duración del riego en todas las parcelas de un gran viñedo (Rienth *et al.*, 2023). Las mediciones que apoyan el proceso de toma de decisiones de riego debiesen proveer información en tiempo real, casi continua (intervalos de menos de un día) y espacialmente representativa del estado hídrico de la vid.

## 2.7- Cálculo de lámina de agua y programación de riego

Para diseñar un plan de riego, es necesario conocer el balance hídrico del cultivo. El agua disponible en el suelo (ADS) es el equilibrio entre las entradas y salidas del agua. Son fuentes de aporte: el riego, la lluvia, y ascenso capilar (cuando la napa freática está a más de 1 metro debajo de la raíz). Y las pérdidas se generan por transpiración, evaporación, percolación y la escorrentía (considerada 0 en riego por goteo). El agua disponible total en el suelo está conformada por tres tipos de agua de acuerdo a la ubicación en el mismo puede ser gravitacional, capilar o higroscópica. El agua higroscópica es una capa delgada de agua, en forma de vapor, adhiere fuertemente a las partículas del suelo por fuerzas superficiales. El agua higroscópica no está disponible para las plantas. El agua capilar es el agua que se mantiene dentro de los poros del suelo contra la gravedad; y el agua gravitacional es la que ocupa los macroporos del suelo, saturándolos o no. Esta fracción de agua no está retenida en el suelo y se mueve impulsada por la fuerza de la gravedad hacia capas más profundas (Pachés Giner,

2019). El cálculo de la lámina de riego (LR) se basa en las condiciones climáticas y fenológicas del cultivo. Para el cálculo de la lámina de riego que reponga el 100 % del agua perdida por evapotranspiración, es necesario considerar las siguientes variables:

- a. Capacidad de Saturación ( $W_s$ ): cantidad máxima de agua que puede contener un suelo cuando todos los poros están llenos de agua)
- b. Capacidad de Campo ( $W_c$ ): cantidad de agua que un suelo bien drenado puede retener contra las fuerzas de gravedad.
- c. Capacidad de Marchitez Permanente ( $W_m$ ): cantidad de agua retenida en el suelo que las plantas ya no pueden extraer (se marchitan permanentemente).
- d. Capacidad de Umbral de riego ( $W_{ur}$ ): contenido hídrico de los suelos por debajo del cual disminuyen los rendimientos de los cultivos
- e. Agua Disponible Total ( $W_d = ADT$ ). Que se define como la diferencia entre la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente.
- f.  $p$ = fracción de  $W_d$  que puede ser agotada por el cultivo antes de presentar estrés hídrico. En vid el valor se establece en 0,45.
- g. Agua fácilmente aprovechable o umbral de riego ( $W_{ur} = AFA$ ). Es el producto de afectar al agua disponible total por  $p$ .
- h.  $PM$ = potencial mátrico (fuerzas mátricas, causada por la adhesión o atracción del agua por los sólidos del suelo)
- i.  $O$ = potencial osmótico (debido al efecto de los solutos en la fase líquida del suelo)

Para compensar las salidas de agua o pérdidas por evapotranspiración, realizamos el aporte de riego. En la Figura 5, se puede observar el balance hídrico en función de las variables anteriormente descritas. El momento preciso es cuando se agota el agua fácilmente aprovechable  $W_{ur}=AFA$ .

El procedimiento requiere la determinación del  $E_{To}$ ,  $K_c$  para calcular el  $E_{Tc}$ , ecuación (4.1).

Una vez que se calculan las necesidades netas de riego en función del balance hídrico, se determina la necesidad bruta de agua. Esta etapa considera la fuente de agua (calidad) y el método de riego (eficiencia). En riego por goteo los rendimientos son altos, lo que lleva a optimizar la cantidad de agua aportada. Se calcula la lámina de riego disponible total ( $dt$ ), que es la relación del volumen de agua aportada por metro cuadrado de superficie. Se expresa en mm, donde 1 mm de lámina de riego es el aporte de 1 litro de agua por metro cuadrado ( $1 \text{ mm} = 1 \text{ L/m}^2$ ). En función con las capacidades del suelo, se definen:

- a. Lámina de riego disponible total ( $dt$ ): La cantidad de agua necesaria para llevar al suelo desde su punto de marchitez permanente ( $W_m$ ) a su capacidad de campo ( $W_c$ ).
- b. Lámina de riego óptima ( $drop$ ): La cantidad de agua necesaria para llevar al suelo desde su punto de su capacidad de umbral de riego o agua fácilmente aprovechable ( $W_{ur}$ ) a su capacidad de campo ( $W_c$ ).
- c. Lámina de riego remanente óptima u objetivo ( $dre$ ): La cantidad de agua necesaria para llevar al suelo desde su punto de marchitez permanente ( $W_m$ ) a su capacidad de agua fácilmente aprovechable o umbral de riego ( $W_{ur}$ ) (Schilardi, 2021).

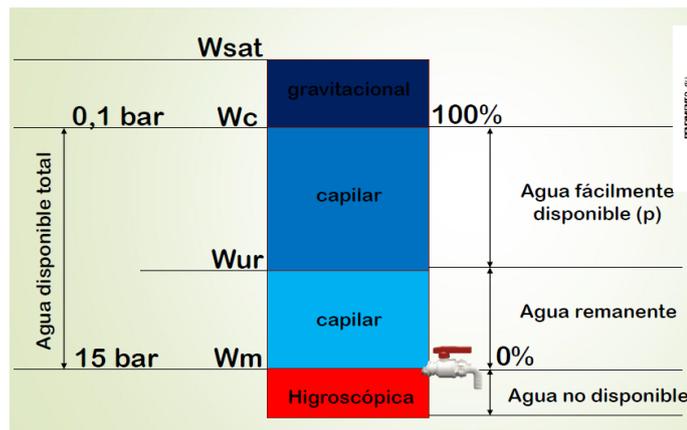


Figura 5. Agua en el suelo: agua disponible, consumida y remanente. El agua no disponible es la presente en el suelo en forma higroscópica y que la planta no puede aprovechar. Fuente Schiliardi, 2021.

Por último, se define un plan de riego, el cual consta de la cantidad de agua a aportar al cultivo, y el momento óptimo para realizarlo. Para programas que no tengan el objetivo de un riego deficitario, se prioriza que el contenido de humedad del suelo no esté por debajo de cierto umbral. Dado que el agua del suelo no podrá ser transportada hacia las raíces con la velocidad suficiente para satisfacer la demanda transpiratoria y el cultivo comienza a sufrir estrés (Ministerio de Agroindustria, 2017).

Una herramienta actual para la estimación de todas las variables de riego es el simulador CROPWAT 8.0. Es un programa informático de uso libre creado por la FAO para el cálculo de las necesidades hídricas de los cultivos. En este simulador se calcula el requerimiento de agua del cultivo expresado en lámina de agua neta. Para establecer un sistema de riego, el programa calcula la necesidad bruta de agua, expresada en lámina bruta (mm), en función de la eficiencia de aplicación (EAP) y eficiencia de conducción interna (ECI), donde la eficiencia es el producto entre EAP y ECI. Para sistemas de riego por goteo el rango para EAP es de 0,80 a 0,90; y ECI entre 0,65 y 0,95. Calcula los turnos, caudales y tiempos de riego con base en las necesidades de agua del cultivo, determinadas por el tipo de suelo, clima y cultivo (Schilardi, 2021).

### 2.8- Control de riego y estado hídrico del cultivo

El manejo de riego se complementa con el seguimiento de humedad en suelo y cultivo. Para ello es necesario disponer de sensores que controlen atmósfera, suelo y/o planta. En el primer grupo, se estudian medidas del contenido de agua (método gravimétrico, reflectometría en el dominio del tiempo (TDR), reflectometría en el dominio de las frecuencias (FDR), atenuación de rayos gamma (García Petillo, 2008), sensores granulares de la matriz y bloques de yeso (Enciso *et al.*, 2018); y medidas del potencial del agua (Tensiómetros, psicrómetros de suelo, bloques de resistencia eléctrica, sensores de matriz granular y determinaciones subjetivas). Las mediciones en las

plantas, se estudia mediante: medidas del contenido de agua (contenido relativo de agua); medidas del potencial hídrico (potencial hídrico foliar, potencial xilemático, psicrometría de termocupla) y medidas indirectas del estado hídrico (temperatura de la cubierta, conductancia estomática, flujo de savia, cavitación, dendrometría); y por último, las apreciaciones visuales (García Petillo, 2008). A continuación, se detallan los procedimientos de mayor relevancia en función del análisis de la planta:

### 2.9- *Metodologías de análisis de la planta*

Las tecnologías de mayor relevancia implementadas en la evaluación del estado hídrico de los cultivos se centran en el estudio de las relaciones hídricas de una planta. Los procesos asociados son: la absorción de grandes cantidades de agua a partir del suelo, su transporte a través de la misma y la pérdida eventual de vapor de agua hacia la atmósfera circundante debida a la transpiración, proceso donde el vapor de agua fluye de la hoja a la atmósfera mediante difusión a través de los estomas. Estos son los órganos que permiten el intercambio continuo de gases entre los tejidos interiores de las plantas y la atmósfera (CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O) (Keller, 2015).

La interacción entre factores ambientales y endógenos determina la intensidad transpiratoria. Los factores ambientales más importantes que afectan a la transpiración son: radiación, déficit de presión de vapor del aire, temperatura, velocidad del viento y suministro de agua. Entre los factores de la propia planta figuran: el área foliar, la estructura y exposición foliares, la resistencia estomática y la capacidad de absorción del sistema radical. (Azcón-Bieto y Talón, 2008).

En la planta, se aplican diversas técnicas para determinar el estado hídrico de las mismas. A continuación, se detallan los principales procedimientos:

#### 2.9.1- Medida del potencial hídrico y sus componentes

Los tres instrumentos más importantes para la medida del potencial hídrico y de sus componentes son el psicrómetro de termopares, la cámara de presión y la sonda de presión.

##### 2.9.1.1- Psicrómetro de termopares

El psicrómetro de termopares se basa en el principio de que la presión de vapor relativa de una solución, o muestra de material vegetal, se halla relacionada con su potencial hídrico ( $\Psi$ ). La muestra de material vegetal se coloca en una cámara herméticamente cerrada; al cabo de un tiempo de equilibrio, generará una presión de vapor relativa, o humedad relativa en la cámara, equivalente al potencial hídrico del tejido.

Una de las razones de que se haya utilizado profusamente la psicrometría de termopares para la determinación del potencial hídrico y sus componentes es que esta técnica se puede utilizar en cualquier parte del sistema suelo-planta. Además, solo se necesita una pequeña porción de tejido; ello permite muestrear una hoja o raíz a medida que se somete la planta a diferentes condiciones. Los psicrómetros de termopares se han utilizado en hojas, tallos, raíces, nódulos de leguminosas, partes florales, polen y semillas en desarrollo (Azcon-Bieto y Talón, 2008).

### 2.9.1.2- Cámara de presión

El método de equilibrio de presión o cámara de presión es rápido y es el más utilizado en el campo. Durante muchos años, la investigación del estado hídrico de las plantas, llevada a cabo por fisiólogos vegetales y ecólogos, se ha visto limitada por la falta de un método sencillo, rápido, preciso y portátil. Para satisfacer esta necesidad, Schölander et al. (1965) desarrollaron una técnica que mide el potencial hídrico en unidades de presión. El método consiste en aplicar presión sobre una hoja cortada hasta que aparezca el agua en el extremo seccionado del tallo o el peciolo. Se interpreta que la presión positiva aplicada a la hoja corresponde a la presión que equilibra la presión negativa o tensión con la cual el agua estaba retenida en el interior del tallo antes del corte (Santesteban *et al.*, 2021). En la Figura 6, se puede apreciar los componentes del equipo.

La cámara de presión mide el potencial matricial del apoplasto o pared celular. El potencial matricial del apoplasto ( $\tau$ ) es similar al potencial hídrico ( $\Psi$ ) del simplasto adyacente.

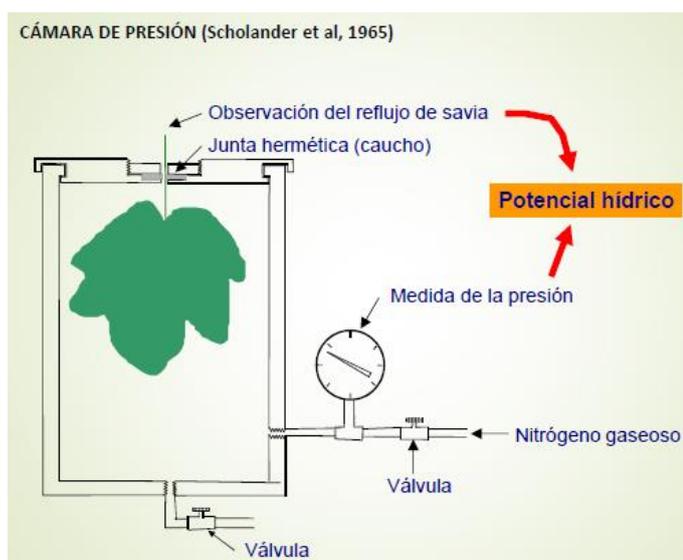


Figura 6. Cámara de Schölander. Detalle de válvulas de circulación, medidor de presión de gas inerte (manómetro), y ubicación de muestra vegetal en la medición. Fuente Azcon-Bieto y Talón, 2008.

Siempre que la resistencia al flujo entre el simplasto y el apoplasto no sea grande y que la presión osmótica ( $\Pi$ ) del agua apoplástica sea próxima a cero, es decir:

$$\Psi = P_c - \Pi = \tau - \Pi \quad (2.4)$$

Siendo  $P_c$  la presión aplicada en la cámara de presión. En la práctica, la presión osmótica del agua apoplástica es, ordinariamente, menor de 0.05 MPa, de tal manera que:

$$\Psi \cong P_c \cong \tau \quad (2.5)$$

Una ventaja de la técnica de la cámara de presión es que no solo mide rápidamente el potencial hídrico, sino que también se puede utilizar para medir la relación presión-volumen del tejido vegetal. Se ha demostrado que, si se aplica presión adicional a una hoja o rama por encima de la presión de equilibrio inicial, se obtiene líquido xilemático que se puede recoger para determinar su volumen. Con algo de práctica, la cámara de presión puede constituir uno de los instrumentos más apropiados para la investigación de las relaciones hídricas (Pérez Leal, 2017).

El estado hídrico de la vid también se puede evaluar en función del horario de las determinaciones. El potencial hídrico de la hoja al mediodía ( $\Psi_{md}$ ) es una medida del potencial hídrico negativo inmediato (es decir, succión) en la hoja en respuesta a muchos factores, como el déficit de presión de vapor, el cierre de estomas, el estado del agua del suelo y la conductividad hidráulica de la planta (Choneã *et al.*, 2001).

Al mediodía solar en una vid adulta bien expuesta, las mediciones proveen un indicador del estado hídrico de la vid en el 'peor caso'. El inconveniente de este protocolo de medición es que la lectura del valor puede variar rápidamente en función de las condiciones ambientales, tales como el paso de nubes o altos valores en el déficit de presión de vapor (Rienth *et al.*, 2023). Otro fenómeno se llama cavitación que puede afectar las lecturas en los horarios de mayor temperatura y radiación solar. Resulta en hojas que se desconectan gradualmente del sarmiento y se deshidratan progresivamente con respecto a la demanda atmosférica en condiciones de estrés hídrico. Por lo que las hojas pueden actuar como fusibles hidráulicos, causando que el potencial hídrico foliar se vuelvan más bajos que el potencial hídrico del sarmiento cuando los procesos de evapotranspiración son altos. Por lo tanto, la elección de una de estas hojas durante mediciones con bomba de presión puede conducir a una sobrestimación del estrés hídrico real de la vid. (Rienth *et al.*, 2023).

El potencial hídrico de la hoja antes del amanecer ( $\Psi_{pd}$ ) se experimenta durante la noche cuando las vides se han equilibrado con el potencial hídrico del suelo (Williams

y Araujo, 2002) y puede considerarse como un indicador de la disponibilidad de agua del suelo (Gaudin *et al.*, 2014), o más precisamente de la disponibilidad de agua en la capa más húmeda del suelo (Cole y Pagar, 2015). Antes del amanecer, generalmente se presume que el potencial hídrico foliar y el potencial hídrico del suelo, pero los procesos de transpiración nocturna y las bajas condiciones de humedad relativa del aire pueden modificar esta relación y no refleja necesariamente la cantidad de humedad del suelo disponible a nivel radicular (Rienth *et al.*, 2023).

#### 2.9.1.3- La sonda de presión

Es el único instrumento que puede medir el estado hídrico de las células individuales a partir de los parámetros de relaciones hídricas a nivel celular. La sonda de presión consta de un microcapilar relleno con aceite de silicona y conectado a una cámara de presión pequeña que contiene un sensor de presión. Cuando el extremo del microcapilar se introduce en la célula, la turgencia celular hace retroceder el aceite en el capilar, formando un menisco a nivel de la interfaz entre el jugo celular y la capa de aceite. El menisco se puede situar en un punto concreto mediante un mecanismo manual o electrónico, y así se puede eliminar una determinada cantidad para modificar el volumen (V) y la turgencia celular. Los cambios de volumen celular se obtienen a partir del diámetro del capilar y la distancia entre dos posiciones del menisco, mientras que el correspondiente cambio en la presión se registra mediante el sensor de presión.

Una de las ventajas de la sonda de presión es que la presión de turgencia se puede medir con gran exactitud (Azcon-Bieto y Talón, 2008).

#### 2.9.2- Temperatura del cultivo

El termómetro infrarrojo es el instrumento utilizado en la estimación de la transpiración. Su principio de funcionamiento consiste en el balance energético diurno de los cultivos. Donde las ganancias de energía están dadas por la radiación procedente del sol y otros cuerpos cercanos y las pérdidas de energía se dan a través de la transpiración, convección y radiación por parte de la hoja. La radiación emitida por la hoja se caracteriza por estar compuesta principalmente por la parte infrarroja del espectro, y su magnitud depende de la temperatura de la hoja. Es decir, cuando la temperatura de una hoja expuesta a la luz solar se eleva, la energía radiante que emite también se incrementa, pero en una mayor magnitud. La escasez de agua en el suelo, causa que las plantas transpiren a una tasa menor que la demanda evaporativa de la atmósfera, generando un calentamiento de la hoja, debido a que disminuye el efecto refrigerante de la transpiración. El desarrollo de estos instrumentos de teledetección

térmica, permiten mejorar y fomentar el estudio de las relaciones temperatura foliar-estrés hídrico. La variable CWSI (Crop Water Stress Index ó Índice de Estrés Hídrico de los Cultivos) (Jackson et al., 1981), es un indicador del estado hídrico de la planta a partir de la temperatura de la canopia, temperatura del aire y rango máximo de variación de temperatura para condiciones de estrés máximo (García Petillo, 2008). Esta técnica es de bajo costo y permite lecturas rápidas, pero para el cálculo del CWSI es necesario disponer de una porción del cultivo regada siempre en exceso y no permite la automatización del riego (García Petillo, 2008, Schilardi, 2021).

### 2.9.3- Porómetro

Estos instrumentos de medición funcionan a partir de la conductancia estomática. Consiste en medir la resistencia que genera una superficie porosa al pasaje de gases. En este caso se trata de medir la resistencia que efectúan los estomas (a través de su grado de apertura) a la difusión de vapor de agua hacia la atmósfera. Cuanto mayor es la resistencia estomática, menor va a ser la conductividad, lo cual implica en todos los casos una relación inversa como forma de cálculo de la conductividad en términos absolutos. Existen varios sistemas para medir la resistencia estomática dependiendo de la tecnología utilizada por el fabricante: cíclico o dinámico, flujo continuo y flujo de masa. Las ventajas principales consisten en la practicidad para el uso en el campo y de rápida operación y son aplicados en trabajos de investigación donde se evalúa el impacto de diferentes condiciones de stress hídrico (Schilardi, 2021). El inconveniente de esta tecnología es el alto costo del aparato, sus medidas no son de utilización directa para tomar decisiones acerca del riego y no permite la automatización del riego (García Petillo, 2008).

### 2.9.4- Dendrómetros

El dendrómetro es un instrumento capaz de medir las variaciones del diámetro del tronco, lo que permite evaluar el efecto del ambiente sobre el balance hídrico y crecimiento del tronco (Huguet *et al.*, 1992) obteniendo así mediciones continuas no destructivas del estado hídrico de la planta (Li *et al.*, 1989, 2020).

Durante el día, cuando la transpiración supera la capacidad de las raíces de proporcionar agua a la planta, los tejidos se deshidratan y el tallo de las plantas se encoge. Durante la noche al cesar la transpiración se produce un gradual aumento del diámetro del tallo hasta que se alcanza un grado de hidratación máximo al amanecer. Estas variaciones son de tamaño micrométrico. Puesto que el diámetro de estos

órganos depende de dos componentes, el propio crecimiento de éstos y la pérdida de agua, existen variaciones continuas a lo largo del día, encontrándonos cada 24 horas con un máximo y un mínimo de grosor. A esta variación se le llama contracción, y las contracciones anormales nos indican un estrés del árbol. A medida que disminuye la disponibilidad de agua del suelo como consecuencia de la extracción de la planta, la amplitud de la contracción diurna aumenta y la expansión nocturna decrece pudiendo llegar a ser nulo e incluso negativo. La utilización de dendrómetros para determinar el momento a partir del cual regar no utiliza un valor umbral definido (Schilardi, 2021). El diámetro del tronco oscila en ciclos de 24 h, alcanzando valores máximos antes del alba y mínimos durante la tarde. Los dendrómetros son unidos al tronco mediante unas abrazaderas de invar, una aleación de acero y níquel con un coeficiente de dilatación prácticamente nulo. Esta tecnología permite medir en tiempo real y en forma automática, lo que facilita la automatización del riego. En muchos trabajos experimentales, la máxima contracción del tronco aparece como un indicador muy adecuado del estado hídrico de las plantas. El inconveniente principal es el alto costo y debido a que no tiene un valor umbral a partir del cual regar, es necesario una interpretación calificada de la información (García Petillo, 2008, Ayaque, 2020).

#### 2.9.5- Medición del flujo de savia mediante el método de disipación de calor

El flujo de savia corresponde al movimiento de agua principalmente a través de los vasos del xilema desde la raíz hasta las hojas, donde se transpira a través de los estomas. Este provee una evaluación del uso del agua a nivel global de la vid. Existen dos métodos de medición. El método por sonda de disipación de calor térmica y el método del balance térmico del tallo.

El método por sonda de disipación térmica: Este método utiliza sondas insertadas como agujas en las vides. Se usa una aguja como referencia y la otra provee un calentamiento continuo. Esta medida se basa en el principio de que la diferencia de temperatura entre la aguja de referencia y la calentada disminuye a medida que se incrementa el flujo de savia. En esta técnica, se mide el tiempo que le lleva recorrer a un pulso de calor desde su fuente hasta un punto fijo siguiendo la dirección de la corriente de savia (García Petillo, 2008). Se requiere un emplazamiento cuidadoso para evitar cualquier contacto de las agujas con tejidos no conductivos. Además, se ha demostrado que las variaciones circunferenciales y radiales del flujo de savia pueden conducir a mediciones del flujo de savia tanto subestimadas como sobrestimadas. Por ende, el método por sonda de disipación térmica no se usa para aplicaciones comerciales (Rienth *et al.*, 2023).

El método del balance térmico del tallo: Este método utiliza una manga no intrusiva equipada con una resistencia de calefacción flanqueada por dos termopares. Esta manga es envuelta alrededor del tallo y mantiene un ajuste ceñido entre el tallo y los termopares durante las contracciones diurnas del tallo. El calor es aportado uniforme y radialmente a través de toda la sección del tallo para evitar disturbios debido al contacto con tejidos no conductivos, y para integrar cualquier variación circunferencial y radial del flujo de savia (Rienth *et al.*, 2023). Las ventajas de la técnica son la automatización de los registros y riego. Pero se debe conocer los coeficientes de corrección para la especie para programar el riego a partir de variaciones en la velocidad del flujo de savia. Además, el tejido conductor de la especie tiene que ser homogéneo para que los datos sean precisos. En plantas leñosas es necesario cortar el árbol para conocer las relaciones de radio.

### 2.10- Teledetección

En la actualidad los estudios encaminados a la integración de plataformas, sensores y datos han ido en aumento, como propuestas de monitoreo de fenómenos geofísicos, meteorológicos, ambientales e industriales (Alcarria *et al.*, 2018).

Los trabajos de censado remoto actuales suelen realizarse en ambientes heterogéneos más complejos, áreas donde los cuerpos de agua con distintas características de profundidad y condiciones del medio interactúan con diferentes tipos de suelo y vegetación. Para la conocer de mejor manera las características de estos ambientes en la actualidad se cuenta con distintos sensores activos y pasivos (Villalpando Tovalín, 2022). Los mismos pueden transportarse mediante una plataforma aérea (aeronave). Una aeronave es un vehículo capaz de desplazarse por el aire, poseen distintas formas de elevarse dependiendo de su diseño, las aeronaves más comunes son aviones, helicópteros y globos aerostáticos. En los últimos tiempos, ha presentado gran interés las UAS es el acrónimo Unmanned Aerial System por sus siglas en inglés, en español se refiere a vehículos autónomos no tripulados, VANT la plataforma no tripulada (Villalpando Tavalín, 2022). Estos pueden ser los satélites y los vehículos aéreos no tripulados (Unmanned Aerial Vehicles, UAVs). Un satélite artificial, es un dispositivo que órbita alrededor de la tierra, es esencialmente un módulo capaz de llevar distintos instrumentos instalados, estos dispositivos se ponen en orbita por medio de un cohete espacial y pueden capturar y transmitir información continuamente hacia la tierra, algunos de estos dispositivos son capaces de ajustar sus trayectorias y corregirlas gracias a sus sistemas de propulsión (Tummala y Dutta, 2017). Los sensores remotos montados en plataformas satelitales están diseñados para captar energía

dentro de un rango del espectro electromagnético, esa energía es traducida a información digital, la cual luego es procesada con tratamientos estadísticos – matemáticos para obtener una imagen compuesta en una escala Cromática. La teledetección tiene como objetivo el estudio de la energía o radiación electromagnética que es detectada por los sensores, debido a que esa energía es determinante al momento de distinguir o evaluar las cubiertas terrestres, las cuales están conformadas por masas de vegetación, suelo, agua (en sus distintos estados), roca y construcciones civiles (Schomwandt, 2015). El satélite logra a través de sus sensores medir o establecer la energía calórica reflejada o emitida por el objetivo, luego esa energía registrada es analizada y convertida en señales eléctricas que posteriormente son enviadas a estaciones terrestres en formatos como imágenes para ser analizadas mediante las diferentes plataformas (Cevallos *et al.*, 2018). Las imágenes satelitales permiten a través de los pixeles reconocer de manera visual un área de estudio considerando variables geográficas de su ubicación (Román González y Vargas Cuentas, 2013). En la agricultura se aplica en seguimientos de las cubiertas vegetales, suelo y ciclo de agua (Schomwandt, 2015).

Los dispositivos pueden tener distintas formas y configuraciones de vuelo, tiene un sistema de control autónomo o manejado por el hombre, que suele estar en tierra o en un barco, pero que puede estar en otra plataforma aérea conectados mediante un sistema de comunicación (Gili *et al.*, 2021). En cuanto a los sensores, tipos de cámaras, en el uso de aplicaciones agrícolas se ha difundido el uso de cámaras en color que usa el espectro visible por el ojo humano en rojo, verde y azul y cámaras en infrarrojo a través de las cuales y, utilizando combinaciones e índices, se pueden apreciar características de los cultivos. Los drones equipados con cámaras térmicas pueden ayudar a detectar problemas en el riego, así como determinar aquellas zonas en las que existe un exceso o déficit de humedad mediante sensores infrarrojos, capaces de medir el grado de estrés hídrico de las plantas. Una monitorización eficaz del estado hídrico de los cultivos es esencial para optimizar el uso del agua en la agricultura, así como su desarrollo y producción final. Esto es especialmente significativo en el caso de que se estén desarrollando prácticas de riego deficitario, en donde la cantidad de agua aplicada es inferior a la demandada por el cultivo, lo que provoca situaciones de déficit hídrico tanto en el suelo como en la planta (Ríos-Hernández, 2021).

#### *2.11- Microclima de canopia y la protección con mallas plásticas antigranizo*

Se entiende por microclima a las condiciones de radiación, temperatura, de humedad relativa y de velocidad del viento que ocurren a nivel de planta individual; en general son las mismas condiciones que hablamos del clima en general, pero en este

caso están referidas a esas condiciones que se generan prácticamente en el interior de una planta, de una canopia o de un cultivo (Prieto, 2021). Es la micrometeorología la que estudia los fenómenos de interacción entre la superficie y los primeros metros o kilómetros de la atmósfera (Guerra, 2021). Son condiciones muy importantes a nivel del funcionamiento fisiológico de las plantas porque inciden directamente en el funcionamiento de las mismas y también en la incidencia de algunas plagas y enfermedades. En la vid, son condiciones que tienen un impacto directo en la sanidad y calidad de la uva, y, por lo tanto, en la calidad del vino final que luego se elabora. En viticultura se pueden estudiar en distintos factores de manejo de la vid, tales como: sistemas de conducción, diferentes orientaciones de las plantas o distintas estrategias de riego; que inciden en el microclima, y, en consecuencia, en el funcionamiento de la planta, calidad de bayas y vino. Se utilizan para hacer proposiciones de manejo que mejoren el microclima interior de la canopia, y que favorezcan la madurez de la uva y la sanidad (Prieto, 2021).

La variedad de la vid, la zona donde se plantan –tanto geológicas como climáticas–, las necesidades productivas por parte del viticultor y el tipo de vino que se quiera producir, están relacionados con el control y el manejo de las condiciones ambientales, como: el uso de riego presurizado, las mallas antigranizo y el control de la calidad de la uva en todo el proceso, desde la viña hasta su industrialización (Cerdá, 2020).

El cambio climático, las nuevas condiciones y las condiciones proyectadas futuras, van a impactar en las plantas y la calidad de la uva y el vino; por lo que las proposiciones de manejo de cultivo, tienden en general a evitar golpes de calor, exposiciones excesivas de los racimos a radiación para evitar quemaduras, principalmente en las horas de mayor temperatura del día y de la temporada de verano; donde se quiere evitar el estrés hídrico en las cepas por exceso de temperatura o falta de aguas extremas (Prieto, 2021). Las condiciones meteorológicas extremas se dan con frecuencia cada vez mayor y escapan al control de los viticultores, sumado otros peligros potenciales derivados del calentamiento global del planeta, como la excesiva irradiación, las fuertes rachas de viento, el granizo, y otros factores, que influyen en la fisiología de la vid, en los ciclos vegetativos y en la calidad de la uva recogida (Arrigoni, 2021). Estos elementos son de suma importancia, ya que, en la vitivinicultura, el objetivo productivo no es maximizar el rendimiento, sino que se busca un compromiso entre rendimiento y calidad de la uva (Prieto, 2021).

Una de las principales amenazas a la sustentabilidad de los sistemas agrícolas de Mendoza son las tormentas de granizo, las cuales crean un factor de disturbio de las previsiones productivas; si bien constituye un evento de naturaleza aleatoria, la distribución espacial y los niveles de intensidad (y de daño) adquieren aspectos diferenciales según la zona (Van den Bosch, 2022). De acuerdo al registro histórico de quince temporadas de octubre a abril, desde 2005-2006 hasta 2019-2020, el número de días con pronóstico de tormentas con granizo es de 114 y 52 días con tormentas severas en áreas cultivadas de Mendoza. En la temporada 2020-2021, la tendencia de ambos indicadores se incrementó respecto del registro histórico en un 10% y 6%, respectivamente. Además, entre 2010 y 2020, la superficie implantada con vid afectada por granizo en esta provincia fueron 171 272 hectáreas (Dirección de Contingencias Climáticas, 2021).

El granizo es un enemigo de la vid, ya que sus daños son devastadores. Es capaz de romper las bayas de uvas, lo que facilita los ataques de hongos y la deshidratación. La floración se puede ver mermada por roturas, por lo que la planta pierde poder de fotosíntesis. En los sarmientos queda dañada la corteza, pero también con frecuencia el material leñoso de brazos y tronco principal, provocando riesgo de infecciones (Martín *et al.*, 2023).

Las mallas antigranizo son una tecnología eficiente para reducir el daño por granizo, viento, y sol (Curetti y Raffo, 2022) y suelen tener una duración de 10 años (Martín *et al.*, 2023). Pero cambian el microclima de las plantaciones y por ende modifican las características fisicoquímicas y sensoriales de los frutos (Bosco *et al.*, 2015). Las variables que se ven modificadas por su implementación son: la intensidad y calidad de la luz (la difusión, la reflectancia, la transmitancia y la absorbancia de la luz (Basile *et al.*, 2008), por ser una barrera al paso de la misma, la temperatura de la canopia y suelo, la humedad relativa y velocidad del viento en el cultivo (Muskaan, 2022). La temperatura máxima del aire debajo de la malla tiende a disminuir al igual que la velocidad del viento, hasta 3 grados y la velocidad se reduce en un 30-50% (Peano *et al.*, 2001; Tanny *et al.*, 2009; Middleton *et al.*, 2002). Esta reducción en la temperatura, en especial en la etapa de maduración, es necesario para mitigar las condiciones extremas en verano favorecidas por el cambio climático, y lograr el equilibrio de los compuestos que determinan la futura calidad del vino (Arrigoni, 2021). Además, se puede ver un aumento de la humedad en un 10-15 por ciento (Middleton *et al.* 2002).

En función de la radiación solar, se conoce que se divide en UV (UV-A, 400-315 nm y UV-B, 315-280 nm), visible (400-780 nm), y radiación infrarroja (IR, >780 nm). La

radiación fotosintéticamente activa (PAR), está comprendida en el rango 0,400 y 0,700 m. Esta radiación es absorbida por las plantas, almacenada y transformada a través de sus sistemas fotosintéticos (Durán et al. 2015). Además, la radiación fotosintéticamente activa y los rayos UV son los dos componentes principales de la luz implicados en el desarrollo de quemaduras solares (Gambetta et al., 2021). Se la suele expresar en unidades de flujo fotónico fotosintético ( $\mu$ moles de cuantos por metro cuadrado y por segundo) (Raffo et al., 2015; Lenscak e Iglesias, 2019). Uno de los efectos más importantes que ejercen las mallas, además de la protección física como barrera para el granizo, es la disminución de la radiación fotosintéticamente activa (PAR) (Raffo et al., 2015, Raffo et al., 2019). Dependiendo del tipo y color de la red, se han medido reducciones en la intensidad de la luz solar del 4 al 9% (PAR), del 25 al 29% (UV) y del 5% (IR), lo que reduce la temperatura en hasta 7°C (Olivares-Soto et al., 2020).

Las mallas claras se comportan como superficies traslúcidas, y generan un proceso difusivo de la luz (Castejón y Santamaría, 1993). La radiación difusa penetra mejor dentro de la copa de los árboles favoreciendo todos los procesos fisiológicos dependientes de esta. En general, las mallas aumentan los niveles de radiación difusa en el monte frutal, ya que ejercen un efecto similar al que tienen las nubes, difundiendo la radiación directa proveniente del sol en todas direcciones, siendo las de colores claros las que más difunden la radiación (Raffo et al., 2019).

De todas maneras, la radiación incidente está compuesta por una elevada proporción de radiación directa en lugar de difusa. La falta de nubosidad es la que ocasiona esta situación, y hace que la penetración de la luz dentro de la copa no sea buena. La radiación difusa penetra mejor dentro de la copa de los árboles favoreciendo todos los procesos fisiológicos dependientes de esta. En general, las mallas aumentan los niveles de radiación difusa en el monte frutal, ya que ejercen un efecto similar al que tienen las nubes, difundiendo la radiación directa proveniente del sol en todas direcciones, siendo las de colores claros las que más difunden la radiación (Raffo et al., 2019). Otros factores beneficiosos que presentan las mallas antigranizo, son la reducción de quemaduras solares para mallas oscuras (Gambetta et al., 2021) y favorecer el desarrollo de la coloración en mallas claras: cristal, perla y blanca (Raffo et al., 2019)

Otra variable en la implementación de las coberturas con malla antigranizo, son los sistemas de instalación de las mismas. La instalación de malla antigranizo es una estrategia para evitar el daño en el cultivo. Existen diferentes modalidades y diseños que se adaptan a distintos cultivos. El sistema de instalación Grembiule es el más

utilizado para proteger los viñedos conducidos en espaldero, pero existen variantes como el túnel y malla unida en el interfilar. El sistema Grembiule consiste en adosar a los laterales del espaldero una malla que permite plegarse para la ejecución de labores culturales como la poda. Fue ideado en Suiza, y consistía únicamente en el empleo de malla antigranizo de 1,10 m de ancho colocada sobre el viñedo como si fuese un delantal, sujeta por medio de plaquetas a un alambre colocado en la parte superior de los postes. Con el fin de hacer más eficiente el sistema, productores y técnicos mendocinos le introdujeron algunas modificaciones. Actualmente el sistema Grembiule se instala suspendido sobre la misma estructura de conducción del viñedo y requiere la utilización de tubos rotantes, separadores metálicos con argollas en sus extremos (de 40 a 50 cm el superior y de 60 a 70 cm el inferior), alambres y plaquetas para dar sujeción y tensado a la malla antigranizo y además permitir una cierta separación entre la malla y la producción (Van den Bosch, 2013).

Como variante del sistema Grembiule, tenemos el caso del Grembiule modificado o malla unida. Su diferencia fundamental con el Grembiule radica en que no se utilizan separadores de ningún tipo ni alambres para dar separación y tensión. La malla antigranizo se sujeta a la estructura de conducción en un alambre situado en la parte superior de los postes por medio de plaquetas y en la zona del interfilar las mallas entre hileras vecinas se unen mediante tensores metálicos (alambre galvanizado) (Nahuel, 2013). En la zona del interfilar se une malla con malla entre hileras vecinas. Este sistema, además de malla antigranizo, requiere la utilización de plaquetas y tensores metálicos (como alambre acerado) para la unión en el interfilar (Nahuel y Van den Bosch, 2011).

#### *2.12- Efecto del microclima en la fotosíntesis, estado hídrico del cultivo y composición de bayas*

Dado que la fotosíntesis y transpiración ocurren en los mismos órganos de las plantas, es necesario conocer cómo se afectan estas funciones biológicas ante las modificaciones de su entorno para optimizar el estado hídrico de los cultivos. Se sabe que la transpiración nocturna en la vid constituye un pequeño porcentaje de su uso diario de agua y no contribuye significativamente al riesgo de estrés hídrico, especialmente en comparación con la transpiración diurna (Dayer y Gambetta, 2021).

En general, el principal efecto negativo de las altas temperaturas, incluye la reducción de la fotosíntesis, tanto por degradación como por limitación en la síntesis de pigmentos fotosintéticos y/o reducción del intercambio gaseoso y eficiencia fotosintética (Ahmad, 2019). En relación con el estado hídrico, los viñedos regados suelen funcionar

dentro de un rango seguro de potenciales hídricos, pero durante la sequía, la fotosíntesis está limitada tanto por el cierre de los estomas como por los factores metabólicos. (Gambetta, *et al.*, 2020). Esta reducción de la actividad fotosintética puede mejorar la eficiencia en el uso del agua y ralentizar el proceso de maduración, preservando la acidez del mosto (Palloti *et al.*, 2023). También se debe tener en cuenta que después del envero cambia la conexión hidráulica entre las bayas y la cepa; la transpiración disminuye debido a una reducción de la conductancia cuticular, probablemente como resultado de cambios en la composición de la cera cuticular (Rogiers *et al.*, 2004; Dimopoulos *et al.*, 2020; Gambetta *et al.*, 2020), y las vías de transporte de agua hacia la baya cambia del xilema al floema en conjunto con el fuerte aumento en el transporte y acumulación de azúcar (Greenspan *et al.*, 1994; Greer y Rogiers, 2009; Gambetta *et al.*, 2020).

La temperatura también afecta los compuestos y sus concentraciones dentro de la baya. El óptimo rango para la síntesis de antocianos se sitúa entre los 17 ° y los 26 °C. La reducción de la acidez durante la maduración se relaciona con el aumento de la tasa de respiración y está en función de la temperatura. El ácido málico es el más influenciado por la respiración y la mayor diferencia entre zonas frías y calurosas es que este ácido disminuye su concentración con mayor rapidez al aumentar la temperatura, ya que aumenta la respiración. La temperatura durante la maduración de la uva se ve afectada por la fenología, y la fenología temprana hace que las uvas maduren durante la parte más cálida del verano (van Leeuwen, *et al.*, 2020).

Teniendo en cuenta la radiación solar, la asimilación de carbono se ve beneficiado por la interceptación de la luz en la mañana, dado que las altas temperaturas de la tarde disminuyen el intercambio gaseoso, el estado del agua en la canopia y actividad fotosintética (Dayer *et al.*, 2020). Los compuestos fenólicos, que se benefician de la exposición de la luz para su síntesis, se ven afectados negativamente por el sombreado, mientras que éste puede mejorar la composición aromática. La acumulación de reservas en la vid se ve reducida por la menor producción de fotoasimilados. (Palloti *et al.*, 2023). Los componentes que dan sabores y aromas a las uvas y vinos, como los monoterpenos, se ven afectados por el aumento de temperaturas y la radiación solar. La intensidad de la luz es generalmente mayor en comparación con altitudes bajas, y el efecto es independiente del factor temperatura. Los altos niveles de radiación se combinan con la baja nubosidad. La síntesis de antocianinas, que dan características de color, depende principalmente de la intensidad y calidad de la luz, la temperatura y los factores de manejo del monte que las modifiquen. La presencia de mallas antigranizo modifica a estos componentes de los frutos y su coloración. Por lo

tanto, mallas oscuras, que reduzcan en exceso los niveles de radiación en variedades con una genética que limite su formación de color, afectarán este parámetro de forma negativa, mientras que, si podrían utilizarse en variedades de fácil coloración, o de coloración verde, montes peatonales con fruta más expuesta a la radiación, etc. Por otro lado, las mallas claras (cristal, perla, blanca, blanca + negra) que aumentan la radiación difusa en el monte frutal, favorecen el desarrollo de la coloración y se recomendarían para variedades o situaciones no favorables a la toma de color (Raffo et al., 2019). Todas las variaciones en los constituyentes de las bayas, se ve reflejado en los aromas de vino tinto, definiendo la tipicidad del bouquet y se relaciona con la composición isotópica de los vinos, dando baja tipicidad para valores de ratio isotópico de  $-26,20\text{‰}$  a  $-27,7\text{‰}$  (van Leewen *et al.*, 2020). Durante la maduración de las bayas, la sacarosa se transloca de las hojas al fruto y se convierte rápidamente en glucosa y fructosa (Davies y Robinson, 1996). Por lo tanto, la proporción de isótopos de carbono en los azúcares de las bayas maduras integra la discriminación isotópica fotosintética del carbono en las hojas durante la maduración de las uvas (Martínez *et al.*, 2018).

### 2.13- Isótopos Estables

#### 2.13.1- Ratio o composición isotópica de carbono ( $\delta^{13}\text{C}$ ) y su importancia en la agricultura.

La palabra isótopo se refiere al hecho de que los isótopos son especies de átomos de un elemento químico ubicado en la misma posición en la tabla periódica. Los isótopos de un elemento comparten un número atómico, porque tienen el mismo número de protones, pero su masa atómica y propiedades físicas no son las mismas, ya que el número de neutrones en sus núcleos es diferente. Los isótopos estables mantienen una concentración constante en la Tierra a lo largo del tiempo, mientras que los isótopos radiactivos son átomos que se desintegran a velocidades predecibles y mensurables para formar otros isótopos, emitiendo un electrón nuclear o un núcleo de helio y radiación. El uso de isótopos es una forma eficaz de obtener una medida cuantitativa directa en las plantas que están bajo la influencia de varios factores, a fin de conocer aspectos puntuales (Basantes, 2015). La relevancia de estas formas se debe a su abundancia en la superficie de la Tierra y a su implicación en procesos biológicos relevantes (Adams y Grierson, 2001). Hay dos isótopos de carbono estables en la naturaleza,  $^{12}\text{C}$  y  $^{13}\text{C}$ , la mayor parte de este elemento se encuentra en la forma más ligera  $^{12}\text{C}$  (98,93 %), mientras que el  $^{13}\text{C}$  más pesado representa el 1,07 % (Hoefs, 2009).

### 2.13.2- Fraccionamiento isotópico en las plantas

Los isótopos del carbono son incorporados en los ecosistemas y en las cadenas tróficas por los vegetales acuáticos y terrestres que, a través de la fotosíntesis donde se transforma el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) de la atmósfera, en moléculas de glucosa. Durante la fotosíntesis se produce un sesgo con respecto a las moléculas que contienen el isótopo más pesado, con lo cual, la relación  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  en las plantas es diferente que aquella relación isotópica de carbono presente en la atmósfera (Ambrose, 1993).

Una de las metodologías de evaluación del estatus hídrico vegetal es a través del análisis de la composición isotópica de carbono (C), que se expresa en términos de  $\delta^{13}\text{C}$  en unidades de partes por mil (‰) (Werner *et al.*, 2012). Cuando las plantas no tienen limitantes hídricas, mantienen sus estomas abiertos, por lo cual la tasa de ingreso de  $\text{CO}_2$  a la planta será máxima. Bajo estas condiciones, el  $\text{CO}_2$  de la cavidad estomática estará enriquecido en  $^{12}\text{C}$  respecto al aire, ya que el isótopo pesado ( $^{13}\text{CO}_2$ ) presenta una menor velocidad de difusión que el liviano ( $^{12}\text{CO}_2$ ) (Farquhar *et al.*, 1989). Además, durante la fotosíntesis de plantas  $\text{C}_3$ , aquellas que no tienen adaptaciones fotosintéticas para reducir la fotorrespiración (Azcón-Bieto y Talón, 2008); la enzima carboxilante RUBISCO (ribulosa-1,5-bisfosfato carboxilasa/oxigenasa) también discrimina en contra del isótopo pesado ( $^{13}\text{C}$ ). Cuando hay déficit hídrico los estomas se cierran, cesa el flujo de  $\text{CO}_2$  y la enzima RUBISCO utiliza una mayor proporción de  $^{13}\text{C}$  (Brüggemann *et al.*, 2011). Además, el efecto de difusión pierde la importancia al no haber renovación del aire de la cavidad subestomática, por estar los estomas cerrados (Martínez *et al.*, 2018). Este proceso de regulación se conoce como conductancia estomática (gs), y es un parámetro que determina el grado de apertura estomática que hay en las hojas de las plantas; la gs tiene la capacidad de regular la pérdida de vapor de agua y el ingreso de  $\text{CO}_2$ , por ende, reduce o regula la transpiración (Oliveros Díaz, 2023). Es decir que la planta tiene menor proporción de isótopos pesados que el aire, llamándose a este fenómeno “fraccionamiento isotópico”. Es por ello que, en consecuencia, los tejidos de las plantas que han sido sometidas a un déficit hídrico mayor, presentan habitualmente valores de  $\delta^{13}\text{C}$  más altos (menos negativos) que los procedentes de plantas menos estresadas. Este comportamiento ha sido referido en numerosas ocasiones para el cultivo de la vid, por lo que resulta de interés profundizar en su estudio y difundir sus posibilidades de utilización (Martínez *et al.*, 2018).

La composición isotópica de carbono ( $\delta^{13}\text{C}$ ) tiene la ventaja de proporcionar un valor integrado en el tiempo, con respecto a los métodos directos de evaluación del estado hídrico, ya que evalúa un período de tiempo mayor comparado con los registros diarios del potencial hídrico foliar (Medrano *et al.*, 2007). Este índice isotópico varía en

función de parámetros climáticos relacionados con el déficit hídrico. Por ejemplo, los incrementos de irradiancia (Brugnoli y Farquhar, 2000), temperatura del aire (Panek y Waring, 1995; Wang, 2003) y déficit de la presión de vapor atmosférico (Panek y Waring, 1997) influyen directamente en la dinámica de la conductancia foliar y conllevan a un incremento de  $\delta^{13}\text{C}$  (Farquhar *et al.*, 1989).

El uso de isótopos estables en estudios ecológico-agronómicos ha crecido en las últimas décadas, considerándose los valiosos trazadores no radiactivos e integradores de cómo las plantas interactúan y responden a su ambiente biótico y abiótico. Desde su introducción en la experimentación vitivinícola a principios de la década pasada, el estudio de esta proporción (expresada como  $\delta^{13}\text{C}$ ) ha experimentado un creciente interés (Santesteban *et al.*, 2014). Las experiencias han sido desarrolladas en tallos, hojas y bayas completas o partes (hollejo, pulpa y/o semilla). Es necesario continuar con los estudios del potencial integrador del  $\delta^{13}\text{C}$  durante un período de tiempo, en relación con temáticas de la fisiología del cultivo, con la gestión hídrica, la modelización y la viticultura de precisión (Santesteban *et al.*, 2014). Los modelos empíricos predictivos, basados en los procesos de vides, requieren diseñarse con exactitud en función de la posible aplicación en escenarios futuros (Moriondo *et al.*, 2015).

En los análisis aplicados a la composición isotópica del carbono de otros órganos de la planta tales como raíces y tallos ofrece información que puede ser relevante en el estudio de la eficiencia de uso de agua de diferentes genotipos. No obstante, en estos casos también intervienen otros procesos fisiológicos como la partición de fotoasimilados entre los diferentes órganos, por lo que la interpretación de estos datos a día de hoy, resulta aún confusa (Medrano *et al.*, 2007, Medrano, 2016). Los azúcares sintetizados en las hojas de la vid se desplazan hacia las bayas durante la maduración, dado que este órgano está ampliamente reconocido como el mayor sumidero de fotoasimilados vía fotosíntesis (Ollat y Gaudillère, 2000). En el ciclo fotosintético hay tres fases diferenciadas, la fijación de  $\text{CO}_2$  o carboxilación mediante la rubisco, la reducción a hidratos de carbono y regeneración de la RuBP (ribulosa 1,5-bifosfato), donde se inicia la formación de glucosa, fructosa y posteriormente almidón y sacarosa (Azcon-Bieto y Talón, 2008). Se presupone que debido a que la fijación de carbono ocurre únicamente por la carboxilación (hoja), no se genera fraccionamiento isotópico en el transporte y maduración de los productos fotoasimilados. En el caso del  $\delta^{13}\text{C}$  de las bayas, se ha demostrado que está estrechamente relacionado con las condiciones de estrés hídrico que se producen durante el verano y, particularmente, con las del período envervendimia. Las mismas en la maduración, mostraron ser el órgano más apropiado para

estimar el estado del agua de las vides (Bchir *et al.*, 2016; Villalobos-González, 2019), por esta razón se propone trabajar en nuestro proyecto con esta sección de la planta.

Por otra parte, se ha demostrado que el potencial hídrico de la hoja antes del amanecer, la discriminación de isótopos de carbono y el modelado del balance hídrico son precisos para evaluar el estado del agua de la vid en estudios de terruños (van Leeuwen, 2010). Pero en otros, ha habido variabilidad de resultados, atribuidos a variaciones genéticas entre variedades o diferencias ambientales (Brillante *et al.*, 2017). Asimismo, la composición isotópica de carbono ha sido relacionada con otras variables de los cultivares, tales como propiedades del suelo (grava, pendiente, textura), estado del agua de la vid y propiedades de bayas tales como azúcares y ácidos málico y tartárico; han demostrado correlación con  $\delta^{13}\text{C}$  (van Leeuwen, 2018). La relación entre  $\delta^{13}\text{C}$  y la eficiencia hídrica es muy importante en la agricultura, y existe porque la discriminación isotópica está vinculada linealmente a la relación  $p_i/p_a$ , donde  $p_i$  es la presión parcial de  $\text{CO}_2$  en los espacios intercelulares de la hoja y  $p_a$  en el aire ambiente (Farquhar *et al.*, 1982, 1989; Azcon-Bieto y Talón, 2008). El  $\delta^{13}\text{C}$  también depende de la variedad, de su aptitud para ser eficiente en el uso del agua (Mena Morales *et al.*, 2022). Donde la eficiencia de uso del agua (water use efficiency, WUE), se define como la relación másica del producto respecto del agua consumida en evapotranspiración o agua aplicada (Azcon-Bieto y Talón, 2008). Otro término importante, es la eficiencia intrínseca del uso del agua (WUE<sub>i</sub>) es la relación entre los moles de  $\text{CO}_2$  asimilados y los moles de agua transpirados por la planta (Tomás *et al.*, 2014). La técnica que permite conocer la eficiencia transpiratoria de una manera integrada, a lo largo de todo el desarrollo y en condiciones de campo, es la discriminación isotópica de carbono. El enriquecimiento en el  $\delta^{13}\text{C}$  en las plantas deficientes en agua, se atribuye a la regulación negativa de la conductancia estomática ( $g_s$ ) y el aumento de la eficiencia del uso del agua a (WUE, del inglés «Water Use Efficiency») (Farquhar *et al.*, 1982, 1989; Medrano *et al.*, 2007; Souza *et al.*, 2005; Bchir *et al.*, 2016; Platevin *et al.*, 2022). En la Figura 7, se pueden comparar el comportamiento de una planta hidratada vs una planta estresada. En la planta hidratada el flujo de gases en el área foliar no se ve limitado, los estomas permanecen abiertos y favorecen la fotosíntesis y la conductancia estomática (Morejón Escudero, 2022). El déficit hídrico provoca en las hojas una pérdida de turgencia celular que, junto a la acción del ácido abscísico (ABA), cuya síntesis en las raíces aumenta en sequía, son responsables del cierre de los estomas. Este mecanismo genera un aumento de la resistencia estomática a la difusión de  $\text{CO}_2$  hacia el estoma (Medrano *et al.*, 2007), se reducen las pérdidas de agua y se reduce la fotosíntesis (Martínez-Lüscher, 2017).

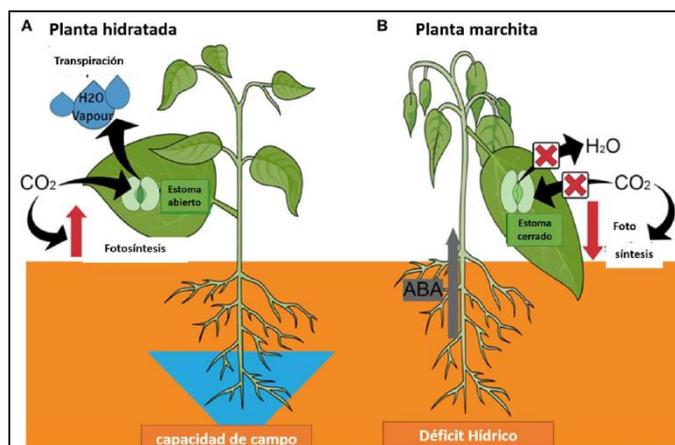


Figura 7 – Comparativo de plantas sometidas a estrés y su relación con la apertura y cierre estomático. ABA (ácido abscísico, tiene gran importancia en la respuesta de la planta frente al estrés) (Peter y Vider, 2017)

Sin embargo, la relación entre  $\delta^{13}\text{C}$  y la eficiencia de uso de agua en vides muestra importantes variaciones entre diferentes experimentos, lo que limita su interés como indicador del estado del agua, pero puede tener interés para caracterizar el estado hídrico que han experimentado las cepas a lo largo de una campaña a nivel regional (Martínez *et al.*, 2018). Por lo tanto, explorar el potencial de este nuevo indicador en viñedos en la región, podría contribuir al manejo productivo sustentable de los viñedos.

### 2.13.3- Variabilidad en la composición isotópica: fuentes

El cálculo de la relación isotópica se expresa en ‰ conforme a la ecuación:

$$\delta^{13}\text{C} = \left( \frac{R_{\text{muestra}}}{R_{\text{patrón}}} - 1 \right) * 1000 \quad (2.6)$$

Donde R es la abundancia relativa de átomos de  $^{13}\text{C}$  respecto de la abundancia relativa de átomos de  $^{12}\text{C}$ , para la muestra y para el patrón; dando rangos de valores para plantas entre -30‰ y -5‰ (Martínez *et al.*, 2018).

Dado que los efectos isotópicos suelen tener valores próximos a la unidad, por cuestiones prácticas se habla de discriminación isotópica ( $\Delta$ ), definida como su desviación respecto la unidad (Mateo *et al.*, 2004). La variabilidad en plantas C3 tiene lugar durante la fotosíntesis y se expresa como fraccionamiento isotópico, según Farquhar *et al.*, 1989:

$$\Delta\text{‰} = a + (b_3 - a) \frac{c_i}{c_a} \quad (2.7)$$

donde  $c_a$  y  $c_i$  representan la presión parcial de  $\text{CO}_2$  en el aire y la cámara subestomática, respectivamente,  $a$  es el fraccionamiento debido a la difusión en el aire

(4.4‰) y  $b_3$  es el fraccionamiento durante la carboxilación por la RuBisCO (30‰). Por tanto, la  $\Delta$  de plantas C3 depende de cuál de estos dos pasos sea el factor limitante. Cuando los estomas están abiertos, el CO<sub>2</sub> difunde fácilmente hacia la cámara subestomática con lo que  $c_i$  se aproxima a  $c_a$ . En ese caso, la  $\Delta$  se acerca al valor de  $b_3$  (30‰), ya que la actividad de RuBisCO no se encuentra limitada por la concentración intercelular de CO<sub>2</sub> y, por tanto, la discriminación tiene lugar sobre todo durante la carboxilación. Por el contrario, cuando la conductancia estomática disminuye, el flujo de CO<sub>2</sub> se reduce y  $c_i$  es significativamente más baja que  $c_a$ . En ese caso, el factor limitante de la fotosíntesis es la conductancia estomática, y adquiere mayor importancia el fraccionamiento debido a la difusión de CO<sub>2</sub>, con lo que la  $\Delta$  se acerca al valor de  $a$  (4.4‰) (Mateo *et al.*, 2004).

Buena parte de los trabajos con isótopos estables se lleva a cabo en hojas, ya que es allí donde el fraccionamiento fotosintético queda mejor reflejado. No obstante, puesto que todo el carbono de la planta se origina durante la fotosíntesis, es de esperar que las variaciones genotípicas y/o ambientales se expresen también en otros tejidos. Las bayas son sumideros de carbono (Hurtado Mendoza, 2020), por lo que su estudio es fundamental en la composición isotópica. Además, se ha identificado el efecto dosel. Este fenómeno viene determinado en gran parte por procesos fisiológicos en el entorno de la hoja (Mateo *et al.*, 2004).

Pero las condiciones ambientales son el principal factor responsable de las variaciones en la composición isotópica del carbono entre individuos de una misma especie. Entre las variables que pueden alterar la  $\delta^{13}\text{C}$  en tejidos vegetales podemos destacar tres: condiciones hídricas (disponibilidad y/o demanda), concentración de CO<sub>2</sub> e irradiancia.

En condiciones de sequía los estomas limitan la fotosíntesis, con lo que disminuye la relación  $c_i/c_a$  (Dayer *et al.*, 2020). Esto aumenta la  $\delta^{13}\text{C}$  en plantas C3 (Araus *et al.* 1997; Ehleringer y Cooper 1988; O' Leary, 1995; Mateo *et al.*, 2004). De forma semejante, un aumento en el gradiente de presión parcial de vapor aumenta la  $\delta^{13}\text{C}$  en plantas C3 (Farquhar *et al.* 1982; Madhavan *et al.* 1991; Barbour y Farquhar 2000). De acuerdo con estas observaciones, se han encontrado relaciones significativas entre la  $\delta^{13}\text{C}$  y diversos parámetros ambientales relacionados con la disponibilidad hídrica, tales como la precipitación o la evapotranspiración (Warren *et al.* 2001; Plantevin *et al.*, 2023). Efectivamente, la  $\delta^{13}\text{C}$  es un buen indicador de la disponibilidad hídrica (Warren *et al.* 2001; van Leeuwen *et al.*, 2009; Santesteban *et al.*, 2016; Brillante *et al.*, 2017; Martínez *et al.*, 2018; Plantevin *et al.*, 2023).

En plantas C3 la concentración de CO<sub>2</sub> limita la fotosíntesis y, por tanto, un incremento de CO<sub>2</sub> da como resultado una mayor tasa fotosintética. Por otro lado, las plantas aprovechan la mayor disponibilidad de CO<sub>2</sub> para aumentar su eficiencia hídrica, cerrando los estomas. Sin embargo, esta reducción de la conductancia estomática no limita la fotosíntesis, y por tanto la  $\delta^{13}\text{C}$  se vuelve más negativa a medida que la concentración de CO<sub>2</sub> aumenta (Beerling y Woodward 1995; Polley *et al.* 1993). Respecto a la irradiancia, se han observado correlaciones positivas entre la irradiancia y la  $\delta^{13}\text{C}$  (Broadmeadow *et al.* 1993; O' Leary 1995; Yakir y Israeli 1995; Zimmerman y Ehleringer 1990).

#### 2.13.4- Espectrómetro de masas de relaciones isotópicas: funcionamiento

Para la medición de isótopos estables, se necesita una cantidad de material vegetativo que ronde los 3+/- 0,5µg. En el caso de trabajar con uvas enteras, es necesario secarlas en estufa hasta peso constante, para luego molerlas hasta formar un polvo fino. La reducción de actividad acuosa, que se define como la relación que existe entre la presión de vapor de un alimento dado en relación con la presión de vapor del agua pura a la misma temperatura, preserva la muestra hasta su determinación (Cardona Serrate, 2019). En el caso de trabajar con mosto, el proceso consiste en pipetear 40 microlitros sobre cápsulas de estaño dispuestas en los pocillos de una micro placa tal y posteriormente se introduce la micro placa en la estufa a 50 °C durante 24 horas con el fin de evaporar el agua del mosto. Se pesa y recubre la muestra sobre una microcápsula de estaño de alta pureza (Martínez *et al.*, 2018). La carga de las mismas al equipo se realiza con pinzas. En el analizador elemental acoplado al espectrómetro de masas de relaciones isotópicas se combustionan las cápsulas con una corriente de oxígeno. En esta etapa inicial se produce la combustión oxidante de la muestra. De la corriente de productos, se separa una pequeña fracción de CO<sub>2</sub>, en presencia de Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, óxido de Co/Ag y exceso de O<sub>2</sub>. Como resultado de esta fase operativa, a la salida del tubo de oxidación se tiene una corriente gaseosa de NO, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O y CO<sub>2</sub>. Los óxidos de azufre quedan retenidos por absorción en el óxido de Co/Ag. Inmediatamente, la corriente ingresa a otro tubo lleno de CuO, donde el exceso de O<sub>2</sub> es eliminado por medio de la reacción de formación de CuO, y los óxidos de nitrógeno son reducidos. Posteriormente, la corriente compuesta de N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O, pasa por una trampa de (ClO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>, donde se elimina la humedad. La mezcla de N<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> se separa temporalmente por medio de una columna cromatográfica rellena con un material polimérico (Mateo *et al.*, 2016).

Un sistema intermedio de flujo continuo, CONFLO, actúa como interfase de acople entre el analizador elemental y el espectrómetro de masas. Durante la medición, inyecta una serie de pulsos de gases de referencia  $N_2$  y  $CO_2$  que se utilizan para una primera normalización de los valores obtenidos. Esta etapa, puede realizar diluciones de los gases de interés con el gas portador (He) para limitar las corrientes iónicas en las copas de captación en el espectrómetro de masas. Esta dilución se configura en forma independiente para los gases de referencia y para el  $N_2$  y  $CO_2$  de la muestra con la intención de obtener niveles de corriente similares para el  $N_2$  y  $CO_2$  de la muestra y de los gases de referencia con el fin de disminuir las incertidumbres referentes a la linealidad del sistema de medición y evitar la saturación de las copas de captación del espectrómetro de masas (Martínez *et al.*, 2018).

Finalmente, el espectrómetro de masas de relaciones isotópicas, posee una fuente de ionización por impacto electrónico. La fuente se calibra para lograr la extracción de un único electrón por molécula a fin de dotarlas de una misma carga eléctrica. Las moléculas ionizadas por la fuente son aceleradas por un par de placas electrostáticas y colimadas por una lente electrostática a fin de lograr un haz iónico compacto. Los iones acelerados se desplazan en un tubo de vacío y son sometidos al campo magnético generado por una bobina. La acción del campo magnético sobre los iones en movimiento genera una desviación en su trayectoria lineal según la ecuación  $r = mv/qB$ , siendo que todos los iones generados en la fuente poseen la misma carga, la desviación dependerá del campo, que es controlado por el espectrómetro; de la velocidad, determinada por el potencial de las placas electrostáticas y de la masa del catión. El resultado es la separación del haz de iones en haces diferenciados por su masa, que son captados por copas de Faraday geoméricamente dispuestas para tal fin. La corriente iónica convertida en corriente eléctrica es amplificada y registrada por el equipo, siendo la relación entre las corrientes de las distintas copas equivalente a la relación de isotópica de la muestra. Las moléculas predominantes de  $CO_2$  resultantes de las combinaciones de los isótopos  $^{17}O$ ,  $^{16}O$ ,  $^{18}O$ ,  $^{13}C$  y  $^{12}C$ , son: 44( $^{12}C$   $^{16}O$   $^{16}O$ ) 45 ( $^{13}C$  $^{16}O$  $^{16}O$  y  $^{12}C$   $^{17}C$  $^{16}O$ ), y 46 ( $^{12}C$   $^{16}O$   $^{18}O$ ). Permite medir directamente las relaciones de isótopos  $^{13}C/^{12}C$ ,  $^{15}N/^{14}N$  (Costantini, 2010).

## Capítulo 3

### PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En este capítulo se explicitan la localización del muestreo, los análisis de campo y laboratorio, como así también su diseño experimental y los análisis estadísticos que conducen a los resultados.

#### 3.1- Localización

El ensayo se llevó a cabo en la Estación Experimental Agropecuaria (EEA) de Rama Caída, San Rafael, Mendoza, Argentina (Figura 8). La EEA pertenece al Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). El sitio experimental se encuentra ubicado en calle El Vivero s/N°. La recolección de datos se llevó a cabo durante el verano del 2020. Las parcelas analizadas están compuestas de veinticinco hileras, las cuales miden ciento dos metros de longitud cada una. El marco de plantación es de 2,5 m entre hileras con orientación noreste-suroeste ( $24^{\circ} 8' 45,46''$  de inclinación) y una distancia de 1,50 m entre plantas.

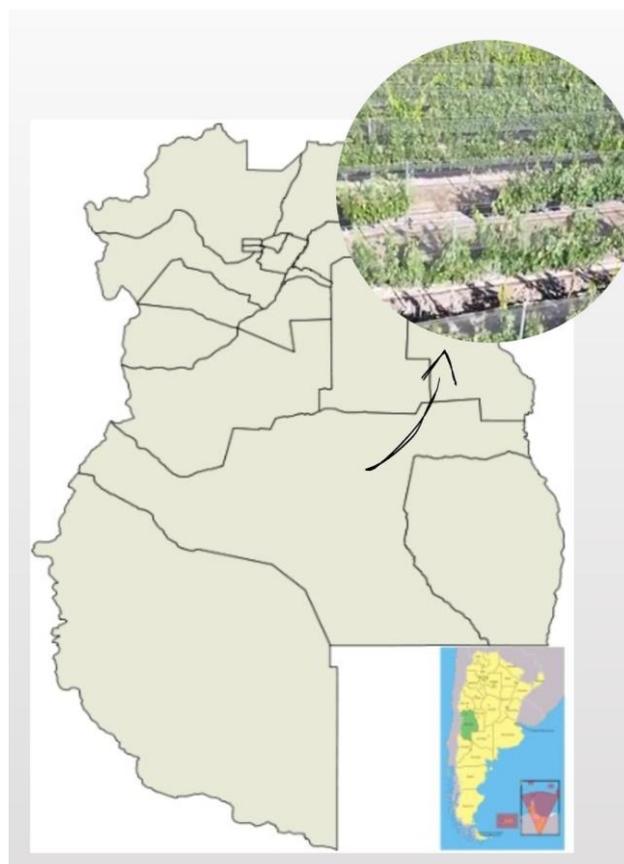


Figura 8. Localización del viñedo experimental, ubicado en la E.E.A. Rama Caída, localizado en Rama Caída, San Rafael, Mendoza, Argentina

### 3.2- Características vitícolas

Se muestreó vid varietal cv. Malbec sobre pie franco. Las características ampelográficas son la forma de su hoja poco plegada y contorsionada, mediana, orbicular y cuneiforme, y por su dimorfismo (enteras y trilobadas), con exclusivos dientes agudos, seno peciolar en V, punto peciolar levemente rosado y pecíolo mediano, muy coloreado. Su racimo es mediano, lleno, alado, cónico mediano, con bayas negro-azuladas, medianas y redondas (Rodríguez *et al.*, 1999). La conducción de la vid está estrechamente ligada a la poda, la cual toma especial significado en la etapa de primavera. En la EEA el sistema de conducción utilizado es espaldero alto con sistema de poda en cordón bilateral pitoneado. Este sistema consiste en la distribución de las cepas en hileras, guiadas por tendidos de alambres, que pueden variar en una cantidad de 2 a 4, y que son sostenidos por postes. Particularmente, la elección del espaldero alto se debe al clima, esto posibilita una óptima calidad en la producción, menor incidencia de enfermedades y la posibilidad de realizar la vendimia en forma mecánica. El sistema de riego por goteo.

### 3.3- Variables climáticas

En la presente tesis los principales parámetros climáticos que afectan la evapotranspiración son la radiación, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y la velocidad del viento. Además, estas variables son las necesarias para estimar la cantidad de agua que se suministra por riego, a fin de conservar el balance hídrico del cultivo. Para registrar estos parámetros se tomaron las temperaturas y precipitaciones medias mensuales que proporcionó la estación agrometeorológica INTA Rama Caída, teniendo en cuenta los registros históricos de las temperaturas que van desde el año 1950 y las precipitaciones tomadas desde el año 1927. La estación meteorológica se ubica en la latitud 34° 40' S, longitud 68° 23' O, a una altitud de 728 m.s.n.m. Esta base de datos fue la utilizada para procesar los datos y establecer las medias mensuales necesarias para el diseño de la lámina de riego. Asimismo, se complementaron los registros de velocidad del viento con la estación meteorológica del Aeropuerto de San Rafael, ya que en las instalaciones de INTA no se cuenta con anemómetro.

#### 3.3.1- Programación de riego

Para garantizar que la metodología de composición isotópica, fuera en un viñedo sin estrés hídrico, se estudió el sistema de dosificación de agua mediante riego por goteo. Se verificó que el diseño implementado en la temporada 2020, supliera el 100 % de las necesidades hídricas del cultivo, establecido en un rango de 600 a 700 mm/año. Para validar cuantitativamente las cantidades de agua, expresadas en lámina bruta

(mm), se utilizó el programa CROPWAT 8.0 para llevar a cabo una simulación del ensayo.

El programa opera con las variables climatológicas, características del cultivo y composición del suelo. Se utilizó la base de medias históricas de temperaturas y precipitaciones proporcionadas por el INTA y se complementó con los datos de humedad, viento, insolación y radiación del San Rafael AERO a través de la aplicación CLIMWAT.

### *3.4- Diseño experimental y modelo estadístico*

#### 3.4.1- Diseño del ensayo a campo

El diseño experimental se definió de acuerdo con la homogeneidad de las plantas en el viñedo, basado en el peso de poda. Para ello se establecieron bloques aleatorios con cinco tratamientos, los cuales se enumeran a continuación:

- A- Tratamiento 1 (TE) constituye el testigo (sin protección antigranizo),
- B- Tratamiento 2 (NG) tiene malla antigranizo Negra, instalada en sistema Grebiule,
- C- Tratamiento 3 (PG) tiene malla antigranizo Perla, instalada en sistema Grebiule,
- D- Tratamiento 4 (NM) tiene malla antigranizo Negra, instalada en sistema Grebiule modificado o malla unida,
- E- Tratamiento 5 (PM) tiene malla antigranizo Perla, instalada en sistema Grebiule modificado o malla unida,

De acuerdo a la Figura 9, en los tratamientos con protección que utiliza el sistema Grebiule se observa que la malla está colocada sobre el viñedo en cada lado de la hilera como si fuese un delantal, sujetadas por medio de plaquetas a un alambre situado en la parte superior de los postes de la estructura de conducción del viñedo; la tensión longitudinal de la malla antigranizo se realiza por medio de tubos rotantes y la tensión transversal depende del tratamiento en evaluación.

En los tratamientos NG y PG se realizaron respetando las especificaciones del sistema grebiule. En los tratamientos NM y PM no se utilizan separadores ni alambres para dar tensión y separación; en su lugar se emplea tensores metálicos que se acoplan a las mallas de hileras vecinas en la zona del interfilar, dejando una separación de 50 cm entre sí.

Todos los tratamientos recibieron la misma cantidad de agua mediante el sistema de riego por goteo.

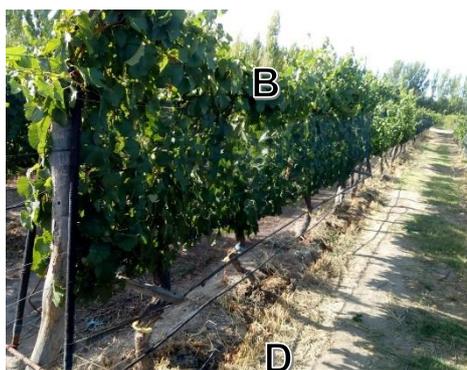


Figura 9. A-Tratamiento 1: (Te) Testigo; B- Tratamiento 2: (NG), Malla antigranizo Negra, instalada en sistema Grebbiule; C- Tratamiento 3: (PG), Malla antigranizo Perla, instalada en sistema Grebbiule; D- Tratamiento 4: (NM), Malla antigranizo Negra, instalada en sistema Grebbiule modificado; E- Tratamiento 5: (PM), Malla antigranizo Perla, instalada en sistema Grebbiule modificado

En la Figura 10 se muestra cada tratamiento, el cual está conformado por cinco unidades experimentales de quince cepas cv. Malbec. Mientras que la figura 11 muestra la configuración de las 25 unidades experimentales identificadas por cada tratamiento, en la ubicación espacial dentro de la parcela experimental.

|             |       |    |    |    |    |        |    |    |    |    |         |    |    |    |    |        |    |    |    |    |       |    |    |    |    |
|-------------|-------|----|----|----|----|--------|----|----|----|----|---------|----|----|----|----|--------|----|----|----|----|-------|----|----|----|----|
| ID Parcela  | 2     | 5  | 6  | 7  | 14 | 12     | 8  | 9  | 15 | 16 | 1       | 3  | 4  | 10 | 18 | 13     | 17 | 23 | 24 | 25 | 11    | 19 | 20 | 21 | 22 |
| Tratamiento | NM    | NG | TE | PG | PM | PM     | NG | NM | TE | PG | NG      | PM | TE | PG | NM | PG     | NG | PM | NM | TE | PM    | NM | NG | PG | TE |
| Bloque      | I (1) |    |    |    |    | II (2) |    |    |    |    | III (3) |    |    |    |    | IV (4) |    |    |    |    | V (5) |    |    |    |    |

Figura 10. Diseño experimental: tratamientos, parcelas y bloques

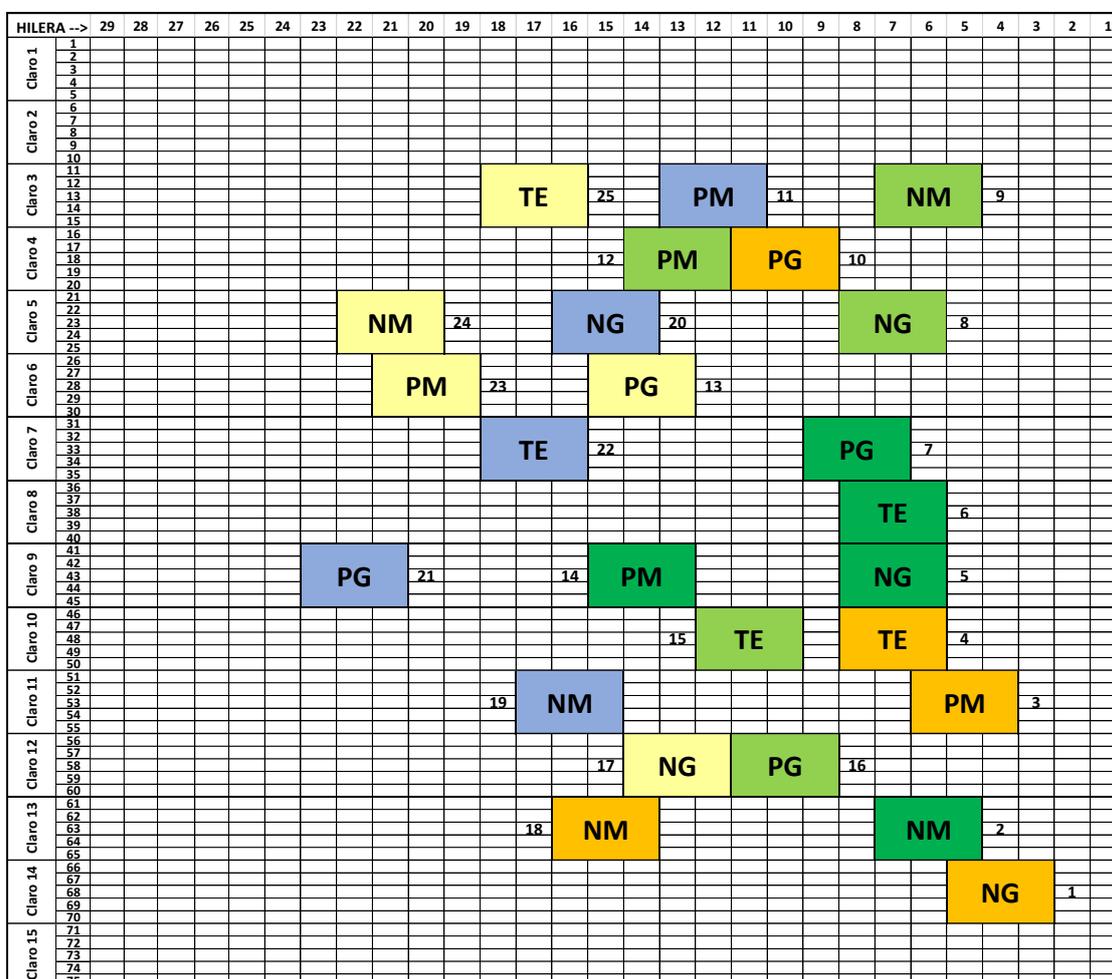


Figura 11. Configuración de las 25 unidades experimentales identificadas por cada tratamiento: TE, NG, PG, NM y PM. Cada color corresponde a cada uno de los tratamientos empleados, donde los números superiores corresponden al número de fila, comenzando de derecha a izquierda.

### 3.4.2- Diseño estadístico

El modelo estadístico aplicado es factorial:  $2^2 + 1$  nivel (testigo). Este modelo permitirá analizar como primer factor la influencia de los colores perla y negro de malla antigranizo, y como segundo factor los sistemas de instalación Grebiule y Grebiule Modificado o malla unida (Tabla 2). El seguimiento del estado hídrico se siguió teniendo en cuenta las siguientes variables: potencial hídrico foliar de preamanecer ( $\Psi_{pd}$ ), potencial hídrico foliar de medio día ( $\Psi_{md}$ ) y composición isotópica de carbono ( $\delta^{13}C$ ).

Tabla 2. Modelo estadístico factorial

| FACTOR                 | NIVELES             | VARIABLES RESPUESTA   | Factor bloquizante                |
|------------------------|---------------------|---|-----------------------------------|
| Color                  | Negro               | Potencial hídrico foliar de pre amanecer.                                 | Vigor (expresado en peso de poda) |
|                        | Perla               | Unidad dimensional: MPa.  |                                   |
| Sistema de instalación | Grebiule            | Potencial hídrico foliar de mediodía. Unidad dimensional: MPa.            |                                   |
|                        | Grebiule modificado | Relación de isotópica de carbono. Unidad dimensional: ‰ (partes por mil). |                                   |

Durante el período de estudio, se evaluó el estado hídrico de las cepas mediante técnica de Schölander con 11 determinaciones de valores de mediodía y 10 de preamanecer. El análisis de la temporada se llevó a cabo de acuerdo con valores medios de presión de vacío. La tercera variable de evaluación de estrés hídrico se realizó mediante el análisis de la relación isotópica de carbono sobre bayas deshidratadas.

### 3.5- Trabajo de campo y análisis estadístico

#### 3.5.1- Determinaciones realizadas en campo: estado hídrico del viñedo

Al inicio de enero, se procedió a marcar con cinta las plantas en las cuales se iban a realizar los ensayos de muestreo de baya y hojas. Dentro de cada parcela, se

eligieron cinco individuos sanos de las borduras, derecha e izquierda, de forma tal de minimizar los tiempos de recorrido. Se diagramó un camino con seis entradas, a fin de reducir tiempos de muestreo, orientación oeste-este. En el callejón principal se instaló la cámara de presión, con el tanque de provisión de nitrógeno, y se trasladaron las muestras foliares hacia la ubicación del equipo para realizar las lecturas. Se utilizó la técnica de Schölander (Schölander et al., 1965), en dos momentos del día: preamanecer ( $\Psi_{pd}$ ) y mediodía ( $\Psi_{md}$ ). El potencial hídrico estimado con la cámara de presión es el valor negativo de la presión requerida para comenzar a obtener líquido en la superficie expuesta del xilema a presión atmosférica (Boyer, 1967; Ritchie y Hinckley, 1975; Campbell, 1985; Turner, 1987; Kirkham, 2005, Busso 2008; Santesteban et al., 2021). Se utilizó una cámara de presión Modelo 2, marca Bio-control, escala de 0 a 4 MPa, Industria Argentina (Figura 12).



Figura 12. Cámara Schölander para medición de potencial hídrico foliar. Tanque verde es el suministro de  $N_2$ .

### 3.5.2- Potencial hídrico foliar preamanecer ( $\Psi_{pd}$ )

El estado hídrico del viñedo se determinó en 10 mediciones de preamanecer (Figura 13), en los días: 24-29-30-31/01/2020, 06-12-14-19/02 y 05-10/03/2020. Se iniciaron las experiencias a las 4:00 hs, para asegurarse que las plantas se habían rehidratado al máximo. Para las determinaciones se seleccionaron hojas sanas, enteras, de la parte media de la canopia. Se trasladaron hacia la cámara dentro de bolsas plásticas para conservar la humedad. A las hojas recién escindidas se les cortó el pecíolo para generar una superficie uniforme y lisa que permitió la visualización del flujo de savia. En cada determinación, se introdujo la hoja en la cámara, cuidando la

integridad de la misma. Una vez cerrado y sellado herméticamente, se introdujo nitrógeno gaseoso hasta que se percibió la aparición de agua en el extremo del pecíolo que quedó fuera de la cámara. En esta operación se necesitó el uso de linterna para facilitar la observación. Se detuvo el flujo gaseoso y se anotó la presión necesaria para la extracción del agua de acuerdo con la lectura del manómetro. Esa presión de equilibrio se corresponde con signo contrario al potencial hídrico de la planta. Se generó una planilla de registro de datos diarios y de temporada envero-vendimia.



Figura 13. Medición potencial hídrico foliar preamanecer. Fecha 31/01/2020. Valor de lectura -0.22 MPa.

### 3.5.3- Potencial hídrico foliar de mediodía ( $\Psi_{md}$ )

El estado hídrico del viñedo se determinó en 11 mediciones de mediodía (Figura 14), en los días: 23-24-29-30-31/01/2020, 04-12-14-19/02 y 05-10/03/2020. El día 06/02 se suspendió el ensayo debido a que se incrementó la nubosidad en ese horario. Se iniciaron las experiencias a las 12:00 hs, considerando las condiciones de mayor severidad. Para la determinación del potencial hídrico de mediodía se seleccionó una hoja madura, sana, de la zona media y asoleada por planta de acuerdo al diagrama de recorrido. Se cortó y trasladó rápidamente en doble bolsa, transparente y negra, al resguardo de la luz asegurando el cierre de los estomas de la hoja. El resto del procedimiento es idéntico al realizado en preamanecer.

Los procedimientos se realizaron en el período promedio de 1,25 horas desde la primera a la última medición, para minimizar la variabilidad de las condiciones ambientales.

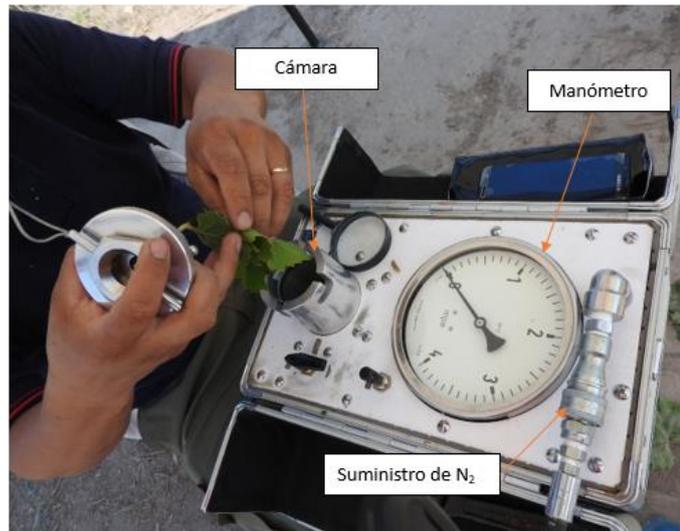


Figura 14. Medición de potencia hídrico foliar de mediodía. Procedimiento de carga de la hoja en cámara de presión, donde se evita la rotura de la misma.

### 3.5.4- Análisis de potencial hídrico foliar: Integral de estrés hídrico – Modelo lineales generales y mixtos

Para analizar todas las determinaciones de potencial hídrico foliar por parcela se planteó trabajar con tres metodologías: a) la integral de estrés hídrico ( $S\Psi$ ) (Myers, 1988), b) área del trapezoide y, c) análisis estadístico con modelo lineales generales y mixtos.

La  $S\Psi$  (3.1) expresa la intensidad del estrés experimentado por cada tratamiento integrando la duración del estado del agua por debajo de un valor máximo de  $\Psi_{pd}$  y  $\Psi_{md}$ . Se estimó a partir de  $t$  mediciones de potencial a intervalos de  $n$  días mediante la fórmula:

$$S\Psi = \left| \sum_{i=0}^{i=t} (\Psi_{(i,i+1)} - c) \cdot n \right| \quad (3.1)$$

Donde  $\Psi_{(i,i+1)}$  es el  $\Psi$  medio para cualquier intervalo  $i, i+1$  y  $c$  es la  $\Psi$  máximo medido durante el estudio. En este caso, para el valor  $c$  se utilizó el  $-0,08$  MPa en preamanecer y  $-0,85$  MPa para mediodía. El  $S\Psi$  se expresa en valores absolutos (MPa); los valores más altos representan un estrés hídrico más severo.

Por otro lado, se aplicó análisis estadístico con el programa InfoStat (InfoStat, 2008), a partir de aplicar modelos lineales generales y mixtos; se obtuvo una tabla de medias y errores estándares y una comparación múltiple entre medias del tipo LSD de Fisher (esta prueba está basada en una prueba de Wald) o la prueba de formación de grupos excluyentes DGC (Di Rienzo et al., 2002, 2012). En el mismo se consideraron todas las determinaciones por parcela, se seleccionó: el potencial hídrico como variable

respuesta, los días después de brotación (DDB) y tratamiento como criterio de clasificación, y bloque como covariable.

Por último, se aplicó la técnica de cálculo del área del trapecioide o método de exhaustión (Rey Pastor et al., 1958; Engler et al., 2020), siendo un procedimiento geométrico de aproximación a un resultado, con el cual el grado de precisión aumenta a medida que la partición de la norma tiende a cero. El procedimiento de cálculo se ajusta a las siguientes fórmulas:

$$a = \sum_{r=1}^n mr (x_r - x_{r-1}) \quad (3.2)$$

$$S = \sum_{r=1}^n Mr (x_r - x_{r-1}) \quad (3.3)$$

$$A = \sum_{r=1}^n \overline{mr} (x_r - x_{r-1}) \quad (3.4)$$

Donde  $\overline{mr}$

$$\overline{mr} = \frac{mr+Mr}{2} \quad (3.5)$$

Siendo:

a: área de sumas inferiores

S: área de sumas superiores

A: área de sumas media

### 3.6- Determinaciones de laboratorio: Caracterización de bayas

Para controlar el proceso de madurez de los viñedos, se realizaron los análisis de rutina de acuerdo a los procedimientos vigentes (Nazralla et al., 2009).

Debido a las características destructivas de los ensayos, se dispusieron cinco cepas por unidad experimental, distintas a las destinadas a medición de isótopos y potencial hídrico foliar, para realizar el seguimiento de bayas. Se llevaron a cabo los muestreos en las fechas: 23-30/01, 06-13-19-27/02 y 05-10/03; para disponer de variables auxiliares en el estudio. Los ensayos realizados fueron: peso de baya, sólidos solubles, pH y acidez total.

Las muestras se almacenaron en bolsas plásticas identificadas por parcela, Figura 15.



Figura 15. Muestreo de bayas para ensayos físico-químicos por parcela.

La muestra de bayas se conformó de 30 unidades, extraídas en forma aleatoria de los racimos de 5 plantas por unidad experimental. Se almacenó cada una, en bolsas plásticas rotuladas, evitando la rotura de los granos en el transporte al laboratorio. Se recortaron los pedúnculos de cada baya, se extrajeron contaminantes sólidos (hojas, tierra, etc.) y se pesaron en una balanza digital (Denver Instrument, modelo APX-203, de capacidad de 200 g., precisión 0.001 g, Estados Unidos), como se muestra en la Figura 16. Se registraron los pesos de muestras totales, y se calculó el peso de cada unidad mediante una planilla de cálculo.



Figura 16. Pesaje de muestra de 30 bayas en vendimia. Se observa la integridad de los granos, sanos, enteros y sin sustancias extrañas

### 3.6.1- Sólidos solubles

Una vez que se realizó el pesaje y se estimó el peso de baya, se procedió a realizar molienda manual de cada muestra dentro de cada bolsa plástica para evitar la contaminación cruzada. Se utilizó un refractómetro autocompensado por temperatura, (ATC-1E, ATAGO, Tokio, Japón), con resolución de lectura 0,1. La primera actividad, el calibrado, se realizó con agua destilada para ajustar a 0 el valor de referencia. Luego se secó el instrumento, se colocaron unas gotas de mosto, y se leyó el resultado es de lectura directa en el visor. Entre cada determinación, se limpió el aparato con agua destilada hasta registrar valor 0, y se secó suavemente con papel tissue. Todos los valores se registraron.

### 3.6.2- pH

El pH se determinó mediante un peachímetro digital (827PHLAB, METROHM, Herisau, Suiza). Previo a cada secuencia de mediciones, se calibró el instrumental con las soluciones buffer pH 4 y pH7, donde se tuvo la precaución de enjuagar bien el electrodo con agua destilada y secó con un papel tipo tissue por fuera. En un vaso de precipitado se molieron los granos de uva, se extrajo el líquido sobrenadante, y se introdujo el electrodo para tomar lectura directa de cada ensayo en el visor del equipo. Todos los datos se registraron en planillas.

La acidez del mosto de uvas, relacionado con el grado de disociación de los ácidos de la muestra, se reflejó en forma creciente durante la temporada enverovendimia.

### 3.6.3- Determinación de acidez total

Por cada determinación se realizó el siguiente procedimiento: del jugo generado en la molienda, se tomó 10 ml con pipeta doble aforo, y se colocó en un Erlenmeyer. Se agregó 40 a 50 mL de agua destilada, y 2 o 3 gotas de azul de bromotimol. Se llenó y enrasó una bureta con solución de NaOH N/10. Se tituló hasta viraje del indicador (verde azulado), y se registró el volumen de NaOH utilizado. Todos los valores se registraron.

Se calculó la acidez total de acuerdo a:

$$\text{Acidez total} \left( \text{g ácido tartárico} * \frac{\text{L}^{-1}\text{mosto}}{\text{vino}} \right) = 0.75 * n \quad (3.6)$$

Donde:

n: gasto en ml de la solución de NaOH N/10

### 3.7- Ratio isotópico de carbono ( $\delta^{13}C$ )

#### 3.7.1- Ensayo metodológico

Se desarrolló un ensayo metodológico para definir las variables críticas de proceso, establecer procedimientos de trabajo y ajustar el equipamiento e instrumental. El día 20 de febrero del 2020, se estableció en campo, mediante análisis de control visual de bayas, la fase de envero, con un 80% de bayas coloreadas. Se extrajeron muestras de cada unidad experimental, conformadas de 50 bayas completas con pedicelo, Figura 17. Se clasificaron por color y se calculó el porcentaje de envero de 81.2% (Figura 18). Se transportaron al laboratorio en bolsas plásticas identificadas y se priorizó la integridad para su proceso. Se les recortó el pedicelo y colocó en recipientes rotulados con fondo perforado para facilitar la circulación de aire. Se colocaron las muestras en las bandejas (Figura 19), y se secaron a  $T= 50^{\circ}C$  hasta peso constante (Martínez et al., 2009) y caudal de aire transversal, 19 Hz en horno deshidratador (Figura 20). El seguimiento de peso de bayas, se efectuó con balanza digital Denver Instrument, APX-203, capacidad 200 g, precisión: 0.001 g, Colorado, Estados Unidos. Se estimó una reducción de peso de bayas del 76.63% a las 50 hs. de secado; y 77.87% con 70 hs. Se determinó la actividad acuosa ( $a_w$ ) con equipo Rotronic Hygropalm, Rango de medición: 0 a 100% HR y  $-10$  a  $140.0^{\circ}F$  ( $14$  a  $140^{\circ}F$ ), precisión a  $73.4^{\circ}F: \pm 3,0\%$  HR y  $\pm 32.9^{\circ}$ , Suiza. Las muestras de bayas secas se introdujeron en cápsulas plásticas PS-40 durante 30 minutos, luego se colocaron en el equipo medidor y se leyó con el programa "aw quick" (error  $\pm 0,005 a_w$ ) (Figura 21). La humedad promedio alcanzó  $a_w= 0.24$ . La molienda de las mismas se realizó en molino de café de acero inoxidable, Moulinex, capacidad 50 gramos, potencia 180W, Argentina. Se logró obtener un fino polvo, y se envasaron en bolsas estériles con cierre hermético (Figura 22).



Figura 17. Recolección de muestra de baya, en fase envero 80% determinada por control visual de racimos en campo.



Figura 18. Muestra de parcela N°25, constituida en forma aleatoria por 50 bayas. Se observan las diferencias entre bayas coloreadas y verdes.



Figura 19. Bandeja de horno deshidratador con base perforada para favorecer la circulación de aire calefaccionado



Figura 20. Horno de circulación forzada ascendente, con capacidad para 11 bandejas.

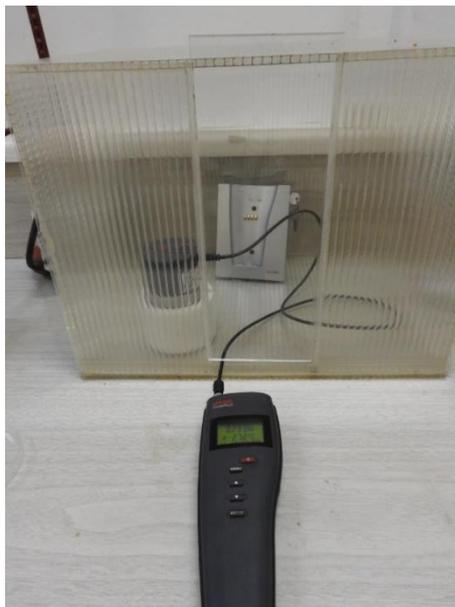


Figura 21. Equipo de determinación de actividad acuosa, Rotronic Hygropalm.



Figura 22. a) Bayas enteras y secas b) Polvo generado después de la molienda

### 3.7.2- Muestreo de bayas para determinación de ratio isotópico

El muestreo se realizó previo a vendimia, el día 10 de marzo de 2020. Para la medición de los isótopos estables se manipuló el material vegetativo con guantes de nitrilo para evitar contaminación cruzada (Figura 23). La muestra se conformó de 50 bayas con pedicelo, seleccionando 10 bayas por planta ubicadas en parte superior, media e inferior del racimo. Se prosiguió conforme al procedimiento aplicado en el ensayo metodológico, a excepción de la cantidad de horas de secado. Debido al incremento de azúcares complejos, fueron necesarias 187 hs para alcanzar el peso de la muestra constante y actividad acuosa promedio de 0.28. Se redujeron las bayas secas, pero el producto final no fue un fino polvo, como se obtuvo en fase de envero, sino una pasta.



Figura 23. Recolección de bayas con pedicelo, previo a vendimia 2020



Figura 24. Disposición de 50 bayas para el secado, en recipientes de base con malla antigranizo, para favorecer el proceso de deshidratado.

## Determinación de $\delta^{13}\text{C}$

La determinación de  $\delta^{13}\text{C}$ , se llevó a cabo en el Laboratorio de Isótopos Estables en Ciencias Ambientales, IDEVEA (UTN-FRSR & CONICET). Para la medición de isótopos estables, se pesó  $3 \pm 0,5 \mu\text{g}$  de muestra en balanza analítica Mettler Toledo AT20 10/2  $\mu\text{g}$  sobre microcápsula de estaño 6x4 mm de 97,5% de pureza. La medición se realizó con los valores de  $\delta^{13}\text{C}$ , y se calcularon utilizando el estándar V-PDB, mientras que el de  $\delta^{15}\text{N}$  se calcula con el estándar AIR (Samec *et al.* 2019). Las mediciones se obtuvieron con un espectrómetro de masas de flujo continuo Thermo Scientific DELTA V acoplado vía ConFlo IV al Analizador Elemental Flash 2000. Para este equipo la precisión analítica es de 0,1‰ para las relaciones isotópicas de carbono (V-PDB).

### 3.8- Determinaciones de variables auxiliares de microclima

Dada la importancia de analizar los cambios originados por los diferentes tipos de sistemas de colocación y color de malla antigranizo del ensayo, se tuvieron en cuenta las variables de microclima tales como: temperatura de canopia, humedad relativa y velocidad del viento.

#### 3.8.1- Temperatura y humedad relativa

La temperatura y humedad relativa fueron monitoreadas los mismos días que se realizaron las determinaciones de potencial hídrico foliar. Se empleó un termohigrómetros digitales transmisores con resolución de lectura en los sensores de 0,1°C y 1%; y precisión  $\pm 1,0$  °C y  $\pm 3,0$  % respectivamente (Klima Logger, TFA Dostmann GmbH & Co. KG, Wertheim - Reicholzheim, Alemania). Los mismos se colocaron fijos en la zona de los racimos de una planta representativa en cada unidad experimental (unidad observacional) protegidos de la luz directa y la lluvia; estuvieron conectados inalámbricamente a una estación meteorológica termo-higrométrica profesional base con data logger, con una frecuencia de transmisión de datos desde los transmisores a la estación base de 433 Mhz (Klima data 30.3015, TFA Dostmann GmbH & Co. KG, Wertheim - Reicholzheim, Alemania). La medición y registro de los datos en memoria se realizó cada treinta minutos y se descargaron a PC empleando software específico (TFA data Recorder 1.0, 2004) (Nahuel, 2013). Se construyeron curvas para caracterizar el comportamiento de la temperatura y humedad relativa en cada tratamiento, mediante el programa estadístico, InfoStat 2008

### 3.8.2- Velocidad del viento

Se midió la velocidad del viento el día 4 de febrero de 2020, en el interior de la canopia de una planta representativa en cada unidad experimental, a 20 cm por encima de la altura de los racimos y entre 1,3 y 1,5 m desde el suelo, debajo de la primera capa de hojas y en la cara sudeste del espaldero, debido a la mayor predominancia de los vientos desde esa dirección. En simultáneo, se registró la velocidad del viento fuera de la canopia (velocidad exterior), a 2 metros desde el nivel del suelo. Durante un período de 60 segundos se registró y se congeló el display para leer y registrar el valor de velocidad media del viento y máxima para ese periodo (Nahuel, 2013). Estas medidas se establecieron en cuatro horarios: 8:00 hs, 10:00 hs, 12:00 hs y 14:00 hs. Se utilizó un anemómetro digital de mano (3000, KESTREL, Chester PA, EEUU). Los datos se expresaron en m/s (datos de campo) y en valores relativos (%) respecto a la velocidad exterior.

Con la base de datos de los registros, se trabajó con velocidades mínimas, medias y máximas para canopia y exterior. Mediante el programa estadístico, InfoStat 2008, para cada velocidad, se efectuó un análisis factorial de los factores: sistema de colocación, color de la malla antigranizo y horario de la determinación, con covariable bloque. Para los efectos significativos, se analizaron los datos mediante modelos lineales generales y mixtos. Se analizaron los resultados del modelo, y se prestó principal atención al estudio de las medias ajustadas significativamente diferentes por tratamiento.

### 3.9- Análisis estadístico de los datos

Se realizó un análisis descriptivo preliminar de las variables respuestas, donde se estudió la distribución y forma de los indicadores. Se sometieron a análisis estadístico descriptivo y a pruebas de normalidad tales como el método gráfico para el diagnóstico de diferencias entre la distribución (QQ-plot) y test de Shapiro-Wilks modificado para determinar si el conjunto proviene de datos con distribución normal. Se realizaron análisis de homogeneidad de varianza. Posteriormente los datos se sometieron al análisis factorial mediante pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III). Finalmente, con las variables con p-valor significativos, se aplicó el análisis estadístico mediante modelos lineales generales y mixtos con factor bloquizado (bloque). Se analizaron las medias ajustadas, LSD Fisherm con un  $\alpha = 0,05$ , por tratamiento. El software estadístico que se utilizó fue Infostat, 2008, (Di Rienzo *et al.*, 2011).

## Capítulo 4

### RESULTADOS

#### 4.1- Condiciones climáticas

Para el diseño de riego, se trabajó sobre los valores de temperatura de precipitaciones históricas de la estación meteorológica INTA, y se complementó con la base de datos meteorológicos de la estación AERO San Rafael.

##### 4.1.1. Temperatura

Los valores de temperaturas máximas y mínimas durante el primer semestre del año 2020, respecto de los históricos demuestran las tendencias del cambio climático hacia valores significativamente superiores como se puede observar en la Figura 25. Esto implicó que, en los cálculos de lámina de riego, se tuvieron que realizar correcciones en función del avance de la temporada estival.

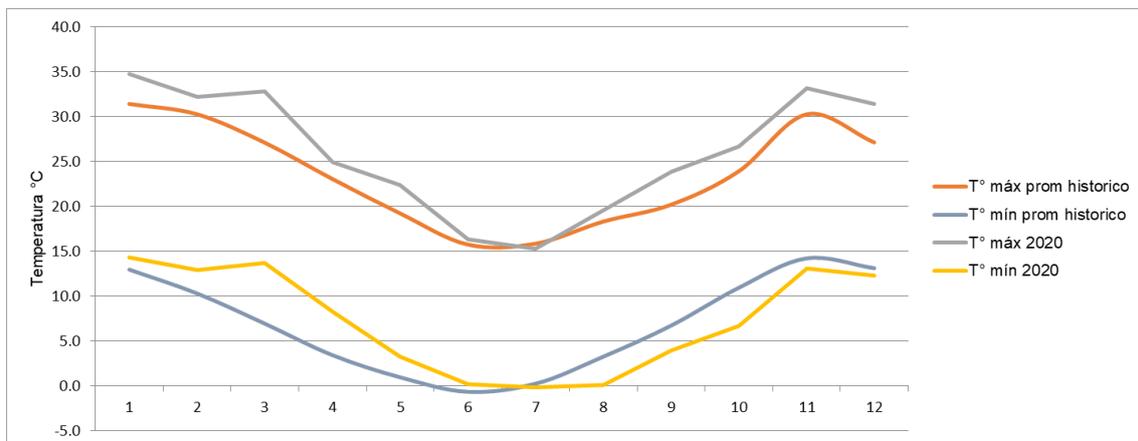


Figura 25. Curvas de evolución de temperaturas medias año 2020, respecto de medias históricas de registro INTA Rama Caída

En la tabla 3, se muestran las diferencias de las temperaturas máximas, mínimas y medias. Para los meses enero, febrero y marzo del año 2020, los incrementos en la temperatura máxima fueron de +3,3°C; +1,9°C y +5,7°C, respectivamente.

El tercer mes del ensayo, es el que mayor variación presentó; y se prestó principal atención para definir la fecha de toma de muestras y vendimia.

Los resultados son coincidentes con los modelos de predicción vigentes debido al cambio climático.

Tabla 3. Temperaturas medias históricas período 1950-2021 y año 2020

| MES     | Período            | Tmáx (°C) | Variación (°C) | Tmín (°C) | Variación (°C) | Tmedia (°C) | Variación (°C) |
|---------|--------------------|-----------|----------------|-----------|----------------|-------------|----------------|
| Enero   | Registro histórico | 31,4°C    | +3,3           | 14,2      | +0,1           | 22,8        | +1,7           |
|         | Año 2020           | 34,7      |                | 14,3      |                | 24,5        |                |
| Febrero | Registro histórico | 30,3      | +1,9           | 13,1      | -0,2           | 21,7        | +0,9           |
|         | Año 2020           | 32,2      |                | 12,9      |                | 22,6        |                |
| Marzo   | Registro histórico | 27,1      | +5,7           | 10,9      | +2,8           | 19          | +4,3           |
|         | Año 2020           | 32,8      |                | 13,7      |                | 23,3        |                |

#### 4.1.2. Precipitaciones

Durante el período de enero a marzo, las precipitaciones medias fueron muy inferiores respecto de las precipitaciones medias históricas, Figura 26. Con este indicador, se definió una temporada seca para el cultivo, y se realizaron ajustes en el modelo para comparar la cantidad de lámina de agua y asegurar la reposición del 100 % de la evapotranspiración del cultivo.

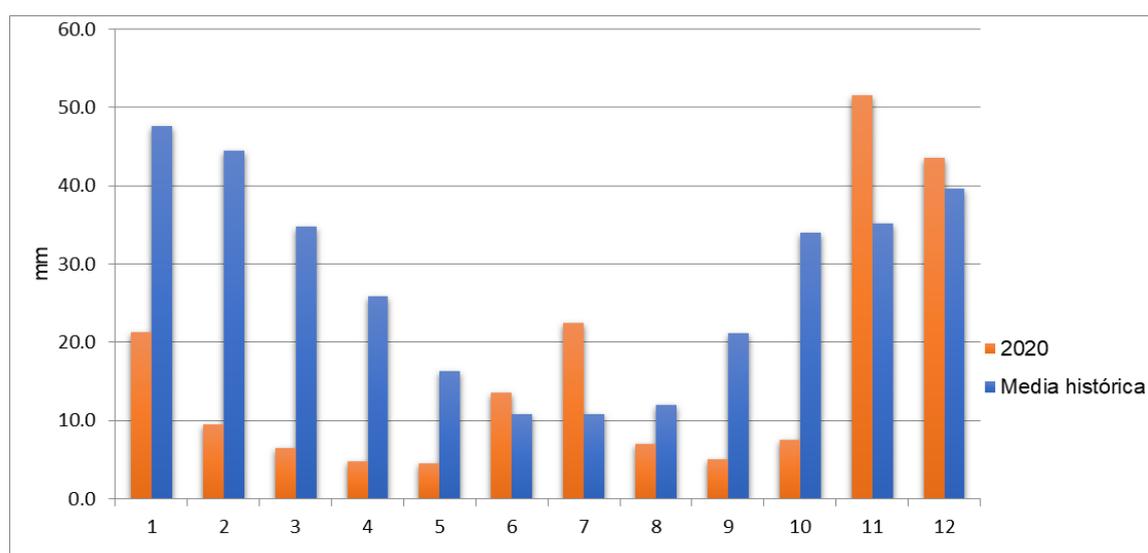


Figura 26. Gráfico de barras de precipitaciones medias mensuales expresadas en mm de agua, ordenados de enero a diciembre (1-12), color celeste registro histórico y anaranjado año 2020.

De acuerdo al análisis cuantitativo, los valores medios mensuales de precipitaciones respecto de los históricos, registran un descenso porcentual del 55% en enero, 78,6% en febrero y 81,3% marzo, de acuerdo a los valores de tabla 4, de los registros históricos del año 1927 hasta el año 2021. Lo anteriormente expuesto, se tuvo en cuenta en el cálculo de lluvia efectiva.

Tabla 4. Precipitaciones medias históricas del período 1927-2021 y año 2020.

| MES     | Período            | Prec. media (mm) | Variación (mm) |
|---------|--------------------|------------------|----------------|
| ENERO   | Registro histórico | 47,6             | -26,3 mm       |
|         | Año 2020           | 21,3             |                |
| FEBRERO | Registro histórico | 44,5             | -35 mm         |
|         | Año 2020           | 9,5              |                |
| MARZO   | Registro histórico | 34,8             | -28,3 mm       |
|         | Año 2020           | 6,5              |                |

#### 4.2- *Diseño y programación de riego por goteo*

El aporte de agua de riego, se realiza en función de la evapotranspiración del cultivo. La evaporación es el proceso por el cual el agua líquida se convierte en vapor de agua (vaporización) y se retira de la superficie evaporante (remoción de vapor). Para cambiar el estado de las moléculas del agua de líquido a vapor se requiere energía. La radiación solar directa y, en menor grado, la temperatura ambiente del aire, proporcionan esta energía. La fuerza impulsora para retirar el vapor de agua de una superficie evaporante es la diferencia entre la presión del vapor de agua en la superficie evaporante y la presión de vapor de agua de la atmósfera circundante. A medida que ocurre la evaporación, el aire circundante se satura gradualmente y el proceso se vuelve cada vez más lento hasta detenerse completamente si el aire mojado circundante no se transfiere a la atmósfera o en otras palabras no se retira de alrededor de la hoja. El reemplazo del aire saturado por un aire más seco depende grandemente de la velocidad del viento. Por lo tanto, la radiación, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y la velocidad del viento son parámetros climatológicos a considerar al evaluar el proceso de la evaporación. A continuación, se describe el procedimiento analítico para el cálculo de la lámina de riego en función de las características de clima, suelo y cultivo; de acuerdo a FAO 56 (Allen *et al.*, 2006).

De acuerdo al análisis de los incrementos de temperaturas máximas y mínimas, en conjunto con el descenso de las precipitaciones, se definieron las condiciones correspondientes a un clima árido. Es por ello que el aporte de lluvias, no se consideró en el cálculo y programación de riego como establecen los procedimientos.

##### 4.2.1- Simulación en CROPWAT 8.0

El programa calculó la ET<sub>c</sub>, evapotranspiración del cultivo en condiciones estándar, de acuerdo a la ecuación (4.1). En el simulador se trabajó en las interfaces: clima, con el cálculo de la ET<sub>o</sub>; precipitaciones para efectuar el balance hídrico; cultivo

para determinar el  $K_c$  en función de las condiciones climáticas; caracterización de suelo con aportes del simulador Soil Water Characteristics; requerimientos de lámina de agua calculada por el simulador y por último, se estableció el programa de riego con los aportes de lámina de agua y frecuencia de dosificación.

$$ET_c = K_c * ET_o \quad (4.1)$$

El cálculo detallado de la  $ET_c$  y programa de riego se expone en el anexo 1.

#### 4.3- Variables auxiliares: caracterización de microclima

##### 4.3.1- Temperatura de canopia

##### 4.3.1.1- Registro de temperaturas de canopia y ambiente

Durante la temporada 2020, se registraron 48 determinaciones diarias espaciadas cada 30 minutos. Según los datos registrados en la estación experimental existe gran amplitud térmica entre horarios de la mañana y la tarde, como se observa en la Figura 27, coincidente con las características de climas desérticos. Los valores de temperatura de canopia se expresan como la temperatura de microclima.

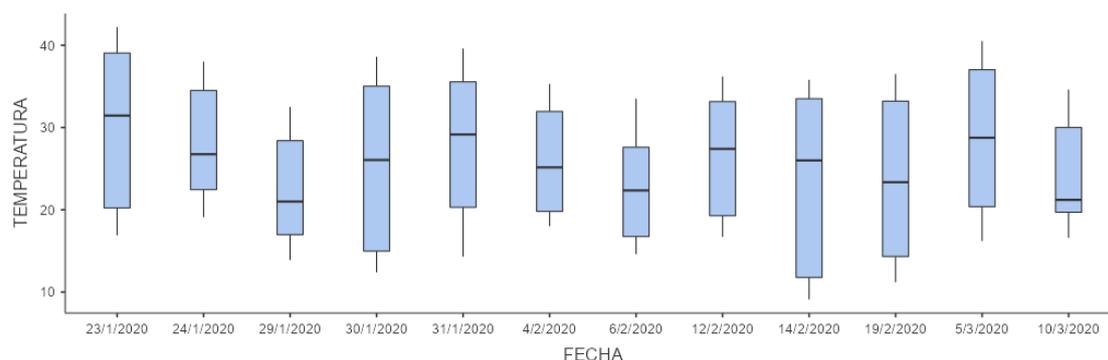


Figura 27. Box-plot de temperaturas ambiente temporada 2020 para los días de determinación de potencial hídrico foliar.

Todos los valores de temperatura de canopia máximas y medias, fueron superiores respecto de las temperaturas de ambiente medias para el año 2020, y de acuerdo al registro histórico de la estación experimental INTA. En la tabla 5 también se observan los datos históricos del período 1950-2021 y año 2020 de la estación meteorológica INTA Rama Caída, San Rafael, Mendoza. Las variaciones más altas de temperatura de microclima son en función de las temperaturas máximas. Comparando la temperatura de canopia de los meses de ensayo con los valores de clima históricos y del año 2020, el microclima tiene incrementos de +10,8°C y +7,5°C (enero); +6,2°C y 4,3°C (febrero); +13,4°C y +7,7°C (marzo). De acuerdo a los valores medios, también se obtuvieron temperaturas superiores para microclima, con variaciones de: +4°C y +2,3°C (enero); +2,7°C y +1,8°C (febrero); +7,3°C y +3°C (marzo).

Tabla 5. Valores de temperatura medias del sitio de estudio (según datos históricos), - año 2020) y microclima.

| MES     | Período                              | Tmáx (°C) | Tmín (°C) | Tmedia (°C) |
|---------|--------------------------------------|-----------|-----------|-------------|
| ENERO   | Temperatura (datos históricos)       | 31,4      | 14,2      | 22,8        |
|         | Temperatura ambiente, temporada 2020 | 34,7      | 14,3      | 24,5        |
|         | Temperatura del aire: Microclima     | 42,2      | 12,4      | 26,8        |
| FEBRERO | Registro histórico                   | 30,3      | 13,1      | 21,7        |
|         | Año 2020 – T clima                   | 32,2      | 12,9      | 22,6        |
|         | Año 2020 – T microclima              | 36,5      | 9,1       | 24,4        |
| MARZO   | Registro histórico                   | 27,1      | 10,9      | 19          |
|         | Año 2020 – T clima                   | 32,8      | 13,7      | 23,3        |
|         | Año 2020 – T microclima              | 40,5      | 16,2      | 26,3        |

El valor de temperatura mínimo en canopia, para la temporada, se registró el día 14/02/2020 a las 7:00 hs, con 9,06°C; y el valor máximo el día 23/01/2020, alcanzando los 42,25°C. En esta fecha, se destacan valores extremos superiores a los 40 °C, sostenidos desde las 13:30 hs hasta las 19:00 hs. A continuación, se pueden observar las amplitudes térmicas diarias que caracterizan las condiciones climáticas de la región. Las variaciones medias marcaron los 29,8°C (enero); 27,4°C (febrero) y 24,3°C (marzo).

#### 4.3.1.2- Análisis estadístico de Tmáxima, Tmínima y Tmedia de canopia

Se sabe que la presencia de mallas antigranizo, modifica las condiciones microclimáticas en torno a la canopia. Se evaluaron los factores sistema de instalación, color de la malla antigranizo y la interacción de los mismos. Se realizó un análisis factorial para evaluar la influencia de cada uno en el estado hídrico de los viñedos. De acuerdo a la tabla 6, para la temperatura máxima el color y el sistema de instalación obtuvieron p-valor significativos (<0,05), lo cual indica que ambos factores influyen en la variabilidad de temperatura máxima. En el caso de temperatura media, únicamente el sistema de instalación de la malla antigranizo afectaría.

Tabla 6. Resultado factorial para temperaturas máximas y medias de canopia. El factor sistema es significativo para ambas variables

|               | Tmáx  |         |         | Tmed  |         |         |
|---------------|-------|---------|---------|-------|---------|---------|
|               | denDF | F-value | p-value | denDF | F-value | p-value |
| (Intercept)   | 117   | 9413,95 | <0,0001 | 117   | 5359,52 | <0,0001 |
| Color         | 117   | 7,73    | 0,0063  | 117   | 0,87    | 0,3540  |
| Sistema       | 117   | 32,14   | <0,0001 | 117   | 59,87   | <0,0001 |
| Color:Sistema | 117   | 2,27    | 0,1348  | 117   | 0,35    | 0,5549  |

Se complementó el análisis estadístico con modelos lineales generales y mixtos, a fin de comparar las medias ajustadas para cada factor significativo. Como se observa

en la tabla 7, las temperaturas máximas se ven afectadas por el color y el sistema. Ambos factores indican diferencias significativas entre el testigo y cada uno de los colores en estudio. La mayor temperatura corresponde al testigo, con un valor medio para la temporada de 35,08°C; seguido del color perla con 34,37°C; y la mejor condición con el color negro con 34,14°C. Sin embargo, para las temperaturas medias, el sistema Grembiule modificado se comportó semejante al testigo. Asimismo, para esta variable el sistema Grembiule presenta la menor temperatura, pero las diferencias no superan a 1°C.

Tabla 7. Resultados de modelos lineales generales y mixtos para la temperatura máxima de canopia (color y sistema) y temperatura media (sistema). Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )

| Tmáx-Medias ajustadas y errores estándares para Color.TE |        |      |   | Tmáx-Medias ajustadas y errores estándares para Sistema.TE |        |      |   | Tmed-Medias ajustadas y errores estándares para Sistema.TE |        |      |   |
|--|--------|------|---|--|--------|------|---|--|--------|------|---|
| LSD Fisher (Alfa=0,05)                                   |        |      |   |  |        |      |   |  |        |      |   |
| Color.TE   | Medias | E.E. |   | Sistema.TE   | Medias | E.E. |   | Sistema.TE   | Medias | E.E. |   |
| TE   | 35,08  | 0,36 | a | TE   | 35,08  | 0,36 | a | TE   | 23,84  | 0,33 | a |
| Perla  | 34,37  | 0,35 | b | Modificado   | 34,56  | 0,36 | b | Modificado   | 23,92  | 0,32 | a |
| Negro  | 34,14  | 0,35 | c | Grembiule  | 34,06  | 0,35 | c | Grembiule  | 23,45  | 0,32 | b |
| p-valor = 0,0063   |        |      |   | p-valor<0,0001   |        |      |   | p-valor<0,0001   |        |      |   |

En la figura 28, se muestra el análisis global de los datos de acuerdo al factor color de la malla antigranizo para las temperaturas máximas y medias de canopia. Se observó mayor variabilidad en la temperatura máxima de canopia. El testigo presentó para todas las determinaciones, temperaturas superiores respecto de las cepas con protección antigranizo.

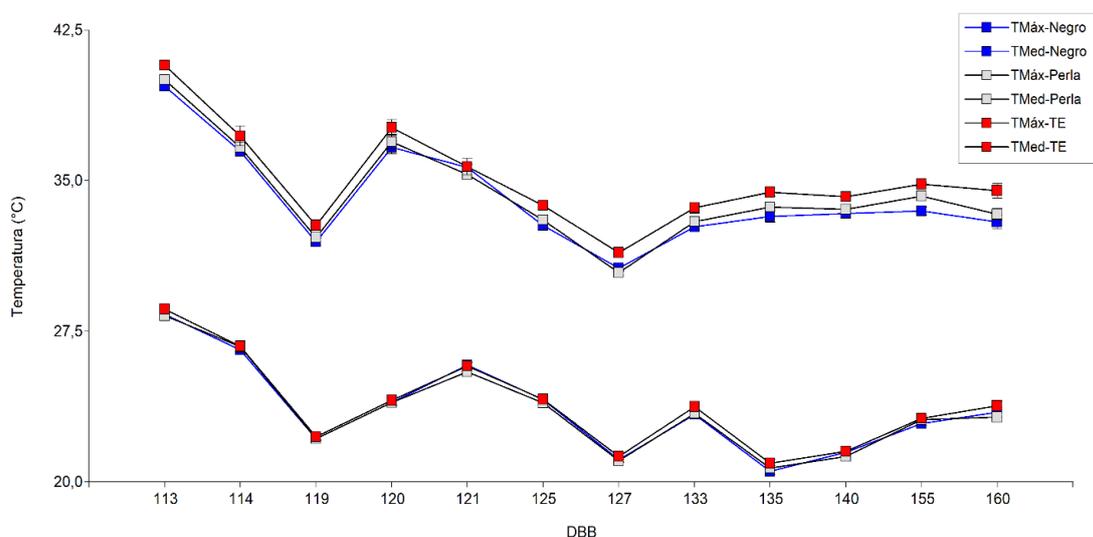


Figura 28. Evolución de la temperatura de laire en la canopia (°C) registrada en los distintos tratamientos cv. Malbec. para el factor color. Curva roja: testigo; azul: color de malla antigranizo negra y gris: color de malla antigranizo perla.

La curva para el color de malla antigranizo perla, se ubica en una región intermedia, y por debajo la correspondiente al color de malla antigranizo negra. En las curvas de temperaturas medias, se identifican puntos solapados para los valores del tratamiento testigo y malla de color perla. Coincidente con el análisis estadístico.

Para las temperaturas mínimas de canopia, el análisis estadístico demostró diferencias significativas por tratamiento. Donde las parcelas pertenecientes al sistema de colocación Grembiule modificado color negro, obtuvieron los valores más altos; frente las vides protegidas con malla antigranizo negra con sistema Grembiule, Tabla 8.

Tabla 8. -Medias ajustadas y errores estándares para Tratamiento LSD Fisher (Alfa=0,05). NM, Sistema de colocación Grembiule modificado color negro; PM, sistema de colocación Grembiule modificado color perla; TE, testigo; PG, sistema de colocación Grembiule color perla y NG, sistema de colocación Grembiule color negro

| Trat   | Medias | E.E. |   |
|--|--------|------|---|
| NM   | 13,80  | 0,43 | a |
| PM   | 13,41  | 0,43 | b |
| TE   | 13,21  | 0,43 | c |
| PG   | 12,99  | 0,43 | d |
| NG   | 12,81  | 0,43 | e |
| p-valor<0,0001   |        |      |   |
| Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ ) |        |      |   |

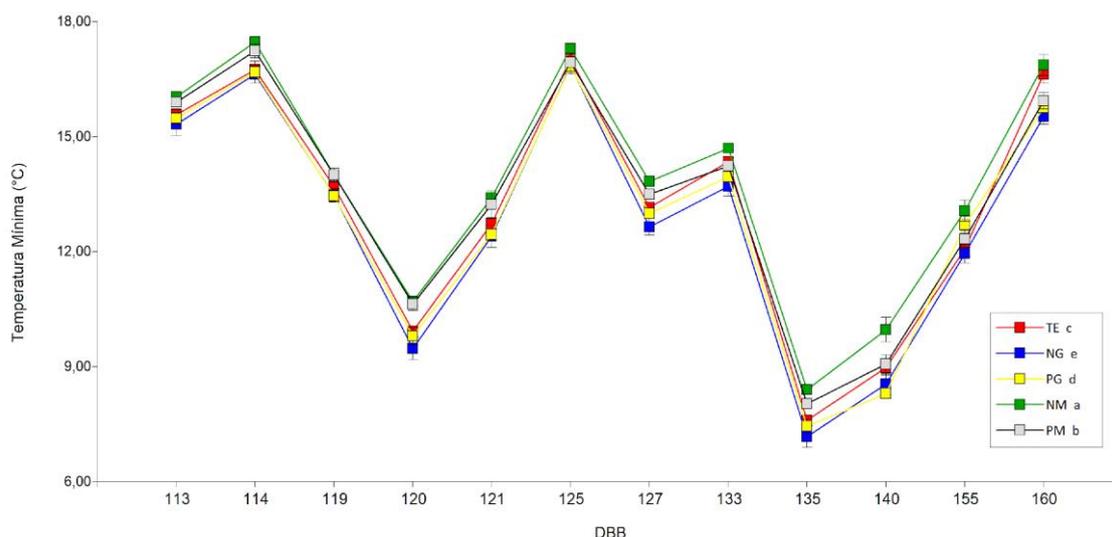


Figura 29. Evolución de la temperatura de canopia (°C) registrada en los distintos tratamientos cv. Malbec.

En la gráfica de evolución para la temporada envero-vendimia 2020, figura 29; se observan curvas de temperatura mínima diferenciadas por tratamiento. Los tratamientos con malla de color perla, presentan la misma tendencia que el testigo, con valores intermedios. Asimismo, esta variable no tendría influencia en el estrés hídrico, dado que son valores inferiores al rango de temperatura donde las cepas activan los mecanismos de cierre estomático.

#### 4.3.2- Humedad relativa

##### 4.3.2.1- Humedad relativa máxima y media

La humedad relativa se registró cada 30 minutos para 12 fechas comprendidas entre el 25 de enero y el 10 de marzo del año 2020. El factor significativo en el análisis estadístico fue el sistema de instalación de malla antigranizo, así como lo fue en el estudio de temperaturas de canopia; y el color de la malla antigranizo. De acuerdo a los valores de p-valor de  $<0,0001$  y  $0,0084$  respectivamente.

Se observa en la figura 30, que durante el monitoreo las curvas de humedad relativa media en función del sistema de instalación, presentan valores similares para el sistema Grembiule y Grembiule modificado. Las medias para cada factor no presentaron diferencias significativas, con  $54,40\%$  y  $54,78\%$  respectivamente. El valor mínimo fue para el testigo con  $53,09\%$ . Para el caso de la humedad relativa máxima, el sistema de instalación Grembiule modificado se comportó similar al testigo. La humedad máxima corresponde al factor Grembiule, con un valor medio de  $82,47\%$ .

En la figura 31, se analizó la evolución de la humedad relativa del aire en función del factor color. Para valores máximos, las condiciones de las cepas protegidas con mallas color negro, fueron semejantes al testigo. Los valores máximos se alcanzaron con el color perla, con un valor promedio de  $82,83\%$  graficado en color gris.

En el caso de la humedad relativa media, las curvas indican que los mayores valores se registraron en cepas protegidas con color de malla perla. Un comportamiento intermedio las cepas con cobertura color negro, y los mínimos en cepas testigo.

El análisis estadístico refuerza este comportamiento en función del tiempo, con valores medios de humedad relativa media:  $54,96\%$  (perla);  $54,14\%$  (negro) y  $53,09\%$  (testigo).

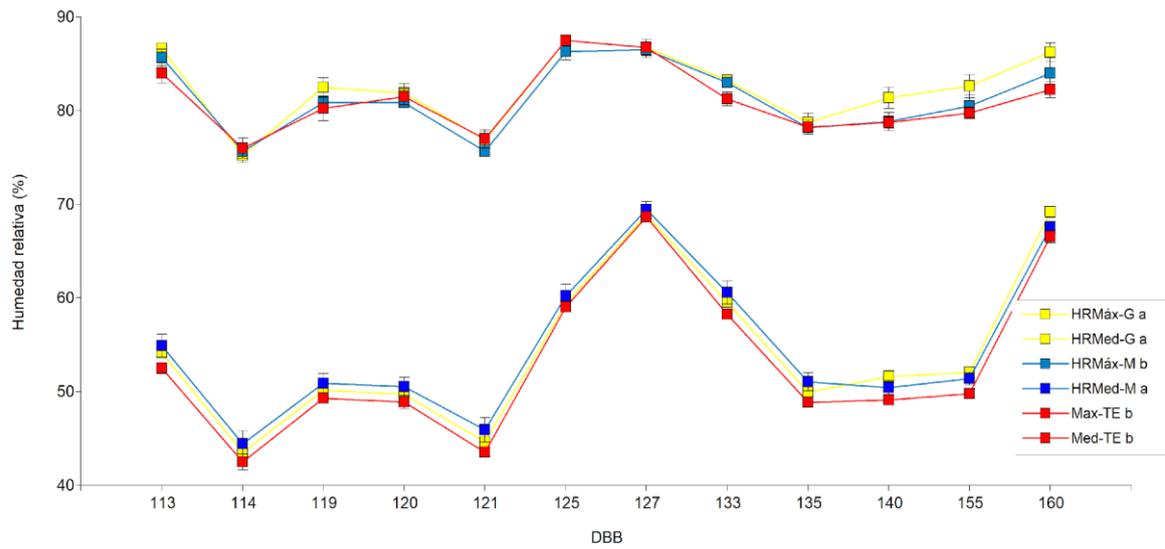


Figura 30. Comportamiento de la humedad relativa (%) máxima y media diaria registrada para los distintos sistemas de colocación de la malla antigranizo en viñedos cv. Malbec, en el interior de la canopia. Color de curva amarillo: sistema Grembiule, color azul: Grembiule modificado y rojo: testigo.

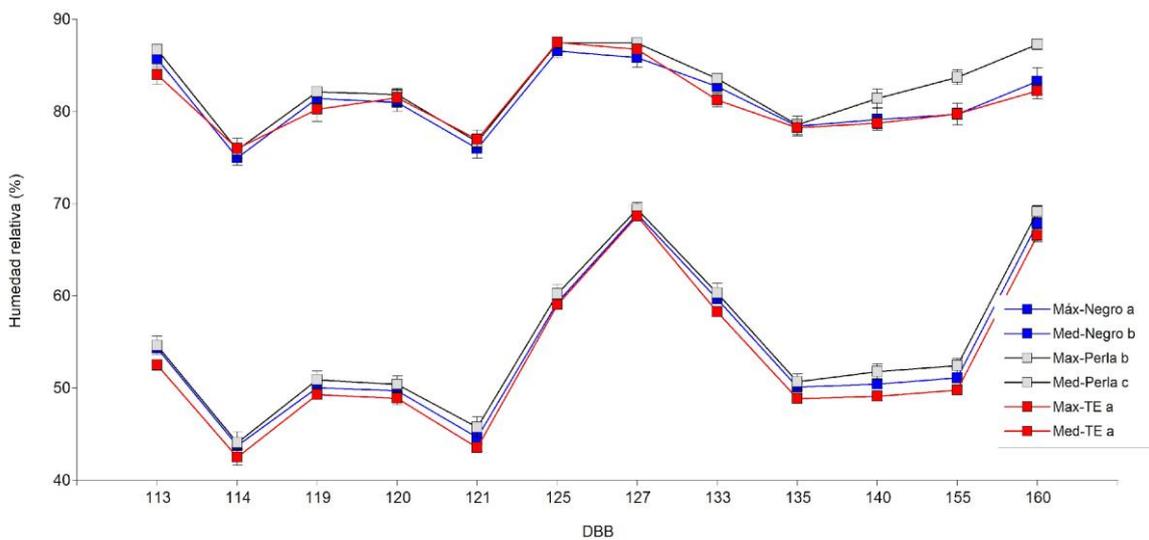


Figura 31. Comportamiento de la humedad relativa (%) máxima y media diaria registrada para los distintos colores de la malla antigranizo en viñedos cv. Malbec, en el interior de la canopia. Color de curva gris: malla perla, color azul: malla negra y rojo: testigo

#### 4.3.2.2- Humedad relativa mínima

La evolución de la humedad relativa mínima diaria se encuentra representada en la Figura 36. Se identificaron los valores mínimos en testigo, sin protección de malla antigranizo. Los tratamientos Negro Grembiule (NG), Negro Modificado (NM) y Perla

Modificado (PM) se comportaron con medias significativamente similares. El tratamiento Perla Grembiule (PG), tiene valores medios de humedad relativa mínima.

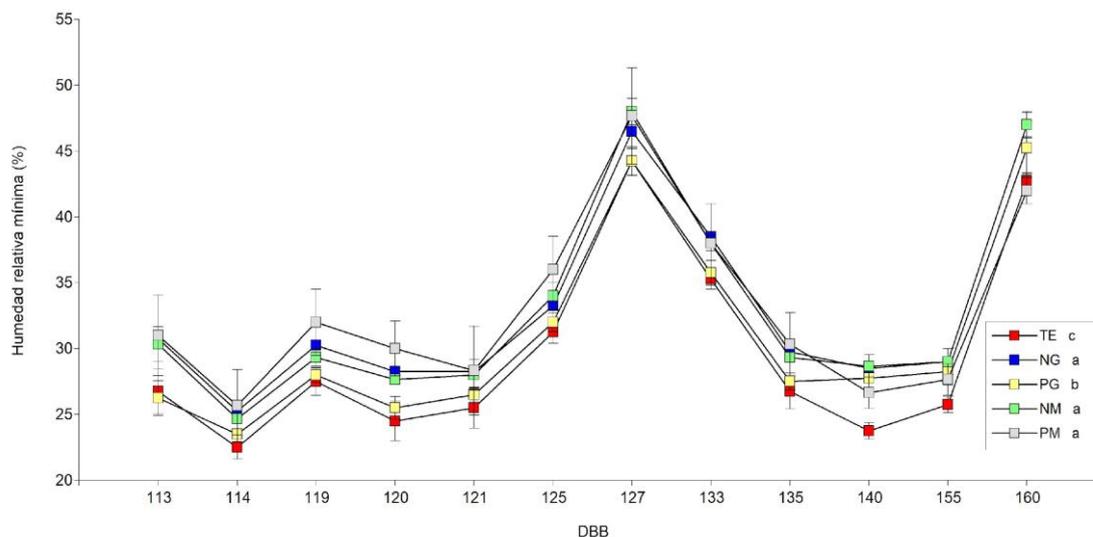


Figura 32. Comportamiento de la humedad relativa (%) mínima registrada para los distintos tratamientos realizados en los viñedos cv. Malbec, en el interior de la canopia, desde el 25-01-2020 (DDB 113) hasta el 10-03-2020 (DDB 160).

#### 4.3.2.3- Coeficiente de correlación y probabilidad HR vs T

Dado que la presencia de mallas antigranizo modificó los valores de temperatura de canopia y humedad relativa, respecto del tratamiento testigo, se analizó la correlación entre ambas variables y sus diferentes niveles (máximos, medios y mínimos). En general el testigo presentó mayores valores de temperaturas y menor porcentaje de humedad.

En la tabla 9, se observa las correlaciones entre las variables de HR y T. Para las humedades máximas, medias y mínimas, se muestran altos coeficientes de Pearson, mayores a 0,5, que indican una correlación fuerte entre las variables. Para el caso de las temperaturas, la relación entre la temperatura máxima y media de canopia por tratamiento, es débil; pero las restantes combinaciones de los niveles de temperaturas están altamente correlacionadas como era de esperarse.

Se destaca la correlación negativa fuerte entre temperatura máxima y humedad relativa mínima y media, con -0,55 y -0,49. En general, el análisis indica una correlación débil entre humedad y temperatura. Podría deberse a que la modificación de la velocidad del viento, sería otra variable a tener en cuenta.

Tabla 9. Correlación de Pearson. Coeficientes\Probabilidades. Variables: Temperatura máxima, media y mínima de canopia (Tmáx, Tmed y Tmín). Humedad Relativa máxima, media y mínima de canopia (HRmáx, HRmín, HRmed).

|       | Tmáx         | Tmed | Tmín  | HRmáx   | HRmín   | HRmed   |
|-------|--------------|------|-------|---------|---------|---------|
| Tmáx  | 1,00         | 0,04 | 0,00  | 2,2E-03 | 0,00    | 0,00    |
| Tmed  | 0,14         | 1,00 | 0,00  | 1,2E-04 | 6,3E-05 | 2,7E-05 |
| Tmín  | 0,82         | 0,61 | 1,00  | 0,16    | 9,6E-07 | 2,2E-06 |
| HRmáx | -0,21        | 0,26 | -0,10 | 1,00    | 0,00    | 0,00    |
| HRmín | <b>-0,55</b> | 0,27 | -0,33 | 0,54    | 1,00    | 0,00    |
| HRmed | <b>-0,49</b> | 0,28 | -0,32 | 0,75    | 0,93    | 1,00    |

#### 4.4- Velocidad del viento

De acuerdo a estudios similares con coberturas plásticas, se sabe que la presencia de mallas antigranizo en los viñedos genera una reducción en la velocidad del aire de circulación. El estudio de velocidad del viento se fijó en el día 4 de febrero del 2020. Se comprobó una reducción significativa en las velocidades medias de canopia, respecto de las vides sin protección antigranizo (TE).

Para el factor sistema de instalación, de acuerdo a la tabla 10, se observó que las vides con malla antigranizo tipo Grebiule, tuvieron una reducción del viento muy importante. Respecto del tratamiento testigo, en promedio hubo una disminución del 64,2%. Para las cepas con el sistema modificado Grebiule Modificado, la baja en la velocidad del aire fue levemente inferior, con un descenso del 59,5% respecto de las condiciones ambientales.

Tabla 10. Velocidad media en canopia (m/s). Medias ajustadas y errores estándares para cada hora. LSD Fisher (alfa=0,05). p-valor= 0,0194. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ ).

| Sistema             | Medias | E.E. |   |
|---------------------|--------|------|---|
| TE                  | 1,09   | 0,04 | a |
| Grebiule Modificado | 0,77   | 0,03 | b |
| Grebiule            | 0,68   | 0,03 | c |

Para conocer si la velocidad del viento fue una fuente de variabilidad para las determinaciones de potencial hídrico foliar de mediodía, se evaluó estadísticamente si había cambios significativos en los mismos. Para la velocidad media en canopia, se examinaron las variables horario de determinación y el tratamiento, de acuerdo al análisis factorial aplicado. En los horarios de 10 a 14, no se evidencian diferencias significativas entre las medias (Tabla 11). Este comportamiento de la circulación del aire,

favorece la determinación de potencial hídrico foliar de mediodía (12 a 13:00 hs) ya que no sería una fuente de variación.

Tabla 11. Velocidad media en canopia (m/s). Medias ajustadas y errores estándares para cada hora. LSD Fisher (alfa=0,05). p-valor= 0,0004. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ ).

| Hora (hs) | Medias | E.E. |   |
|-----------|--------|------|---|
| 8         | 0,62   | 0,05 | a |
| 10        | 0,85   | 0,05 | b |
| 12        | 0,83   | 0,05 | b |
| 14        | 0,89   | 0,05 | b |

#### 4.5- Composición de bayas

Debido a que las mallas antigranizo modifican las condiciones microclimáticas de las vides, se registraron variables físico-químicas de bayas durante la temporada envero-vendimia, para estimar la afectación en la calidad de las uvas. Se determinaron ensayos de rutina tales como: peso de baya, composición de sólidos solubles, pH y acidez titulable total. Se realizó un estudio de las curvas de evolución para cada variable y un análisis estadístico para evaluar si los factores: sistema de instalación y/o color de malla antigranizo, eran fuentes de variación en alguna de las variables de composición.

##### 4.5.1- Evolución de peso de bayas

De acuerdo al análisis factorial, tabla 12, se determinó que el color fue estadísticamente significativo, con un p-valor=0,0446. No así el sistema de instalación (p-valor=0,3781), ni la interacción de ambos factores (p-valor=0,4571).

Tabla 12. Resultado de análisis factorial para el peso de una baya.

| Peso de 1 baya | numDF | denDF | F-value  | p-value |
|----------------|-------|-------|----------|---------|
| (Intercept)    | 1     | 152   | 11526,45 | <0,0001 |
| Color          | 1     | 152   | 4,10     | 0,0446  |
| Sistema        | 1     | 152   | 0,78     | 0,3781  |
| Color:Sistema  | 1     | 152   | 0,56     | 0,4571  |

Se aplicó el análisis de modelo lineal general y mixto, para el factor color; con la presencia del testigo, y se obtuvieron diferencias significativas entre las medias, tal como se muestra en la tabla 13. Donde las uvas desarrolladas bajo malla antigranizo de color perla, obtuvieron mayor tamaño, con peso medio= 1,37 gramos. Las de menor peso fueron las bayas del tratamiento testigo.

Tabla 13. Resultado de modelos lineales generales y mixtos para el peso de una baya, para el factor color. Medias con letras iguales no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ ).

| Color.TE | Medias | E.E. |   |
|----------|--------|------|---|
| Perla    | 1,37   | 0,02 | a |
| Negro    | 1,32   | 0,02 | b |
| TE       | 1,23   | 0,03 | c |

El análisis de datos mostró diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos. De acuerdo a la Figura 33, durante las fechas en que se realizó muestreo, las curvas de evolución muestran la misma tendencia. Donde los valores mínimos para todas las determinaciones, correspondieron al tratamiento testigo (curva roja). Levemente superior, se ubicó el tratamiento NG. Los tratamientos PG y NM, evolucionaron en forma similar durante la temporada envero-vendimia. Y el tratamiento PM, presentó los mayores valores de peso durante la mayoría de las determinaciones. A excepción de inicio y fin de temporada, donde los pesos superiores se registraron en bayas del tratamiento PG.

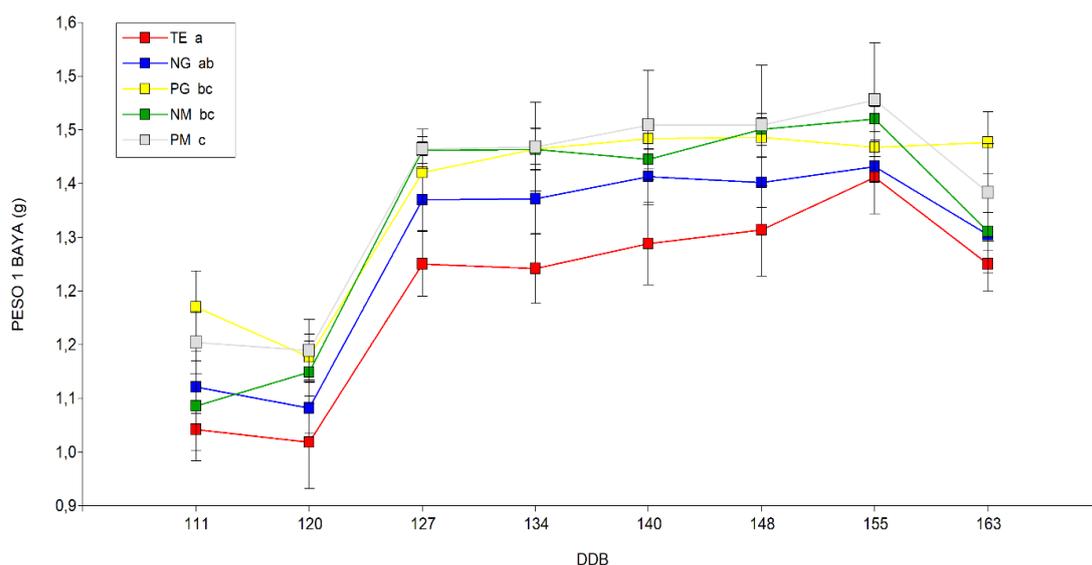


Figura 33. Evolución del peso de una baya (g) registrada, en los distintos tratamientos cv. Malbec, desde 23-01-2020 hasta 13-03-2020. Las barras indican error estándar.

#### 4.5.2- Evolución de sólidos solubles (° Brix)

La evolución del nivel de sólidos solubles en baya se muestra en la figura 34. El análisis de datos no mostró diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos, en ninguna de las fechas en que se realizó muestreo. Se observan tendencias de variación a lo largo de la temporada con comportamiento similar de acuerdo a color de malla antigranizo, que se diferencian de las vides sin protección antigranizo (TE).

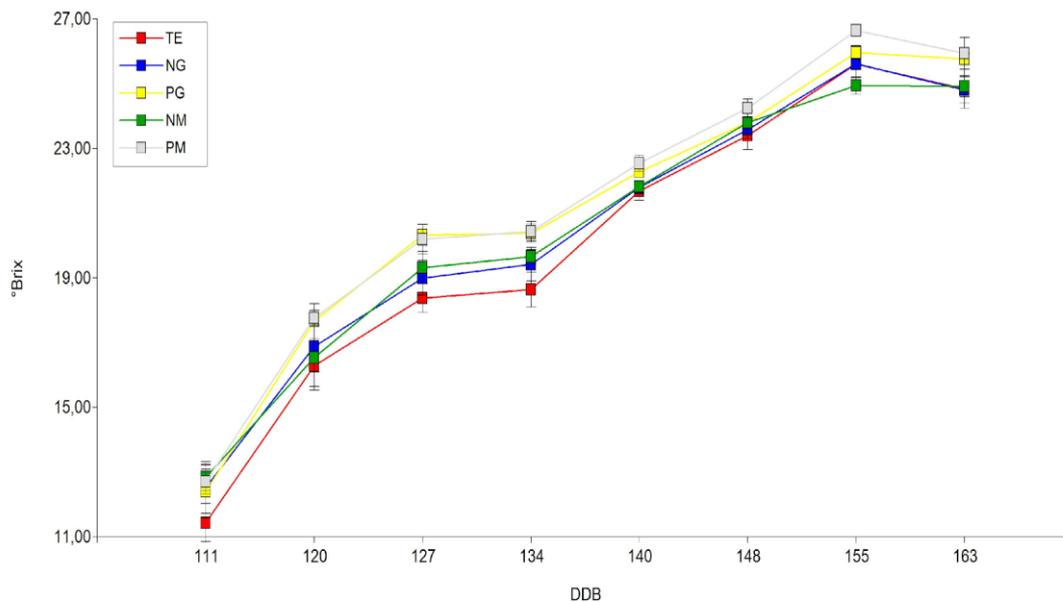


Figura 34. Evolución del contenido de sólidos solubles en baya (°Brix) registrada, en los distintos tratamientos cv. Malbec, desde 23-01-2020 hasta 13-03-2020. Las barras indican error estándar.

#### 4.5.3- Evolución de pH

La evolución del pH, no mostró diferencias significativas entre tratamientos para ninguna de las fechas de muestreo (Figura 35).

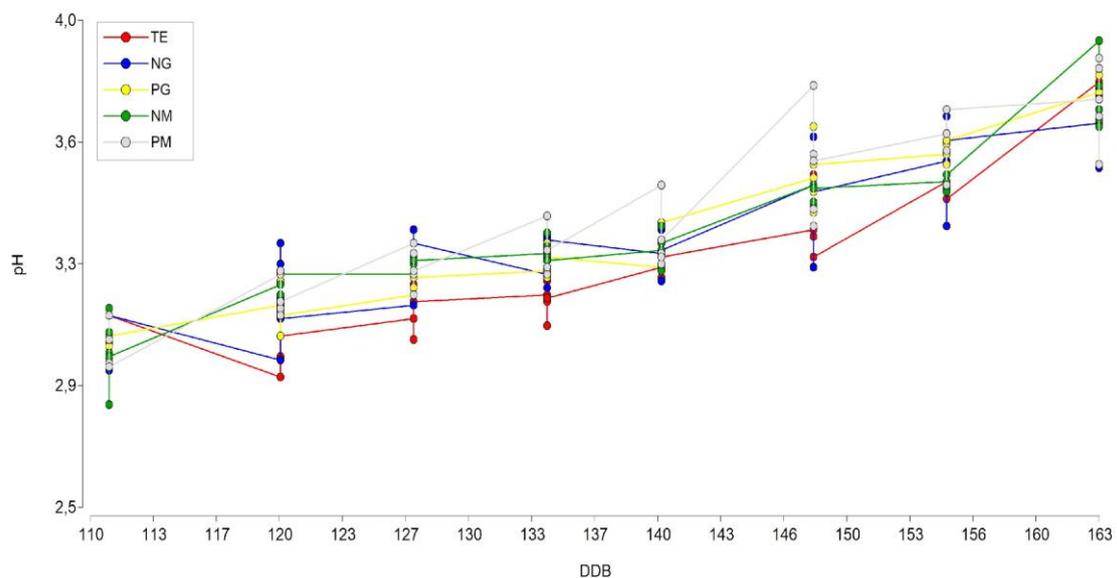


Figura 35. Evolución de la dispersión del pH registrado en los distintos tratamientos cv. Malbec, desde 23-01-2020 hasta 13-03-2020.

En las curvas se observa que el comportamiento de las cepas testigo, mostró valores mínimos de pH durante la temporada envero-cosecha. La influencia del color de

la malla perla, se observa en las curvas de los tratamientos PG y PM, donde los valores mínimos se observan en este último.

#### 4.5.4- Evolución de acidez total (g/L ácido tartárico)

La evolución de la acidez total no mostró diferencias significativas entre las medias de los tratamientos para la temporada 2020 (Figura 36). Al inicio del invierno, se observaron variaciones en los contenidos de ácido tartárico de las bayas, con valores más elevados en las cepas testigo, y menor cantidad en los tratamientos de las vides con mallas de color perla. A mediados del mes de febrero, el proceso madurativo de los frutos se unificó hasta alcanzar los 4,4 g/L en promedio de acidez total en cosecha.

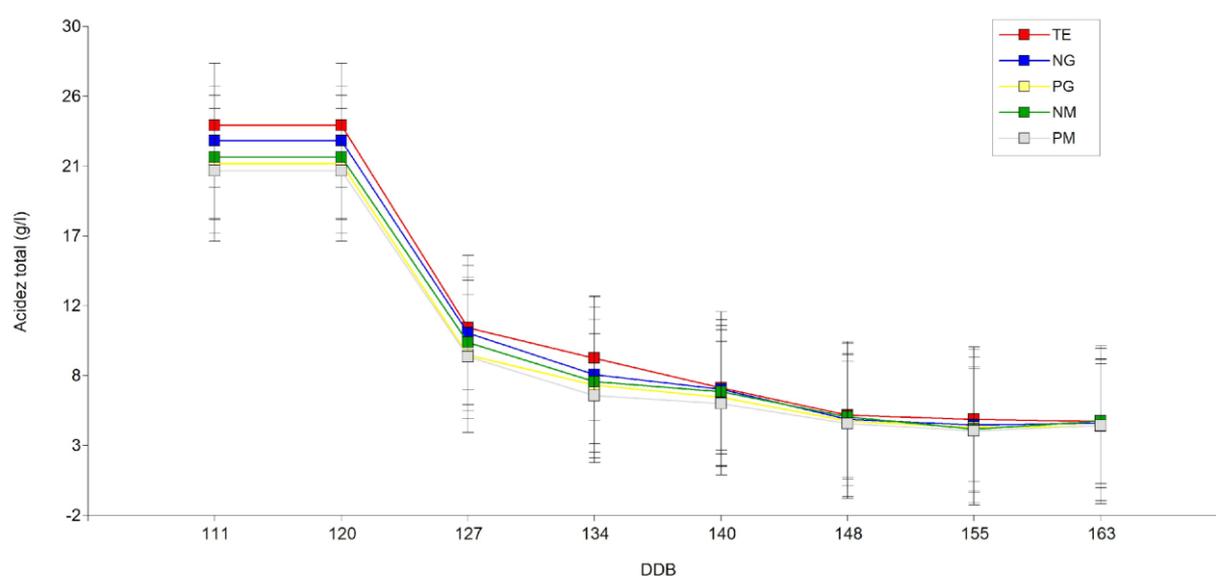


Figura 36. Evolución del contenido de acidez total, expresada en g/L de ácido tartárico, en los distintos tratamientos cv. Malbec, desde 23-01-2020 hasta 13-03-2020. Las barras indican error estándar.

#### 4.6- Potencial hídrico

##### 4.6.1- Potencial hídrico de preamanecer

Durante la temporada invierno-vendimia del año 2020, se registraron 10 determinaciones por tratamiento para el estudio del estado hídrico de las vides. Las fechas de estudio, se expresan en días después de la brotación (DDB). El día 112 DDB correspondió al 24-01-2020; y el 160 DDB (10-03-2020). Se aplicó un análisis estadístico mediante modelos lineales generales y mixtos; dando por resultado la gráfica de la figura (37). El resultado demuestra diferencias significativas entre los tratamientos. Donde las vides pertenecientes a los tratamientos TE, NM y PM, presentaron condiciones de mayor estrés hídrico. Las vides del tratamiento NG, presentaron los mejores indicadores de estado hídrico de las vides. Un comportamiento intermedio, fue el del tratamiento PG.

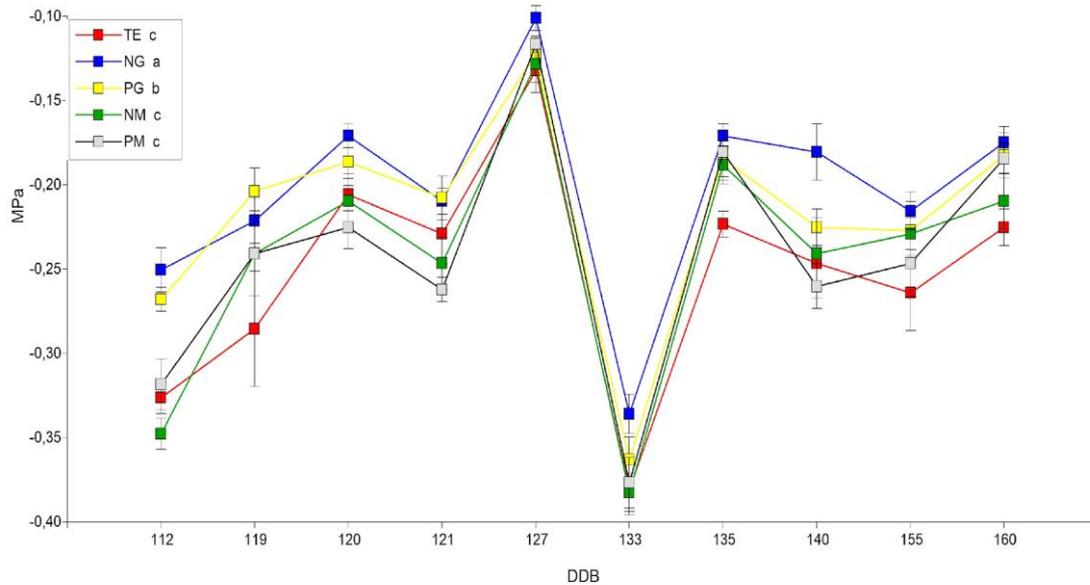


Figura. 37. Evolución de medias para potencial hídrico de preamanecer (MPa).

#### 4.6.2- Análisis valores: mínimos y máximos

En la curva de evolución de medias por tratamiento, se observó una tendencia a un máximo el día 127 DDB (06/02/2020) y un mínimo el día 133 DDB (12/02/2020). Se complementó el análisis de estas fechas, con las variables de clima y microclima.

Para el registro del día 127 DDB, se analizaron las variables del día anterior, puesto que son las condiciones relacionadas con el estado hídrico de las cepas en las mediciones de preamanecer. El día 5 de febrero se tuvieron temperaturas ambientes moderadas de acuerdo a los registros históricos. Los valores fueron de: Tmínima 15,4°C; Tmáxima 28,9°C; Tmedia 21,6°C. Durante las 8:00 hs y las 10:00 hs, hubo alta nubosidad. El riego se aplicó sin restricción. El día 04 de febrero se registraron precipitaciones en la región. Debido a estas circunstancias, las plantas lograron restablecer su balance hídrico sin sufrir estrés, lo cual indica que se debería haber reducido o suprimido la lámina de riego.

Caso contrario ocurrió el día 133 DDB (12/02/2020), donde los valores observados corresponden a plantas estresadas. Los registros de clima indican que la jornada anterior se tuvieron: Tmínima 14,8°C, Tmáxima 31,4°C y Tmedia 22,9°C. La humedad relativa media fue del 69%. El riego se llevó a cabo el día lunes 10 de febrero; pero se destaca que el fin de semana anterior y martes 11 de febrero no se regó. Dada que las condiciones ambientales no revistieron excepcionalidad en sus valores; se concluyó que hubo una deficiencia en el aporte de agua mediante el riego.

De acuerdo a la evolución de medias por tratamiento, durante la temporada envero- vendimia 2020, se puede observar una tendencia a valores de potencial hídrico foliar de preamanecer más negativos en el tratamiento testigo (TE), y las de mejor condición hídrica las vides del tratamiento NG.

#### 4.6.3- Potencial hídrico foliar de mediodía

Durante la temporada envero- vendimia del año 2020, se registraron 11 determinaciones por tratamiento para el estudio del estado hídrico de las vides. Las fechas de estudio, se expresan en días después de la brotación (DDB). El día 111 DDB correspondió al 23-01-2020; y el 160 DDB (10-03-2020). El horario de determinación fue de 12:00 a 13 hs. Se aplicó un análisis estadístico mediante modelos lineales generales y mixtos; dando por resultado la gráfica de la figura 38. Las curvas presentan mayor variabilidad, y las tendencias no son tan marcadas como en el caso de las determinaciones de preamanecer. Los tratamientos TE(c) y PM (c), fueron los que obtuvieron valores mínimos de presión de vacío, que representan a las cepas más estresadas. Las mejores condiciones hídricas, se dieron en las vides de los tratamientos NG (ab) y PG (a). El comportamiento intermedio, se dio en el tratamiento NM (b).

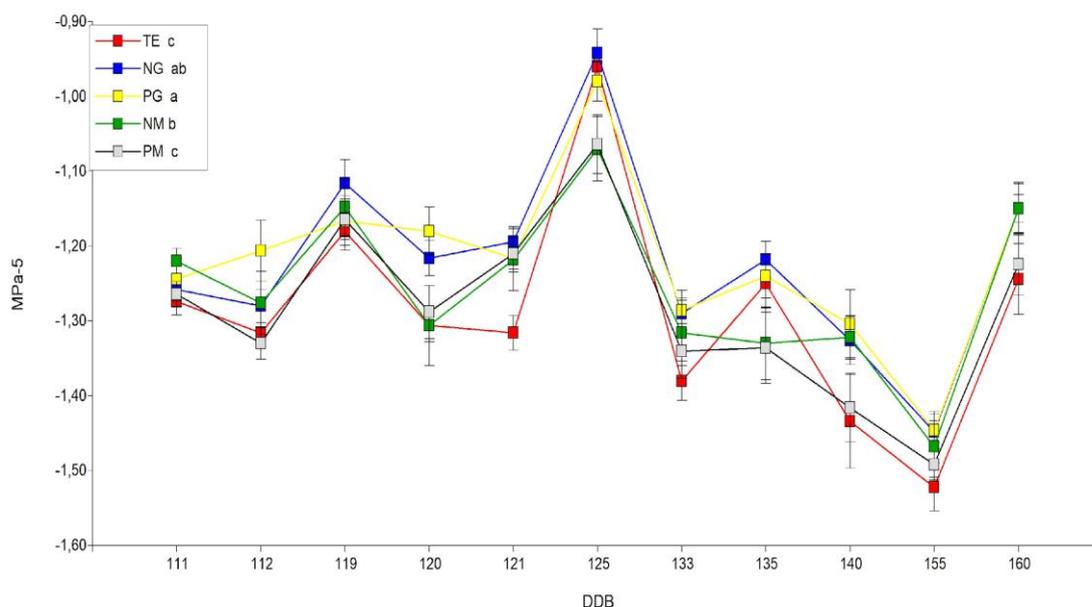


Figura 38. Evolución temporada 2020 para potencial hídrico foliar de mediodía por tratamiento, para la temporada envero- vendimia 2020

#### 4.6.4- Análisis valores: mínimo y máximo

El día 125 DDB, correspondiente al 04/02/2020 del año calendario, se observó un máximo de acuerdo al gráfico de evolución de medias de potencial hídrico foliar, Figura 38. De acuerdo a las condiciones climáticas, se registraron: Tmínima 18°C; Tmáxima 35°C; Tmedia 25°C.

La variable riego no fue restrictiva, lo que impone la tendencia de plantas sin estrés hídrico a pesar de las temperaturas por encima de los registros históricos. Por esta condición se obtuvieron valores promedio de -0,92 MPa de presión de vacío, que corresponden a cepas sin estrés hídrico para el horario de la determinación.

En contraposición, el día 155 DDB (05/03/2020); se alcanzaron valores mínimos de presión de la cámara de Schölander, donde se indica estrés hídrico en las vides. Para el mes en cuestión, se obtuvieron registros de temperatura muy superiores respecto de los valores promedios históricos, con Tmáxima de 40°C, Tmín 15 °C y Tmedia de 28°C. A las 12:00 hs, se registró en el termómetro 35,5°C.

Debido a las condiciones ambientales, y una estrategia de riego restrictiva dada la cercanía a vendimia, se pudo justificar el mínimo en la curva de evolución de potencial hídrico foliar de mediodía.

4.6.5- Potencial hídrico foliar; integral de estrés hídrico de Myers ( $S\Psi$ ) y área del trapezoide o método de exhaución, (A).

El potencial hídrico foliar se independizó de la variable tiempo mediante la integral de estrés de Myers ( $S\Psi$ ) y área del trapezoide A. Se aplicó análisis factorial mediante modelos lineales generales y mixtos, y se obtuvo significancia estadística para el factor sistema de colocación.

Los resultados son significativos de acuerdo a las tres metodologías, esto se refleja en los valores de p-valores < 0,05 (celdas verdes, tabla 14), para preamanecer y mediodía.

De acuerdo a la tabla 15, se puede observar que el sistema de colocación Grembiule modificado es semejante al tratamiento testigo, y presentan los valores mínimos de presión. Esto indica que las cepas han estado más estresadas. La integral de estrés hídrico de Myers ( $S\Psi$ ), indica que a mayor valor nominal, las cepas presentaron menor condición de estado hídrico. Esto se refleja en el valor de las medias para preamanecer y mediodía:

$$S\Psi_{pd(Te)}=8,20 > S\Psi_{pd(Grembiule Modificado)}=7,63 > S\Psi_{pd(Grembiule)}= 6,13$$

$$S\Psi_{md}(T_e) = 25,82 > S\Psi_{md}(\text{Grembiule Modificado}) = 24,86 > S\Psi_{md}(\text{Grembiule}) = 22,28$$

El sistema Grembiule, presenta las mejores condiciones de estado hídrico de los viñedos.

Tabla 14. Resultado de análisis factorial aplicado a potencial hídrico foliar de preamanecer y mediodía, integral de Myers y área del trapezoide. Factores: sistema, color e interacción sistema\*color. (significativo para p-valor<0,05)

|                        | $\Psi_{pd}$ |         | $S\Psi_{pd}$ |         | A <sub>pd</sub> |         |
|------------------------|-------------|---------|--------------|---------|-----------------|---------|
|                        | F-value     | p-value | F-value      | p-value | F-value         | p-value |
| Preamanecer            | 0,41        | 0,5239  | 4,65         | 0,0520  | 4,65            | 0,0520  |
| Color                  | 0,41        | 0,5239  | 4,65         | 0,0520  | 4,65            | 0,0520  |
| Sistema                | 9,95        | 0,0019  | 38,03        | <0,0001 | 38,03           | <0,0001 |
| Color:Sistema          | 0,57        | 0,4514  | 2,28         | 0,1569  | 2,28            | 0,1569  |
| Significativo: Sistema |             |         |              |         |                 |         |
| Mediodía               | $\Psi_{md}$ |         | $S\Psi_{md}$ |         | A <sub>md</sub> |         |
|                        | F-value     | p-value | F-value      | p-value | F-value         | p-value |
| Color                  | 0,53        | 0,4688  | 0,71         | 0,4104  | 0,63            | 0,4425  |
| Sistema                | 7,84        | 0,0056  | 6,63         | <0,0203 | 6,90            | <0,0221 |
| Color:Sistema          | 0,69        | 0,4087  | 0,78         | 0,3892  | 0,69            | 0,4208  |
| Significativo: Sistema |             |         |              |         |                 |         |

Tabla 15. Resultado del análisis de datos con modelo lineales, generales y mixtos, para potencial hídrico foliar de preamanecer.

| Preamanecer  | $\Psi_{pd}$ |      |   | $S\Psi_{pd}$ |      |   | A <sub>pd</sub> |      |   |
|--|-------------|------|---|--------------|------|---|-----------------|------|---|
|  | Medias      | E.E. |   | Medias       | E.E. |   | Medias          | E.E. |   |
| TE   | -0,25       | 0,01 | a | 8,20         | 0,39 | a | -12,04          | 0,39 | a |
| Modificado   | -0,24       | 0,01 | a | 7,63         | 0,31 | a | -11,47          | 0,31 | a |
| Grembiule  | -0,21       | 0,01 | b | 6,13         | 0,31 | b | -9,97           | 0,31 | b |
| p-valor  | 0,0019      |      |   | <0,0001      |      |   | <0,0001         |      |   |
| Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05) |             |      |   |              |      |   |                 |      |   |
| Mediodía   | $\Psi_{md}$ |      |   | $S\Psi_{md}$ |      |   | A <sub>md</sub> |      |   |
|  | Medias      | E.E. |   | Medias       | E.E. |   | Medias          | E.E. |   |
| TE   | -1,29       | 0,02 | a | 25,82        | 0,96 | a | -58,01          | 0,86 | a |
| Modificado   | -1,27       | 0,01 | a | 24,86        | 0,72 | a | -57,29          | 0,63 | a |
| Grembiule  | -1,22       | 0,01 | b | 22,28        | 0,72 | b | -54,88          | 0,63 | b |
| p-valor  | 0,0056      |      |   | 0,0203       |      |   | 0,0221          |      |   |
| Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05) |             |      |   |              |      |   |                 |      |   |

#### 4.7- Ratio o composición isotópica de carbono ( $\delta^{13}\text{C}$ ).

Se determinó la existencia de normalidad de los datos en función del análisis exploratorio: gráfico y mediante prueba de Shapiro-Wilk. En el gráfico de puntos de la figura 39, se puede observar el comportamiento de la composición isotópica en función del tratamiento. Todas las mediciones indican que las cepas tuvieron un estrés hídrico nulo o débil ( $\delta^{13}\text{C} < -26\text{‰}$ ) de acuerdo a las escalas vigentes. Los sistemas de protección de malla antigranizo Grembiule con color negro y Grembiule Modificado, son los que tienen comportamiento similar. Además, de acuerdo con las medias observadas, se evalúan las mejores condiciones hídricas de las cepas. En la temporada enverwendimia 2020, se registraron todos los resultados de composición isotópica en umbrales de bayas desarrolladas sin estrés hídrico. El mínimo corresponde a la parcela 20, con un valor de  $-27,63\text{‰}$ ; del tratamiento NG (color de malla negro, sistema de colocación Grembiule), e indica el mejor comportamiento de estado hídrico. Y la parcela con el máximo de valor de ratio isotópico y mayor estrés hídrico, se estableció para la parcela 12, con  $-26,27\text{‰}$ , del tratamiento PM (color de malla perla, sistema de colocación Grembiule modificado). Las cepas testigo, sin protección antigranizo, presentaron un comportamiento intermedio en su estado hídrico.

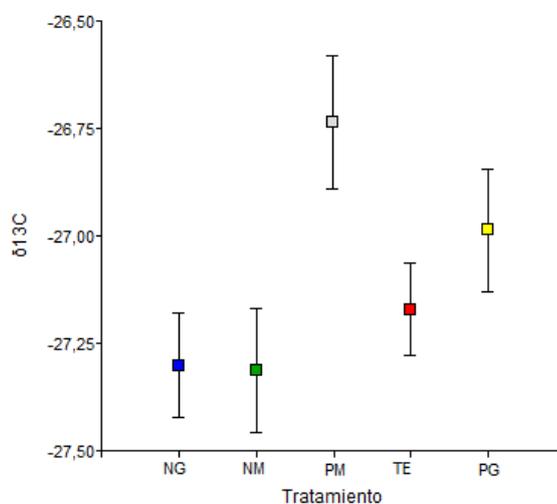


Figura 39. Gráfico de puntos con desviación estándar por tratamiento.

Conforme al estudio estadístico factorial tabla 16, se determinó que el factor de influencia de la clasificación de medias es el color de la malla antigranizo, existiendo diferencias significativas entre medias con  $p\text{-valor}=0,008 < 0,05$ . Los valores de composición isotópica que indican mejor estado hídrico de las cepas, se visualizan en el color negro, con un valor medio de  $-27,31\text{‰}$ ; y las condiciones de mayor estrés hídrico en el color perla, con media igual a  $-26,86\text{‰}$ . Las cepas testigo tuvieron un

comportamiento intermedio. Igualmente, todas las medias corresponden a estrés hídrico leve o nulo de acuerdo a escalas vigentes. Se desestima el análisis del factor sistema, ya que su p-valor = 0,4101. En la figura 40, se visualiza la clasificación de medias por tratamiento, que incluye las vides del tratamiento testigo (TE).

Tabla 16. Medias ajustadas y errores estándares. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ ).

| $\delta^{13}\text{C}$ |        |      |    |                 |        |      |   |
|-----------------------|--------|------|----|-----------------|--------|------|---|
| Color                 | Medias | E.E. |    | Sistema         | Medias | E.E. |   |
| Perla                 | -26,86 | 0,10 | a  | TE              | -26,86 | 0,16 | a |
| TE                    | -27,17 | 0,13 | ab | G. Modificado   | -27,03 | 0,11 | a |
| Negro                 | -27,31 | 0,10 | b  | Grembiule       | -27,15 | 0,11 | a |
| p-valor =0,008        |        |      |    | p-valor =0,4101 |        |      |   |

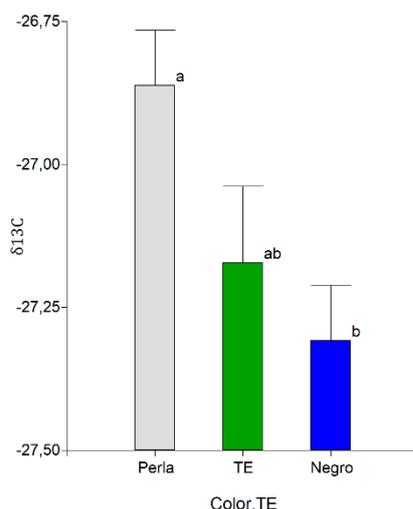


Figura 40. Clasificación de medias por tratamiento de composición isotópica en función del factor color

#### 4.8- Coeficientes de correlación de Pearson

El análisis de los coeficientes de correlación, permitió establecer las relaciones entre potencial hídrico foliar y ratio o composición isotópica de carbono ( $\delta^{13}\text{C}$ ). La tabla 17 muestra los coeficientes de correlación entre variables (Correlación de Pearson) de potencial hídrico foliar de preamanecer (Apd y  $S\Psi_{pd}$ ), mediodía (Amd y  $S\Psi_{md}$ ) y composición isotópica ( $\delta^{13}\text{C}$ ), acompañados por la correspondiente probabilidad. Se observa que los valores de potencial hídrico de preamanecer y mediodía se

correlaciones débilmente con el  $\delta^{13}\text{C}$ , para área negativamente y para la integral de Myers positivamente.

Se destaca la correlación fuerte, con coeficiente de Pearson igual a -1, entre Apd vs S $\Psi$ pd y Amd vs S $\Psi$ md. En las siguientes fórmulas se demuestra la relación matemática.

$$S\Psi = \left| \sum_{i=0}^{i=t} (\Psi_{(i,i+1)} - c) \cdot n \right| \quad (3.1) \text{ y}$$

$$A = \sum_{r=1}^n \overline{m\overline{r}} (x_r - x_{r-1}) \quad (3.4)$$

$$S\Psi = \left| \sum_{i=0}^{i=t} A - c \cdot n \right| \quad (4.2)$$

Tabla 17. Tabla de correlación de Pearson: Coeficientes/Probabilidades

|                       | Apd   | S $\Psi$ pd | Amd     | S $\Psi$ md | $\delta^{13}\text{C}$ |
|-----------------------|-------|-------------|---------|-------------|-----------------------|
| Apd                   | 1,00  | 0,00        | 5,1E-05 | 5,1E-05     | 0,37                  |
| S $\Psi$ pd           | -1,00 | 1,00        | 5,1E-05 | 5,1E-05     | 0,37                  |
| Amd                   | 0,72  | -0,72       | 1,00    | 0,00        | 0,28                  |
| S $\Psi$ md           | -0,72 | 0,72        | -1,00   | 1,00        | 0,28                  |
| $\delta^{13}\text{C}$ | -0,19 | 0,19        | -0,23   | 0,23        | 1,00                  |

## Capítulo 5

### DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

#### 5.1- Potencial hídrico foliar

La variabilidad de las determinaciones de potencial hídrico foliar de acuerdo al horario de determinación: preamanecer y mediodía, se analizó a partir de los valores de desviación estándar por parcela para la temporada, donde los rangos para potencial hídrico foliar de mediodía (0,09 a 0,20) fueron superiores a los de preamanecer (0,05 a 0,09). Se entiende que el potencial hídrico de las hojas varía con el estado hídrico de la vid, también es muy variable dependiendo del entorno microclimático de cada hoja en particular reportado por Jones (2004). En las curvas de seguimiento para el período envero-vendimia de la temporada 2020, también se pudo observar esta mayor incertidumbre en la distribución de medias por tratamiento. El comportamiento isohídrico de las vides, limita las variaciones en el potencial hídrico foliar mediante la regulación estomática, por eso la determinación de mediodía no es el indicador más preciso del estado hídrico de la vid (van Leeuwen *et al.*, 2009). La menor dispersión de datos en las determinaciones de preamanecer, está relacionada con la disminución de las actividades biológicas de las plantas, donde la actividad fotosintética cesa y la transpiración nocturna en la vid no contribuye significativamente al riesgo de estrés hídrico (Dayer y Gambetta, 2021). El equilibrio hídrico entre el suelo y las vides es más dinámico, y al final de la noche cada hoja tiene similar potencial hídrico, y las condiciones microclimáticas son homogéneas (van Leeuwen *et al.*, 2009). Otro factor a considerar es que la variabilidad entre las determinaciones de preamanecer, quedan sujetas a la heterogeneidad de agua en el suelo (Améglio *et al.*, 1999, Fernández y Trillo, 2005).

Los valores de potencial hídrico foliar de preamanecer estuvieron definidos en un rango de -0,42 MPa a -0,08 MPa. La temporada se desarrolló en su mayoría (90%) con valores comprendidos entre -0,08 MPa y -0,3 MPa, que indicaron desarrollo **sin déficit hídrico o déficit hídrico leve** (van Zil y Weber, 1981; Williams *et al.*, 1994; Vallone, 1998; Brillante *et al.*, 2017; Deloire *et al.*, 2020). Aunque para van Leeuwen (2009), se considera estrés leve. Para el día 133 DDB (12/02/2020), se obtuvieron los valores mínimos de la temporada, con media de -0,37 MPa, mínimo de -0,42 MPa y máximo de -0,32 MPa. De acuerdo a las escalas vigentes correspondió a un déficit hídrico **suave a moderado**. Estos resultados fueron comparables con los obtenidos por Dayer *et al.* (2013); para el mismo varietal, con un rango aproximado -0,47 MPa a -0,2 MPa, para el período envero-vendimia. Aunque para otras variedades, (Chasselas y

Pinot noir) los valores de  $\Psi_{pd}$  fueron de -0,18 MPa y -0,16 MPa, respectivamente, indicando, además, que tuvieron un déficit hídrico **bajo** (Spangenberg *et al.*, 2020).

En promedio, en todas las parcelas se obtuvieron valores de potencial hídrico foliar de mediodía, situados en el rango de -1,1 MPa a -1,3 MPa; los cuales correspondieron a plantas **sin estrés o estrés leve** (Vallone, 1998; Grimes y Williams, 1990; Deloire *et al.*, 2020) aunque, según van Leeuwen (2009), correspondieron a un estado hídrico de **débil a moderado**. El día 133 DDB, debido a la alta pérdida de agua en los días previos a la determinación, las cepas denotaron indicadores de estrés hídrico de moderado a severo. Estos valores atípicos de potencial hídrico foliar, fueron consistentes con lo observados en preamanecer.

De acuerdo al análisis del potencial hídrico foliar de preamanecer y mediodía de la temporada 2020 durante el período envero-cosecha, se concluye que el desarrollo del ensayo se llevó a cabo con leve a escaso estrés hídrico. Y el cálculo de lámina de riego fue adecuado para un ensayo sin restricción.

## 5.2- Isótopos

Para todas las parcelas, que fueron irrigadas con el mismo sistema de riego por goteo y una lámina de reposición equivalente al 100% respecto de ET<sub>c</sub>, se obtuvieron rangos de composición isotópica entre -27,63 ‰ y -26,27‰, correspondientes a la escala de estrés hídrico débil o nulo (van Leeuwen *et al.*, 2009; Santesteban *et al.*, 2015; Brillante *et al.*, 2017; Brillante *et al.*, 2020). Resultados similares se reportaron en experiencias previas con los varietales Chasselas y Pinot noir bien irrigados, los que tuvieron valores de composición isotópica en bayas de -27,26 ‰ y -26,47 ‰, indicando que las cepas se habían desarrollado en el período envero-vendimia sin estrés hídrico (Spangenberg *et al.*, 2017; Spangenberg y Zufferey, 2018). Para una experiencia en función de la poda y frecuencia de riego con el varietal Tempranillo, en parcelas regadas 2 y 3 veces por semana, se obtuvieron valores de  $\delta^{13}C$  -26,94 ‰ y -27,44‰ (Santesteban *et al.*, 2017a); y; en un estudio de mapeo mediante imágenes de alta resolución obtenidas por vehículos no tripulados se obtuvieron valores entre -27,9‰ (sin estrés hídrico) y (-24,1 (con estrés severo) (Santesteban *et al.*, 2017b).

## 5.3- Potencial hídrico foliar y carbono 13

Se ha demostrado que los valores de  $\delta^{13}C$  de los azúcares de la uva en el momento de cosecha están altamente correlacionados con el potencial hídrico de la hoja antes del amanecer ( $\Psi_{pd}$ ) (Spangenberg *et al.*, 2017; Spangenberg y Zufferey, 2018). De acuerdo a los resultados obtenidos en el ensayo, ambas variables corresponden a

vides sin restricción hídrica o restricción hídrica leve durante el período envero-vendimia de la temporada 2020 (de acuerdo al plan de riego implementado en función del diseño de lámina de agua 100% ETC). Si bien en varios estudios se observó relación lineal entre el potencial hídrico foliar promedio con la composición isotópica de carbono en diferentes rangos de estado hídrico (Gaudillère *et al.*, 2002; Guix-Hébrard *et al.*, 2007; van Leeuwen *et al.*, 2009; Costantini *et al.*, 2010; Costantini *et al.*, 2013; Herrero-Langreo *et al.*, 2013; Santesteban *et al.*, 2011; Santesteban *et al.*, 2013, Santesteban *et al.*, 2015; Bchir *et al.*, 2016), en nuestro estudio no se obtuvo relación lineal entre el  $\delta^{13}\text{C}$  con ninguna de las variables de estado hídrico foliar evaluadas (valores medios de potencial hídrico foliar de preamanecer, valores medios de potencial hídrico foliar de mediodía, integral de estrés hídrico de Myers de preamanecer y mediodía ( $S\Psi_{pd}$  y  $S\Psi_{md}$ ) y área del trapecioide o método de exhaución de preamanecer y mediodía ( $A_{pd}$  y  $A_{md}$ )). Tampoco se encontró ajuste lineal entre  $\Psi_{pd}$  y  $\delta^{13}\text{C}$  para el cultivar Grenache (Bchir *et al.*, 2016).

A pesar de la relación que conservan el potencial hídrico foliar y la composición isotópica de carbono, se han reportado diferencias en los estados hídricos que indican sus respectivas escalas, así como distintos valores calculados a partir de modelos lineales ajustados entre ambas metodologías. Brillante *et al.* (2017), observaron que el  $\Psi_{pd}$  mínimo indicó estrés moderado a severo mientras que el  $\delta^{13}\text{C}$  se situó en el rango de escala sin estrés hídrico; estas diferencias también se evidenciaron en los valores de  $\delta^{13}\text{C}$  calculados a partir de las ecuaciones de ajuste para diferentes variedades, encontrando diferencias significativas entre los mismos. Para la ecuación lineal desarrollada a partir de los datos reportados por Guix-Hébrard *et al.* (2007) para el varietal Syrah, con un valor de  $\Psi_{pd} = -0,2$  MPa, se calculó un  $\delta^{13}\text{C} = -25,81\text{‰}$ ; mientras que para el mismo valor de potencial hídrico foliar, las curvas de ajuste para los estudios realizados por Gaudillère *et al.* (2002) sobre vides Cabernet Sauvignon, Cabernet Franc y Merlot, se calculó un  $\delta^{13}\text{C} = -23,95\text{‰}$  aunque, Brillante *et al.* (2017) calcularon un  $\delta^{13}\text{C} = -28,03\text{‰}$  para el cultivar Chardonnay. Esta variabilidad entre la correlación de ambas variables, en parte, son atribuibles a diferencias genéticas entre los diferentes variedades, las diversas respuestas como comportamiento de tolerancia a la sequía según la especie (Brillante *et al.*, 2017) o bien, a las condiciones experimentales de los ensayos (Medrano *et al.*, 2007). En otros estudios (Gaudillère *et al.*, 2002; Gómez-Alonso y García-Romero, 2009), con plantas de diferentes variedades sometidas a un mismo tratamiento de riego, se ha encontrado diferencias de composición isotópica entre 1,49‰ y 0,826‰ (para condiciones de secano) y hasta 2,6‰ (para condiciones experimentales con riego).

#### 5.4- Protección con mallas antigranizo – Análisis de su efecto en el fraccionamiento isotópico

De acuerdo al análisis estadístico de las determinaciones de composición isotópica por unidad experimental, se observaron diferencias de medias significativas para el factor color. Para analizar las fuentes de variabilidad del indicador, a continuación, se consideran las fuentes de fraccionamiento isotópico y su influencia en el estudio.

**Condiciones hídricas:** debido a que disponibilidad de agua de riego fue la misma en todos los tratamientos, el análisis se centró en las condiciones de microclima que afectan la tasa de evapotranspiración. Reportes de estudios en manzanas con diferentes niveles de sombreado generado a partir de mallas antigranizo, indican que con 20 a 50% de sombreado se mejoraron las condiciones del estado hídrico de los frutales (López *et al.*; 2018). En función de las variables de temperatura mínima-máxima, humedad relativa y velocidad del viento definida por el factor sistema de colocación; la ETo estimada reflejó que el tratamiento TE (testigo) requiere las tasas de reposición más elevadas. Esto se debe a las temperaturas mayores, menor humedad relativa debido a la mayor velocidad del viento. Los tratamientos NM y PM, presentaron valores intermedios y semejantes de ETo, y superiores a los tratamientos NG y PG que presentaron las menores temperaturas de canopia, velocidad del viento y mayor humedad relativa en condiciones de microclima.

La importancia de la disminución de temperatura que generan las mallas antigranizo, radica en que favorece la fotosíntesis, que presenta un máximo para temperaturas entre 25 °C y 30°C (van Leewen, 2010) pero, superando este rango, se genera el cierre estomático, lo que aumentaría aún más la temperatura (Vallone, 1998). El exceso de temperatura afecta el aparato fotosintético, que en consecuencia sufre una serie de cambios reversibles para hacer frente al calor aunque, cuando el calor es excesivo, los fotosistemas pueden sufrir daños severos e irreversibles (Araújo *et al.*, 2018; Gambetta *et al.*, 2021). La reducción de la variable térmica en este estudio, fue de 1,9°C en promedio para los tratamientos con cobertura, inferiores a los reportados por Olivares-Soto (2020), con descensos de hasta 7°C.

Las mallas antigranizo redujeron la velocidad del viento, comparables efectos fueron registrados por Nahuel, (2013), Mupambi *et al.* (2018), Raffo *et al.* (2019), Raffo *et al.* (2019), Gambetta *et al.* (2021) Nahuel *et al.* (2023). Además, la temperatura del aire debido al factor sombra de las mallas antigranizo se ha visto modificada (Iglesias y Alegre, 2006, Raffo *et al.*, 2019; Raffo y Curetti, 2022).

**Concentración de CO<sub>2</sub>:** En el ensayo no se realizó el seguimiento de esta variable. Pero estudios realizados en vid por Martínez-Lüscher *et al.* (2017), con mallas antigranizo de diferentes colores y porcentaje de sombreo, no reportaron diferencias en la concentración de CO<sub>2</sub> entre los tratamientos y cepas testigo sin cobertura, por lo que no sería una fuente de fraccionamiento isotópico.

**Irradiancia:** En nuestro experimento, no se realizó el seguimiento de ninguna variable fotolumínica pero, la bibliografía indica una correlación positiva entre la irradiancia y la  $\delta^{13}\text{C}$  (Broadmeadow *et al.* 1993; O' Leary 1995; Zimmerman y Ehleringer 1990; Mateo *et al.*, 2004), debido a un aumento de la tasa fotosintética sin variaciones apreciables en la conductancia estomática (Yakir e Israeli, 1995). Las mallas antigranizo producen una modificación en la radiación fotosintéticamente activa (PAR) (Raffo *et al.*, 2015; Manja y Aoun, 2019) y, por lo tanto, son una fuente de fraccionamiento isotópico. Para nuestro estudio, los tratamientos de malla negra, presentaron los mínimos valores de  $\delta^{13}\text{C}$ , lo que implicaría menor irradiancia. Esto es consistente con los resultados reportados a partir del estudio de la influencia de las mallas negras, donde no se modificó la calidad espectral de la radiación; sino que disminuyó la intensidad de la luz sin afectar la calidad de la misma (Arthurs *et al.*, 2013; Ilić y Fallik, 2017; Martínez-Lüscher *et al.*, 2017; Manja y Aoun, 2019; Abeysinghe *et al.*, 2019). Resultados similares se obtuvieron en vides cultivar Merlot con tres sistemas de instalación de protección con malla antigranizo, donde disminuyó significativamente el PPFD (flujo de fotones fotosintéticamente activos) respecto al tratamiento testigo sin protección (Nahuel, 2013). En función del tipo y color de la red, se han encontrado reducciones en la intensidad de la luz solar del 4 al 9% (PAR), del 25 al 29% (UV) y del 5% (IR) (Olivares-Soto, 2020).

Para los tratamientos de color Perla, el comportamiento de la luz es diferente, y se evidenció en mayores valores de  $\delta^{13}\text{C}$ . Este fraccionamiento isotópico, se relacionaría con la mayor irradiancia que generan las mallas claras, dado que se comportan como cuerpos translúcidos, reducen el efecto de sombra y mejora el uso eficiente de la radiación. Parte de la luz es reflejada, y otra, dispersada (Young *et al.*, 2009), donde los rayos son difundidos en 180°, generando la mayor intensidad, en el rayo de 90° respecto de la superficie (Castejón y Santamaría, 1993). Este efecto fue reportado por Raffo *et al.* (2019), Muskaan (2022) y Jafary *et al.* (2022). Debido a la relación con el área de incidencia este fenómeno se incrementó en el sistema de colocación Grembiule Modificado o malla unida, correspondiente al tratamiento PM. El incremento de radiación por el efecto de luz dispersada, también estaría relacionado con un aumento de la actividad fotosintética que se refleja en aumento de peso de baya y concentración de sólidos solubles, máximos también en el tratamiento PM. Según Dayer *et al.* (2014), la

tasa diaria de fotosíntesis sigue el mismo comportamiento que la radiación, donde las hojas con mayor exposición solar tuvieron la mayor tasa de fotosíntesis a lo largo del día. Resultados similares, fueron presentados por Raffo *et al.* (2019), para manzanas producidas bajo sistemas de protección con mallas antigranizo claras. Además, el tratamiento PM, presentó el potencial hídrico comparables con el tratamiento TE, con valores que indicaron que las cepas estuvieron menos hidratadas. La interrogante de cómo el tratamiento más estresado presenta mayor concentración de sólidos solubles y mayor peso de baya, también estaría relacionado con la función acumulativa de azúcares que tienen los frutos, donde el déficit hídrico modifica la distribución de fotoasimilados hacia la producción de azúcares solubles a expensas del almidón que disminuye significativamente, donde los órganos sumideros se encuentran en competencia permanente por el suministro de carbono (revisado por Keller, 2020).

El tratamiento TE, sin malla antigranizo, tuvo un registro de  $\delta^{13}\text{C}$  intermedio, consistente con el análisis de efecto sobre la luz que tienen las mallas antigranizo. Dado que las mallas negras producen sombra y alcanzan valores mínimos de composición isotópica, frente a la perla que debido a la difusión alcanzan los máximos.

**Efecto dosel:** si bien en el ensayo no se realizaron mediciones fenológicas de canopia, se sabe que la presencia de mallas antigranizo puede influir en el desarrollo y crecimiento de las plantas, mejorando las respuestas fotomorfogenéticas/fisiológicas (Ilic y Fallik, 2017; Manja y Aoun, 2019). Se puede presentar mayor desarrollo vegetativo en las mallas oscuras por una respuesta al sombreado, ya que cuando la disminución de los niveles de radiación genera un ambiente subóptimo para las plantas, esto produce una mayor traslocación de recursos a los brotes en crecimiento para escapar a las condiciones de sombra (Raffo *et al.*, 2019, Jafary *et al.*, 2022). Además, en el caso del TE, la transpiración podría disminuir, debido a que podría tratarse parcialmente del resultado de una transpiración reducida debido a un menor follaje que intercepta menos luz (Dayer *et al.*, 2020). Para el caso de malla perla, la transpiración disminuiría al reducir el tamaño del follaje y el área foliar expuesta a escala de parcela de cada planta (van Leeuwen *et al.*, 2019).

Estos análisis, indican que la modificación de la canopia debido a la presencia de las mallas modificaría el fraccionamiento isotópico; por lo que sería necesario complementar los estudios para referir conclusiones en la temática.

## 5.5- Análisis de composición de bayas:

### 5.5.1- Peso

Las bayas del tratamiento TE, fueron las de menor peso en la temporada, coincidente con las determinaciones de menor potencial hídrico foliar de preamanecer (media= -0,25 MPa) y de mediodía (media= -1,29 MPa), resultados coherentes de acuerdo a Mirás-Avalos e Intrigliolo (2017), que demuestran la relación de disminución de peso frente a disminución de potencial hídrico de las cepas con dependencia de la variedad. El tratamiento PM, marcó el máximo en tamaño de fruto, con un valor medio de 1,37 gramos. Esto se debe, a que, a diferencia de las bayas previas al envero, las bayas posteriores al envero están protegidas de los cambios en el  $\Psi$  de la vid y son en gran medida insensibles al marchitamiento inducido por la sequía (Greenspan *et al.*, 1994; Keller *et al.*, 2015; Gambetta *et al.*, 2020). Además, la incidencia de luz difusa aumenta la actividad fotosintética y la generación de fotoasimilados (Dayer *et al.* 2020), se modifica la composición química afectando las propiedades antioxidantes de los frutos (Olivares-Soto *et al.*, 2020). En estudios similares aplicados a manzanas, el empleo de mallas afectó en forma positiva el tamaño de los frutos en el cv. Cripp's Pink, (Raffo *et al.*, 2019). El peso de baya fue la única variable que mostró correlación débil con  $\delta^{13}\text{C}$ , esto se debe a que también manifestó significancia del color en el análisis estadístico, pero el valor de media mínimo correspondió a cepas del tratamiento TE, frente al mínimo que se obtuvo en  $\delta^{13}\text{C}$  para el color negro de la malla antigranizo Pallotti *et al.* (2023), sugiere que el mayor peso de baya registrado frente a vides sin mallas de protección se debe a la menor deshidratación de los frutos.

### 5.5.2- Evolución de sólidos solubles (° Brix)

Todos los tratamientos, en vendimia (al finalizar la temporada) presentaron comportamientos similares y el análisis estadístico no indicó diferencias significativas entre las medias por tratamiento para la temporada 2020 durante el período envero-vendimia. Sin embargo, la expresión de sólidos solubles, tuvo alta correlación con peso de baya, (coeficiente de Pearson= 0,66), y obtuvo los valores promedio de temporada máximos de °Bx para el mismo tratamiento, PM, de 21,31°Bx (valor medio ajustado de la temporada); frente al mínimo obtenido en TE de 20,03°Bx, dado que las bayas de uva acumulan una cantidad increíblemente alta de azúcares (Gambetta *et al.*, 2020). También se obtuvo correlación fuerte con pH (positiva) y acidez total (negativa). En nuestro estudio, la correlación con  $\delta^{13}\text{C}$  fue inexistente. Sin embargo, en otros ensayos, la relación de azúcares en bayas y ratio isotópico van Leeuwen (2010), muestran que la concentración de azúcar en las uvas y el  $\delta^{13}\text{C}$  aumentaron con el estrés hídrico leve.

Esto se debió a que la alta disponibilidad de agua desde el envero hasta la vendimia, indujo a un mayor crecimiento vegetativo, reducción en la concentración de azúcar, color y fenoles en las bayas (van Leeuwen, 2010). Además, estudios similares en manzanas, asociaron la presencia de mallas a un efecto positivo en la tasa de fotosíntesis por una menor fotoinhibición que generalmente ocurre en horas del mediodía con altos valores de temperatura. Esto se traduce en una mayor acumulación de carbohidratos que pueden producir tanto un mayor crecimiento vegetativo como un mayor tamaño de los frutos (Raffo *et al.*, 2019). En bayas, el efecto de la malla blanca, también se reflejó en índices de sabor (Jafary *et al.* (2022).

#### 5.5.3- pH

Si bien los resultados no mostraron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos, el PM presentó la curva de evolución con valores más altos en la temporada, frente a la curva mínima de las cepas del tratamiento TE. Las curvas de las variables peso de baya y brix tuvieron comportamientos similares en el período envero-vendimia, En oposición a la curva obtenida para acidez total que fue mínima para el tratamiento PM. Este análisis es consistente con los valores de correlación de Pearson observado entre pH con peso de baya, brix y acidez total (0,56; 0,88 y 0,76 respectivamente). El  $\delta^{13}\text{C}$  no presentó relación con el pH. Estas correlaciones también se reflejan en resultados obtenidos por Santesteban *et al.* (2017).

#### 5.5.4- Acidez titulable total

La acidez titulable total no presentó diferencias significativas a lo largo de la temporada entre los tratamientos, como los resultados obtenidos en ensayos de riego por Junquera *et al.* (2012) y Valentini *et al.* (2019). Se evidenciaron valores extremos de medias ajustadas, donde el TE tuvo el valor máximo de 10,92 g/L; y el tratamiento PM el mínimo de 9,34 g/L. Los datos responden a los análisis reportados por Trigo-Córdoba *et al.* (2015), Uriarte *et al.* (2015), Mirás-Avalos e Intrigliolo (2016), Santesteban *et al.* (2017a), Vilanova *et al.*, 2018 que indicaron que los azúcares y los ácidos orgánicos se correlacionan negativa y positivamente, respectivamente con  $\Psi$ ; también demostrado por van Leeuwen (2010), donde el ácido málico de las bayas disminuyó por el déficit hídrico y se correlacionó negativamente con el  $\delta^{13}\text{C}$ . Nuestros resultados tampoco evidenciaron diferencias en la acidez entre los diferentes tratamientos al momento de la cosecha, como si los reportados por Ghiglieno *et al.* (2020), donde la presencia de mallas antigranizo ralentizó la evolución del contenido de acidez titulable total y málica en bayas.

## Capítulo 6

### CONCLUSIONES

✓ Durante la temporada 2020 del período envero-vendimia, se pudo realizar un seguimiento del estado hídrico del cultivo mediante la técnica de potencial hídrico foliar. Se obtuvieron datos más homogéneos en el horario de preamanecer, de acuerdo a las ventajas del método. En el aspecto procedimental, las limitaciones operativas radicaron en la imposibilidad del traslado del equipo hacia el lugar de determinación, escaso rango horario al mediodía para validar las lecturas (1 hora), y ensayo destructivo que afectó a la superficie foliar de las cepas. El carácter instantáneo de la técnica, se reflejó en puntos mínimos y máximos en las curvas de seguimiento de la variable, lo que demuestra su utilidad en el control y seguimiento del riego. Por lo general, los valores de potencial hídrico foliar de preamanecer, estuvieron comprendidos en un rango de déficit hídrico bajo o nulo, mientras que los datos de mediodía presentaron valores con tendencia a estrés hídrico leve a moderado. Esto se debe a las condiciones climáticas extremas que se dan en el horario de determinación. Este análisis fue consistente con el estudio de las variables auxiliares microclimáticas.

✓ La relación del potencial hídrico foliar en función del tiempo, se trabajó mediante tres técnicas: estadística (aplicando modelos lineales, generales y mixtos), la integral de Myers y el área del trapecioide. Con las tres metodologías se determinó que el factor sistema de colocación era una fuente de variación en el estado hídrico de las vides. El estudio a partir de modelos lineales generales y mixtos, permitió el análisis de cada factor: color y sistema de colocación para todas las determinaciones de la temporada por tratamiento. Por otro lado, la propuesta de trabajar con los principios fundamentales de la integración gráfica fue exitosa, ya que permitió calcular un área equivalente, con la ventaja de independizar la determinación respecto del valor mínimo de la temporada que propone a Myers. Se destacó que la correlación entre la integral de potencial hídrico foliar y área del trapecioide, es -1. Y podría utilizarse indistintamente en estudios futuros.

✓ El  $\delta^{13}\text{C}$  integró el estado hídrico de viñedo cv Malbec para la temporada envero-vendimia, por lo que resultó ser un buen indicador. Se verificó la equivalencia de los resultados obtenidos, con escalas mundiales vigentes y se estableció que las cepas se desarrollaron sin déficit hídrico o estrés hídrico leve. Estos resultados fueron consistentes con el diseño de riego 100% full en función de la ETc y los indicadores de estado hídrico de preamanecer y mediodía. Debido a que se trabajó con un único sistema de riego, no se pudo obtener una relación

directa entre el potencial hídrico foliar con el  $\delta^{13}\text{C}$ ; ya que el estrés que generaron los diferentes tratamientos establecidos por los factores: color de malla antigranizo y sistema de colocación, no fue lo suficientemente significativo para generar una escala que favoreciera un ajuste lineal de las variables. Sin embargo, con ambas metodologías de seguimiento, se mostraron resultados acordes a un nivel hídrico.

✓ El comportamiento del potencial hídrico foliar (de preamanecer y mediodía) en relación al factor sistema de instalación y de la composición isotópica en relación al factor color, estarían relacionados a las diferencias entre los procesos de transpiración y fotosíntesis en las hojas, ya que, el potencial hídrico foliar mide el estado hídrico instantáneo de las vides y  $\delta^{13}\text{C}$  también está vinculado a la generación de fotoasimilados mediante la actividad fotosintética. Sería importante estudiar ambos procesos biológicos para evaluar las diferencias cuantitativamente.

✓ La composición isotópica de las bayas permitió analizar la influencia de los tratamientos de cobertura. Se identificó que el color de la malla antigranizo que favoreció el estado hídrico de los viñedos fue en nuestro caso el color negro. Se estima que la fuente de fraccionamiento isotópico que generaría las diferencias significativas sería la irradiancia. La presencia de las mallas antigranizo modificó la calidad de la luz incidente en las cepas, donde el efecto sombra del color negro reduciría la PAR, y la malla de color perla la aumentaría por procesos difusivos. De esta manera la actividad fotosintética sería mayor en la cobertura clara. Este análisis sería consistente con el aumento de peso en bayas desarrolladas en el tratamiento PM, pese a indicar valores de potencial hídrico de vides más estresadas que en los tratamientos de color negro. La metodología de composición isotópica de carbono en la determinación del estado hídrico de los viñedos arrojó resultados prometedores para su aplicación en el sector vitícola. Igualmente, para mejorar la implementación de esta nueva técnica, es necesario ampliar su estudio a nivel regional y en función del varietal, ya que a nivel mundial no se cuenta con una escala específica para el cultivar cv Malbec y los estudios vigentes indican que el  $\delta^{13}\text{C}$  es afectado por las características del viñedo.

## BIBLIOGRAFÍA

- Abeyasinghe, S.K. Greer, D.H., Rogiers, S.Y. (2019). *El efecto de la intensidad de la luz y la temperatura sobre el crecimiento de las bayas y la acumulación de azúcar en Vitis vinifera 'Shiraz' en condiciones de viñedo*. *Vitis*, 58, 7-16. <https://doi.org/10.5073/vitis.2019.58.7-16>
- Adams, M.A., Grierson, P.F. (2001). *Stable isotopes at natural abundance in terrestrial plant ecology and ecophysiology: An update*. *Plant Biol.* 2001;3(4):299-310. doi:Doi 10.1055/S-2001-16454.
- Ahmad, W. 2019. *Abiotic stresses and their effects, responses and adaptations in Grapevines (Vitis vinifera): Overview of modern research: a review*. *American journal of agricultural research* 33: 1-14.
- Alcarria, R., Bordel, B., Manso, M. Á., & Iturrioz, T. (2018). *Proceedings of the International Conference on Information Technology & Systems (ICITS 2018)*. In Á. Rocha & T. Guarda (Eds.), *Proceedings of the International Conference on Information Technology & Systems (ICITS 2018)*. (Vol. 721, Issue Icits 2018). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-73450-7>.
- Allen, R. G., Pereira, L.S., Raes, D. y Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration. Guidelines for computing water requirements* - FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO. Rome. ISBN 92-5-104219-5. ISSN 0254-5293
- Allen, R. G., Pereira, L.S., Raes, D. y Smith, M. (2006). *Estudio Riego y Drenaje N° 56 Evapotranspiración del cultivo Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Roma, Italia. ISSN 0254-529.
- Alonso, R.; Pereira, L. S.; Raes, D.; Smith, M. (2017). *Aplicación del modelo soil water characteristics a las condiciones de la región chaco- pampeana semiárida para la determinación de constantes hídricas de suelos*. *Rev. Fac. Agronomía y Cs. Agroalim. UM - Vol. VIII (2017)*. Argentina.
- Ambrose, S. H. (1993). *Isotopic analysis of paleodiets: Methodological and interpretive considerations*. En: M. K. Sandford (ed.), *Investigations of ancient human tissue. Chemical analysis in anthropology*, pp. 59-130. Pennsylvania, Gordon and Breach Science Publishers.

- Améglio, T.; Archer, P.; Cohen, M.; Valancogne, C.; Daudet, F.-A.; Dayau, S.; Cruiziat, P. (1999). *Significance and limits in the use of predawn leaf water potential for tree irrigation*. Plant and Soil, 207, 155-167.
- Araújo, M.; Santos, C.; Días, M.C. (2018). *¿Pueden las plantas jóvenes de olivo superar el choque térmico? En teoría y práctica de la adaptación climática*. Editores. F. Alves, WL Fiho y U. Azeiteiro. Cham, Suiza: Springer; 193-203.
- Araus, J.L., Amaro, T., Zuhair, Y., Nachit, M.M. (1997). *Effect of leaf structure and water status on carbon isotope discrimination in field-grown durum wheat*. Plant, Cell and Environment 20: 1484-1494.
- Arrigoni, S.P.A. (2021). *Soluciones para granizo y calor excesivo en los viñedos*. Infowine. Revista en internet de viticultura y enología NIF-IVA: IT01286830334. ISSN 1826-1590.
- Arthus, S.P., Stamps, R.H., Giglia, F.F. (2013). *Modificación ambiental dentro de casas de sombras sotosselectivas*. HortSciencia 48 (8), 975-979.
- Aruani, C., Quini, C. (2020). *Grado de compatibilidad entre la gestión sustentable y la adaptación al cambio climático en la industria vitivinícola argentina*. Instituto Nacional de Viticultura. Argentina
- Ayaque C., Sergio, Dadther H., H., Macedo V, D. (2020) *Uso de los parámetros de fluctuación del diámetro del tronco registrado continuamente como indicadores del estado hídrico y crecimiento real de la vid*. Manglar 17(4): 313-320, 2020. Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa, Perú.
- Azcon-Bieto, J. y Talón, M. (2008). *Fundamentos de fisiología vegetal*. 2da Edición. McGraw-Hill. Interamericana. España.
- Baena, M., Rodríguez, L., Tejero, M., Baeza, P. (2016). *Estimation of the hydric state of the vineyard from the water content of the soil, environmental conditions and foliar development*. In II Conference on viticulture: technical communications: Madrid, November 2016. Pp. 236-242. Polytechnic University of Madrid.
- Baeza Cano, R., Cánovas Fernández, G., Alonso López, F. y Contreras París J.I. (2022). *Uso de Tensiómetros Manuales y Electrónicos para la Gestión del Riego*. Almería. Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Desarrollo Sostenible. Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera, 2020. 1-17 p. Formato digital (e-book) - (Agricultura y Medio Ambiente).

- Barbour, M.M., Farquhar, G.D. (2000). *Relative humidity- and ABA-induced variation in carbon and oxygen isotope ratios of cotton leaves*. Plant, Cell and Environment 23: 473-485.
- Barzola-Elizagaray, P., Engelman, A. (2020). *La vitivinicultura en Mendoza desde 1990: entre la globalización y el desarrollo regional*. DOI: 10.17141/iconos.66.2020.3890
- Basantes, E.R. (2015). *Empleo de técnicas isotópicas en investigación agrícola, absorción y recuperación de fertilizantes en cultivos*. Revista Ciencia, Vol.17, 1137-145(2015).
- Basile, B., Romano, R., Giaccone, M., Barlotti, E., Colonna, V., Cirillo, C., Shahak, Y., and Forlani, M. (2008). *Use of photo-selective nets for hail protection of kiwi fruit vines in Southern Italy*. Acta Hort.,770:185–192.
- Bchir, A., Escalona, J.M., Gallé, A., Hernández-Montes, E., Tortosa, I., Braham, M. (2016). *Carbon isotope discrimination ( $\delta^{13}\text{C}$ ) as an indicator of vine water status and water use efficiency (WUE): looking for the most representative sample and sampling time*. AgricWaterManag 167:11–20 (2016).
- Beerling, D.J. y Woodward, F.I. (1995), *Leaf stable carbon isotope composition records increased water-use efficiency of C3 plants in response to atmospheric CO2 enrichment*. Functional Ecology, Vol. 9 No. 3, pp. 394-401.
- Bosco, L.C., Bergamaschi, H., Cardoso, L.S., de Paula, V.A., Marodin, G.A., y Nachtigall, G.R. (2015). *Apple production and quality when cultivated under anti-hail cover in Southern Brazil*. Int. J. Biomet,59: 773-782.
- Bota, J., Thomás, M., Flexas, J., Medrano, H., Escalona, J.M. (2015). *Differences among grapevine cultivars in their stomatal behavior and water use efficiency under progressive water stress*. Agricultural Water Management, vol. 164, Part 1, pp. 91-99.
- Boyer, J.S. (1967). *Leaf water potentials measured with a pressure chamber*. Plant Physiology 42: 133-137.
- Brillante, L., Martínez-Lüscher, J., Yu, R., and Kurtural, S. K. (2020). *Carbon isotope discrimination ( $\delta^{13}\text{C}$ ) of grape musts is a reliable tool for zoning and the physiological ground-truthing of sensor maps in precision viticulture*. Front. Environ. Sci. 8:561477. doi: 10.3389/fenvs.2020.561477.

- Brillante, L., Mathieu, O., Lévêque, J., van Leeuwen, C., Bois, B. (2017). *Water status and must composition in grapevine cv. Chardonnay with different soils and topography and a mini meta-analysis of the  $\delta^{13}\text{C}$ /water potentials correlation*. J Sci Food Agric, vol. 98, pp. 691-697. DOI 10.1002/jsfa.8516.
- Broadmeadow MSJ, Griffiths H, Ehleringer JR, Hall AE, Farquhar GD (1993) *Carbon isotope discrimination and the coupling of CO<sub>2</sub> fluxes within forest canopies*. In 'Stable isotopes and plant carbon-water relations'. (Eds JR Ehleringer, AE Hall, and GD Farquhar) (Academic Press,Inc.: San Diego)
- Brüggemann, N.; Gessler, A.; Kayler, Z; Keel, S.G.; Badeck, F.; Barthel, M.; Boeckx, P.; Buchmann, N.; Brugnoli, E.; Esperschütz, J.; Gavrichkova, O.; Ghashghaie, J.; Gomez-Casanovas, N.; Keitel, C.; Knohl, A.; Kuptz, D.; Palacio, S.; Salmon, Y.; Uchida, Y.; Bahn, M. (2011). *Carbon allocation and carbon isotope fluxes in the plant-soil-atmosphere continuum: a review*. Biogeosciences, 8: 3457-3489.
- Broadmeadow, M.S.J., Griffiths, H., Ehleringer, J.R., Hall, A.E., Farquhar, G.D. (1993) *Carbon isotope discrimination and the coupling of CO<sub>2</sub> fluxes within forest canopies*. In 'Stable isotopes and plant carbon-water relations'. (Eds JR Ehleringer, AE Hall, and GD Farquhar) (Academic Press,Inc.: San Diego)
- Brugnoli, E.; Farquhar, G.D. (2000) *Photosynthetic Fractionation of Carbon Isotopes*. In: Leegood, R.C., Sharkey, T.D. and Von Caemmerer, S., Eds., Photosynthesis: Physiology and Metabolism, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 352-434.
- Busso, C. A. (2008). *Uso de la cámara de presión y los psicrómetros a termocupla en la determinación de las relaciones hídricas en tejidos vegetales*. Revista Internacional de Botánica Experimental ΦΥΤΟΝ 77:327-350. ISSN 0031-9457
- Campbell, G.S. (1985). *Instruments for measuring plant water potential and its components*. En: Marshall, B. and F.I. Woodward (eds.), pp. 193-214. Instrumentation for environmental physiology. University Press, Cambridge, England.
- Canatella, Marcelo. *Todo sobre tela antigranizo para viñedos*. Vanguardid más vid más vino. Canal Acequia. <https://www.youtube.com/watch?v=dbvN4D2Farg>. Argentina.
- Cancela, J. J., González, X. P., Vilanova, M., Mirás-Avalos, J. M. (2019). *Water Management Using Drones and Satellites in Agriculture*. Water, 11(5), 874; <https://doi.org/10.3390/w11050874>.

- Cardona Serrate, F. (2019). *Actividad del agua en alimentos: concepto, medida y aplicaciones*. Departamento de Tecnología de Alimentos. Universidad Politécnica de Valencia. España.
- Castejón, A., Santamaría, G. (1993). *Tecnología eléctrica*. Mc Graw-Hill. Interamericana de España, S. A.
- Cerdá, J. M. (2020). *La transformación de la vitivinicultura mendocina*. La ruralidad en tensión. Editorial Teseo, 2020; pág. 213-242. ISBN 978-987-723-227-1. Argentina.
- Cevallos, H. V., Vargas Collaguazo, L., Vargas Collaguazo, J. (2018). *Uso de índices espectrales en la agricultura de precisión: caso de estudio campus de la facultad técnica de Machala*. Ecuador.
- Chaves, 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.
- Choneâ, X., van Leewen, C., Dubourdieu, D., Gaudilleâre, J. P. (2001). *Stem Water Potential is a Sensitive Indicator of Grapevine Water Status*. *Annals of Botany* 87: 477±483, 2001.doi:10.1006/anbo.2000.1361, available online at <http://www.idealibrary.com>.
- Cole, J., Pagay, V., (2015). Usefulness of early morning stem water potential as a sensitive indicator of water status of deficit-irrigated grapevines (*Vitis vinifera* L.). *Sci. Hortic. (Amsterdam)*. 191, 10–14. doi:10.1016/j.scienta.2015.04.034
- Costantini, E.A.C., Agnelli, A., Bucelli, P., Ciambotti, A., Dell’Oro, V., Natarelli, L., Pellegrini, S., Perria, R., Priori, S., Storchi, P., Tsolakis, C. and Vignozzi, N. (2013) *Unexpected relationship between  $\delta^{13}C$  and wine grape performance in organic farming*. *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin* 47, 269–285.
- Costantini, E.A.C., Pellegrini, S., Bucelli, P., Barbetti, R., Campagnolo, S., Storchi, P., Magini, S. and Perria, R. (2010) *Mapping suitability for Sangiovese wine by means of  $\delta^{13}C$  and geophysical sensors in soils with moderate salinity*. *European Journal of Agronomy* 33, 208–217.
- Curetti, M. y Raffo, D. (2022). *Manzanas: cuando el color es sinónimo de calidad*. Revista INTA, N90, pág. 23-29. Alto Valle. Argentina.

- Davies, C. y Robinson, S.P. (1996). *Sugar accumulation in grape berries. Cloning of two putative vacuole invertase DNAs and their expresión in grapevine tissues*. Plant Physiology 111, 275-283.
- Dayer, S. y Gambetta, G. A. (2021). *Transpiración nocturna: ¿contribuye al estrés hídrico en la vid?* IVES Technical Reviews viña y vino. <https://doi.org/10.20870/IVES-TR.2021.4681>
- Dayer, S., Gowdy, M., van Leeuwen, C.; Gambetta, G. (2020a). *Potenciar la respuesta de la vid a la sequía para incrementar la sostenibilidad del viñedo*. IVES Technical Reviews - published September 2020 <https://doi.org/10.20870/IVES-TR.2020.4482>
- Dayer, S., Herrera, J.C., Dai, Z., Burlett, R., Lamarque, L.J., Delzon, S., Bortolami, G., Cochard, H., Gambetta, G.A. (2020b). *The sequence and thresholds of leaf hydraulic traits underlying grapevine varietal differences in drought tolerance*. Journal of Experimental Botany 71, 4333–4344.
- Dayer, S., Echegoyen, M., Telechea, C., Prieto, J., Galat, E., Perez Peña, J. (2014). *Influencia de la exposición a la radiación sobre el metabolismo de hidratos de carbono en hojas de vid cv. Malbec*.
- Dayer, S.; Prieto, J. A.; Galat, E.; Pérez Peña, J. (2013). *Carbohydrate reserve status of Malbec grapevines after several years of regulated deficit irrigation and crop load regulation*. Australian Journal of Grape and Wine Research 19, 422–430, 2013. doi: 10.1111/ajgw.12044.
- Dayer, S., Pérez Peña, J., Prieto, J., E. Galat, E., Pulitti, F. (2012). *Evaluación de la sostenibilidad del riego deficitario controlado y manejo de la carga en vid concentración de azúcares (vitis vinifera l.) cv. malbec*
- Deloire, A., Pellegrino, A., Rogiers, S. (2020). *A few words on grapevine leaf wáter potential*. <https://doi.org/10.20870/IVES-TR.2020.3620>.
- Departamento General de Irrigación, DGI. (2019). *Informe 2019-2020*, 08 de octubre de 2019. <https://www.irrigacion.gov.ar/web/2019/10/08/el-pronostico-en-detalle/>
- Des Gachons, C.P., Van Leeuwen, C., Tominaga, T., Soyer, J.P., Gaudillere, J.P. and Dubourdiou, D. (2005). *Influence of water and nitrogen deficit on fruit ripening and aroma potential of Vitis vinifera L cv Sauvignon blanc in field conditions*. Journal of the Science of Food and Agriculture 85, 73– 85.

- Di Rienzo, J.A.; Macchiavelli, R.; Casanoves, F. (2012) *Modelos lineales mixtos: Aplicaciones en Infostat*. ISBN 978-987-27045-0-6. Córdoba. Argentina.
- Di Rienzo J.A., Casanoves F., Balzarini, M.G., Gonzalez L., Tablada M., Robledo C.W. (2011). *InfoStat versión 2011*. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>
- Di Rienzo J.A., Guzman A.W., Casanoves F. (2002). *A Multiple Comparisons Method based On the Distribution of the Root Node Distance of a Binary Tree Obtained by Average Linkage of the Matrix of Euclidean Distances between Treatment Means*. JABES 7(2), 129-142.
- Dimopoulos, N., Tindjau, R., Wong, D.C.J., Matzat, T., Haslam, T., Song, C., Gambetta, G.A., Kunst, L., Castellarin, S.D. (2020). *Drought stress modulates cuticular wax composition of the grape berry*. Journal of Experimental Botany 71, 3126–3141.
- Durán E., Ángel Y. y Suárez J. (2015). *Dinámica de la radiación fotosintéticamente activa en arreglos agroforestales con Hevea brasiliensis en el norte de la Amazona colombiana*. Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica 18 (2), 365-372.
- Ehleringer, J.R., Cooper, T.A. (1988). *Correlations between carbon isotope ratio and microhabitat in desert plants*. Oecologia 76, 562-566.
- Enciso, J., Porter, D., & Péries, X. (2018). *Uso de sensores de humedad en suelo para mejorar eficientizar el riego*. In Texas A&M Agrilife Extension (Vol. 39, Issue 5). <http://riograndewater.org/media/1080/e-618s-irrigation-monitoring-with-soil-watersensors-spanish-version.pdf>.
- Engler, A., Müller, D., Vrancken, S., Hecklein, M. (2020). *El cálculo integral*. ISBN 978-987-749-137-1. Universidad Nacional del Litoral. Argentina.
- Farquhar, G.D., Ehleringer, J.R., Hubick, K.T., (1989). *Carbon isotope discrimination and photosynthesis*. Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol. 40, 503–537.
- Fernández, R. J. y Trillo, N. (2005). *La textura del suelo como fuente de heterogeneidad; sus efectos sobre la oferta de agua para las plantas*. La heterogeneidad de la vegetación de los agroecosistemas (pp.171-192). Chapter: La textura del suelo como fuente de heterogeneidad; sus efectos sobre la oferta de agua para las plantas. Publisher: EFA. Editors: M. Oesterheld, M.R. Aguiar, C.M. Ghersa, J.M Paruelo. Argentina.
- Gambetta, G. A., Herrera, J. C., Dayer, S., Feng, Q., Hochberg, U., Castellarin, S. D. (2020). *The physiology of drought stress in grapevine: towards an integrative*

*definition of drought tolerance*. Journal of Experimental Botany, Vol. 71, No. 16 pp. 4658–4676, 2020. doi:10.1093/jxb/eraa245.

Gambetta, J. M., Holzapfel, B. P., Stoll, M., Friedel, M. (2021). *Sunburn in Grapes: A Review*. Front. Plant Sci., 08 January 2021. Sec. Plant Abiotic Stress Volume 11 - 2020 <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.604691>.

García Petillo, M.P. (2008). *Manejo del riego: uso de instrumentos de medición de agua del suelo y del estado hídrico de los cultivos, presentación de casos de estudio incluso en riego deficitario*. Jornadas sobre “Ambiente y Riegos: Modernización y Ambientalidad”. España.

Gaudillière, J. P., van Leeuwen, C., Ollat, N. (2002). Carbon isotope composition of sugars in grapevine, an integrated indicator of vineyard water status. J. Exp Bot. 2002 Apr, 53(369): 757-63. DOI: 10.1093/jexbot/53.369.757. PMID: 11886896.

Gaudin, R., Kansou, K., Payan, J-C., Anne Pellegrino, A., Garyet, C. (2014). *A Water Stress Index Based on Water Balance Modelling for Discrimination of Grapevine Quality and Yield*. OENO One, Jan 31, vol. 48, no. 1, pp. 1 CrossRef. ISSN 2494-1271. DOI 10.20870/oeno-one.2014.48.1.1655.

Ghiglieno, I., Mattivi, F., Cola, G., Trionfini, D., Perenzoni, D., Simonetto, A., Gilioli, G. y Valenti, L. (2020). *The effects of leaf removal and artificial shading on the composition of Chardonnay and Pinot noir grapes*. OENO One, 54(4), 761–777. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2020.54.4.2556>

Gili, P., Civera, M., Roy, R., y Surace, C. (2021). *An Unmanned Lighter-Than-Air Platform for Large Scale Land Monitoring*. Remote Sensing, 13(13), 2523. <https://doi.org/10.3390/rs13132523>.

Golberg, A. D., Ruiz, A. Quiroga, M. D.L. A., Fernández, O.A. (2011). *¿Qué sucede a un cultivo cuando no llueve?* Ediciones INTA 2011, EEA INTA Anguil “Ing. Agr. Guillermo Covas”, (6326), La Pampa, Argentina.

Golbert, A. (2010). *El viento de las plantas*. Rev. FCA UNCuyo. Tomo 42. N°1. Año 2010. Mendoza. Argentina

Gómez-Alonso, S., García-Romero, E. (2009). *Effect of irrigation and variety on oxygen ( $\delta^{18}\text{O}$ ) and carbon ( $\delta^{13}\text{C}$ ) stable isotope composition of grapes cultivated in a warm climate*. Aust J Grape Wine Res 16:283–289.

- Greenspan, M.D., Shackel, K.A., Matthews, M.A. (1994). *Developmental changes in the diurnal water budget of the grape berry exposed to water deficits*. Plant, Cell & Environment 17, 811–820.
- Greer, D.H., Rogiers, S.Y. (2009). *Water flux of Vitis vinifera L. cv. Shiraz bunches throughout development and in relation to late-season weight loss*. American Journal of Enology and Viticulture 60, 155–163
- Grimes, D. W y Williams, L. E. (1990). *Irrigation effects on plant water relation and productivity of Thompson seedless grapevines*. - Crop Sci. 30: 255 - 260.
- Guerra, V. I. (2021). *Micrometeorología: El clima bajo la lupa*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. oai:localhost:20.500.12123/9155
- Guix-Hébrard, N., Voltz, M., Trambouze, W., Garnier, F., Gaudillère, J.P., Lagacherie, P. (2007). *Influence of watertable depths on the variation of grapevine water status at the landscape scale*. Eur J Agr 27:187–196.
- Gutiérrez Ulloa, C. I. (2023). *Efecto del déficit hídrico sobre genes de la ruta fenilpropanoide en bayas de Cabernet Sauvignon (Vitis vinífera)*. <https://repositorio.unab.cl/xmlui/handle/ria/52791>
- Hernandez, J.J. (2021). *La promoción de la vitivinicultura argentina: seis décadas, una función, múltiples actores*. Mundo agrar. vol.22 no.50 La Plata ago. 2021. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.24215/15155994e169>.
- Herrero-Langreo, A., Tisseyre, B., Goutouly, J.P., Scholasch, T. and van Leeuwen, C. (2013). *Mapping grapevine (Vitis vinifera L.) water status during the season using carbon isotope ratio ( $\delta^{13}\text{C}$ ) as ancillary data*. American Journal of Enology and Viticulture 64, 307–315.
- Hoefs, J. 2009. *Geoquímica de isótopos estables* (Springer-Verlag: Berlín, Alemania).
- Huguet, J.G., Li, S.H., Lorendeau, J.Y., Pelloux, G. (1992). *Specific micromorphometric reactions of fruit trees to water stress and irrigation scheduling automation*. Journal of Horticultural Science 67(5): 631-640.
- Hurtado Mendoza, M. (2020). *Comportamiento del carbono y nitrógeno son determinantes para el desarrollo de uva de mesa*. Agraria.pe. Perú.
- Iglesias I. y Alegre S. (2006). *The effect of anti-hail nets on fruit protection, radiation, temperature, quality and profitability of 'Mondial Gala' apples*. Journal of Applied Horticulture 8(2): 91-100.

- Ilic, Z.S. y Fallik, E. (2017). *Light Quality Manipulation Improves Vegetable Quality at Harvest and Postharvest: A Review*. Environmental and Experimental Botany, 139, 79-90.  
<https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2017.04.006>
- InfoStat (2008). *InfoStat versión 2008*. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Instituto Nacional de Vitivinicultura, INV, (2019). Relevamiento vitivinícola argentino INV. Laboratorio Estadístico del INV 2019. Argentina.
- Instituto Nacional de Vitivinicultura, INV, (2022). Informe de variedades Malbec, Mendoza, Argentina – Abril 2022. [www.inv.gov.ar](http://www.inv.gov.ar).
- Intrigliolo, D. S., Lizama, V., García-Esparza, M. J., Abrisqueta, I., & Álvarez, I. (2016). *Effects of post-veraison irrigation regime on Cabernet Sauvignon grapevines in Valencia, Spain: Yield and grape composition*. Agricultural Water Management, 170, 110–119. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.10.020>
- Jackson R. D., S. B. Idso, R. J. Reginato, and P. J. Pinter. (1981). *Canopy temperature as a crop water stress indicator*. Water Resources Research 17(4): 1133–1138.
- Jafary, L., Kavooosi, B., Zare, H. (2022). *Response of some Vegetative, Qualitative and Quantitative Traits of Grape Vine (Vitis vinifera L. Cv. Rishbaba) to Type of Color and Percentage of Shading in Netting System*. L. Journal of Horticultural Science. DOI: 10.22067/jhs.2021.73470.1105
- Junquera, P., Lissarrague, J. R., Jiménez, L., Linares, R., y Baeza, P. (2012). *Long-term effects of different irrigation strategies on yield components, vine vigour, and grape composition in cv. Cabernet-Sauvignon (Vitis vinifera L.)*. Irrigation Science, 30(5), 351–361. <https://doi.org/10.1007/s00271-012-0348-y>
- Keller, M., Zhang, Y., Shrestha, P.M., Biondi, M., Bondada, B.R. (2015). *Sugar demand of ripening grape berries leads to recycling of surplus phloem water via the xylem*. Plant, Cell & Environment 38, 1048–1059.
- Keller, M. (2020). *The science of grapevines*. Academic press.
- Kirkham, M.B. (2005). *Principles of soil and plant water relations*. Elsevier Academic Press, New York. 500 p.

- Lenscak, M., Iglesias, N. (2019). *Invernaderos Tecnología apropiada en las regiones productivas del territorio nacional argentino*. Ediciones INTA. Colección Investigación, desarrollo e innovación. Argentina.
- Li, D., Fernández, J., Li, X., Xi, B., Jia, L., Hernández-Santana, V. (2020). *Tree growth patterns and diagnosis of water status based on trunk diameter fluctuations in fast-growing Populus tomentosa plantations*. *Agricultural Water Management* 241: 106348.
- Li, S.H.; Huguet, J.G.; Bussi, C. (1989). *Irrigation scheduling in a mature peach orchard using tensiometers and dendrometers*. *Irrigation and Drainage Systems* 3(1): 1-12.
- Lizama, V., Pérez-Álvarez, E. P., Intrigliolo, D. S., Chirivella, C., Álvarez, I., & García Esparza, M. J. (2021). Effects of the irrigation regimes on grapevine cv. Bobal in a Mediterranean climate: II. Wine, skins, seeds, and grape aromatic composition. *Agricultural Water Management*, 256(7). <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107078>
- López, G.; Boinia, A.; Manfrinia, L.; Torres-Ruiza, J.M.; Pierpaolia, E.; Zibordia, M.; Loscialeb, P.; Morandia, B.; Corelli-Grappadellia, L. (2018). *Effect of shading and water stress on light interception, physiology and yield of apple trees*. *G. Agricultural Water Management* 210 (2018) 140–148.
- Luque, J. L. (2011). *Riego por superficie, principios básicos*. INTA. Estación experimental Agropecuaria Chubut. Centro Regional Patagonia Sur. Argentina.
- Madhavan S, Treichel I, O' Leary MH (1991) *Effects of relative humidity on carbon isotope fractionation in plants*. *Botanica Acta* 104, 292-294.
- Mairata Pons, A. (2019). Tesis Máster Universitario: *Interés del  $\delta^{13}C$  en el uso del agua en vid*. (Especialidad/Itinerario biología de la planta) Universitat de les Illes Balears. España.
- Manja, K.; Aoun, M. (2019). *El uso de mallas para cultivos frutales de árboles y su impacto en la producción: una revisión*. *Scientia Horticulturae* 246 (2019), 110.122.
- Martín, V. M.; Gallego-Nicasio, B.; Pulido Lería, C. (2023). *Elaboración de vinos, otras bebidas alcohólicas, aguas cafés e infusiones*. Editorial IC. ISBN: 978-84-1103-425-8.
- Martínez, A.; Galarza, R.; Intrigliolo, D. S.; Marín, D.; Gonzaga Santesteban, L. (2018). *El ratio isotópico de carbono en viticultura: fundamentos de la técnica y utilidades*. ACE: Revista de enología, ISSN-e 1697- 4123, N°. 165.

- Martínez-Lüscher, J.; Chen, C.C.; Brillante, L.; Kurtural, S.K. (2017). *La exclusión parcial de la radiación solar con redes de sombra de color reduce la degradación de los ácidos orgánicos y flavonoides de la baya de la uva (Vitis vinífera L.)*. J. Agrícola. Química de los alimentos. 65, 10693-10702. Doi: 10.1021/acs.jafc.7b04163.
- Mateo, M.A., Ferrio, J.P., y Araus, J.L. (2004) *Isótopos estables en fisiología vegetal*. In: *La ecofisiología vegetal, una ciencia de síntesis* (eds M.J.Reigosa, N.Pedrol, & A.Sánchez), 113-160. Paraninfo, S.A., Madrid.
- Mateo, D. (2022). *Gestionar el agua de riego para aumentar la eficiencia y la productividad*. <https://intainforma.inta.gob.ar/gestionar-el-agua-de-riego-para-aumentar-la-eficiencia-y-la-productividad>.
- Mathey, D., M.; van Den Bosch, M.E. (2021). *Dinámica de las explotaciones agropecuarias en Mendoza 2002-2018*. Análisis comparativo en base a datos preliminares del CNA 2018. Realidad Económica 338 / 16 feb. al 31 mar. 2021 / Págs. 121 a 204 / issn 0325-1926. Argentina.
- Medrano, H. (2016). *Carbon isotope discrimination ( $\delta^{13}\text{C}$ ) as an indicator of vine water status and water use efficiency (WUE): Looking for the most representative sample and sampling time*. Agricultural Water Management, vol. 167, pp. 11-20.
- Medrano, H.; Bota, J.; Cifre, J.; Flexas, J.; Ribas-Carbó, M.; Gulías, J. (2007). *Eficiencia en el uso del agua por las plantas*. UA Revistes Científiques. Vol.43,pp.63-84.DOI: <https://doi.org/10.14198/INGEO2007.43.04>
- Mena Morales, A.; Martínez Gascueña, J.; Chacón Vozmediano, J.L.; Izquierdo Cañas, P.M.; Muñoz Organero, G. y Grupo MINORVIN. (2022). *Evaluación del estado hídrico de variedades minoritarias de vid de diferentes zonas vitícolas de España por medidas de la relación isotópica del carbono ( $\delta^{13}\text{C}$ )*. IV Jornadas del Grupo de Viticultura. Sociedad Española de Ciencias Hortícolas pág. 184-209. Editores: Gonzaga Santesteban, Nazareth Torres. Pamploma/Iruña. España.
- Middleton, S., and McWaters, A. (2002). *Hail netting of apple orchards - Australian experience*. Compact Fruit Tree,35: 51-55.
- Ministerio de Agroindustria. (2017). *Herramientas de manejo, control y monitoreo en viticultura*. INTA. Argentina
- Mirás-Avalos, J. M. y Araujo, E. S. (2021). *Optimization of vineyard water management: Challenges, strategies, and perspectives*. Water, 13(6), 746. <https://doi.org/10.3390/w13060746>

- Mirás-Avalos, J. M.; Trigo-Córdoba, E.; Bouzas-Cid, Y.; & Orriols-Fernández, I. (2016). *Irrigation effects on the performance of grapevine (Vitis vinifera L.) cv. "Albariño" under the humid climate of Galicia*. *OENO One*, 50(4), 183–194. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2016.50.4.63>
- Mirás-Avalos, J.M.; Intrigliolo, D.S. (2017). *Grape composition under abiotic constrains: water stress and salinity*. *Frontiers in Plant Science* 8, 851.
- Morejón Escudero, L. (2022). Tesis de grado. *Modificación de la frecuencia de riego deficitario y del posicionamiento de la superficie foliar en espaldera en Tempranillo: efectos hídricos, fisiológicos y agronómicos*. Universidad de Valladolid. España.
- Moriondo, M.; Ferrise, R.; Trombi, G.; Brilli, L.; Dibari, C.; Bindi, M. (2015). *Modelling olive trees and grapevines in a changing climate*. *Environmental Modelling & Software* 72, 387-401. 10.1016/j.envsoft.2014.12.016
- Mupambi, G., Anthony, B. M., Layne, D. R., Musacchi, S., Serra, S., Schmidt, T., Kalcsits, L. A. (2018). *The influence of protective netting on tree physiology and fruit quality of apple: A review*. *Scientia Horticulturae* 236: 60-72.
- Muskaan, R., Aggarwal, R. K.; Bhardwaj, S. K. (2022). *Effect of anti-hail net installations on microclimate around apple plants in orchards of Himachal Pradesh* *Journal of Agrometeorology*. ISSN: 0972-1665. Vol. No. 24 (1): 83-85 (March 2022). <https://journal.agrimetassociation.org/index.php/jam>.
- Myers, B.J. (1988). *Water stress integral –a link between short- term stress long-term growth*. *Tree Physiology* 4, pp. 315-323.
- Nahuel, C. G., Castro, P., Giménez, V., Osorio, R., Lázaro, H., Gómez, A., Nahuel, E. D., Vico, M., Luna, A., Carbajal Ramos, Irene, Prieto, J. (2023). *Impacto f color and anti-hail net installationsystem on microclimate and leafwater status in Vitis vinifera L. cv. Malbec in Mendoza, Argentina*. RAFV Conference 2023. XXXIV Argentinian Meeting of Plant Physiology. Sept 24-27, Rosario, Argentina.
- Nahuel, C.G. (2013). *Tesis Magister Scientiae Comportamiento agronómico de la vid (Vitis vinifera, L.) var. Merlot bajo tres sistemas de protección con malla plástica antigranizo*. Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza. Argentina.
- Naor, A., (2006). *Irrigation scheduling and evaluation of tree water status in deciduous orchards*. *Hortic. Rev. (Am. Soc. Hortic. Sci)*. 32, 111.

- Nazrala, J.J.B., Paladino, S. C., Vila, H. F., Lucero, C.C. (2009). *Manual de técnicas analíticas para mostos y vinos*. 1era Edición Ediciones INTA. Luján de Cuyo. ISBN 978-967-1623-41-9.
- O' Leary, M.H. (1995). *Environmental effects on carbon fractionation in terrestrial plants*. In 'Stable isotopes in the biosphere'. (Eds E Wada, T Yoneyama, M Minigawa, T Ando, and BD Fry) pp. 78-91. (Kyoto University Press: Kyoto)
- Olivares-Soto, H., Bastías, R. M., Calderón-Orellana, A., and López, M. D. (2020). *Sunburn control by nets differentially affects the antioxidant properties of fruit peel in 'gala' and 'Fuji' apples*. *Hortic. Environ. Biotechnol.* 61, 241–254. doi: 10.1007/s13580-020-00226-w
- Oliveros Díaz, Mauricio. (2023). *La conductancia estomática (gs), importancia función y factores de influencia. medición de la conductancia estomática (gs) a través del porómetro de difusión estable en diferentes cultivos. cosmoagro s. a. 1. concepto y definición de la conductancia estomática (gs)*. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2014.48.1.1655>
- Ollat, N., Gaudillère, J. (2000). *Carbon balance and developing grapevine berries*. *Acta Horticultrae*, 526, 345-350.
- Pachés Giner, M. A. (2019). *El agua en el suelo: fuerzas de retención*. Departamento de Ingeniería hidráulica y medio ambiente. Universidad politécnica de Valencia.
- Pallotti, L., Silvestroni, O., Dottori, E., Lattanzi, T., Lanari, V. (2023). *Effects of shading nets as a form of adaptation to climate change on grapes production: a review*. Vol. 57 No. 2 (2023): OENO One, Published: 22 June 2023. DOI: <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2023.57.2.7414>.
- Panek, J.A.; Waring, R.H. (1995). *Carbon isotope variation in Douglas-fir foliage: improving the  $\delta^{13}\text{C}$  climate relationship*. *Tree Physiology*, 15: 657- 663.
- Panek, J.A.; Waring, R.H. (1997). *Stable carbon isotopes as indicators of limitation to forest growth imposed by climate stress*. *Ecological Applications*, 7: 854 – 863.
- Pascual España, B.; Pascual Seva, N. (2020). *Riegos de gravedad y a presión* (4ª ed.) Valencia: editorial Universitat Politècnica de Valencia. España.
- Peano, C.; Giacolone, G., Bosio, A., Vittone, G.; Bounous., G. (2001). *Influence of anti-hail nets on the quality of apples*. *Magazine Fruit Grow.*, 9: 61-64.
- Pérez Leal, F. (2017). *Fisiología vegetal Parte I*. Universidad Nacional de Ucayali. Perú.

- Plantevin, M., Gowdy, M. Destrac-Irvine, A. Elisa Marguerit, Gambetta, G. A., van Leeuwen, C. (2022). *Using  $\delta^{13}\text{C}$  and hydroscares for discriminating cultivar specific drought responses*. Vine and wine Open Access Journal, July 3-8, 2022. XIV th International Terroir Congress. DOI:10.20870/oeno-one.2022.56.2.5434. Bordeaux, France.
- Polley, H.W., Johnson, H.B., Marino, B.D. and Mayeux, H.S. (1993), <sup>3</sup>Increase in C3 plant water-use efficiency and biomass over glacial to present CO2 concentrations<sup>o</sup>, Nature London, Vol. 361 No. 6407, pp. 61-4.
- Poni, S., Laskso, A.N., Turner, J.R., Melious, R.E. (1994). *Interactions of crop level and late season water stress on growth and physiology of field-grown Concord grapevines*. American Journal of Enology and Viticulture 45:252-258.
- Prieto, J. (2021). *El microclima de la vid. INTA Informa Podcasts información destacada en investigación, desarrollo e innovación*. INTA. Mendoza. Argentina.
- Raffo, D., Curetti, M. (2022). *Manzanas: cuando el color es calidad*. Revista INTA Alto Valle, 90. Río Negro. Argentina.
- Raffo, M., Rodriguez, A., Cureyi, M., Calvo, G. Muñeco, L. (2019). *Experiencias en el uso de mallas antigranizo para la protección de manzanos en el Alto Valle de Río Negro y Neuquén, Argentina*. INIA Las Brujas. Seminario de actualización técnica en frutales de pepita. Uruguay.
- Raffo, M.D., Cortona, A., Curetti, M., Menni, F., De Angelis, V. (2015). *Empleo de mallas antigranizo para el control del asoleado en manzanas (*Malus domestica* Borkh), en el Alto Valle de Río Negro*. Horticultura Argentina 34(83): 20-30.
- Rey Pastor, J., Pi Calleja, P., Trejo, C. A. (1958). *Análisis matemático*. Volumen 1. Editorial Kapelusz. Buenos Aires. Argentina.
- Rienth, M., Laurent, C., Scholasch, T. (2023). *Cuáles son los métodos basados en la planta para evaluar el estado hídrico de la vid*. Enolife, 12 de marzo 2023. <https://enolife.com.ar/es/cuales-son-los-metodos-basados-en-la-planta-para-evaluar-el-estado-hidrico-de-la-vid/>
- Ríos-Hernández, R. (2021). *Uso de los Drones o Vehículos Aéreos no Tripulados en la Agricultura de Precisión*. Revista Ingeniería Agrícola, vol. 11, núm. 4, e10, 2021, Octubre-Diciembre. Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola. ISSN: 2306-1545, ISSN: 2227-8761.

- Rodríguez, J. G., Matus, M. S., Catania, C. D. y de Del Monte, S. A. (1999). *Caracterización ampelográfica de la variedad Malbec, cultivada en Mendoza (Argentina) según el método de la OIV*. Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Cuyo, 31(2), 85-93.
- Rogiers, S.Y., Hatfield, J.M., Jaudzems VG, White RG, Keller M. (2004). *Grape berry cv. Shiraz epicuticular wax and transpiration during ripening and preharvest weight loss*. American Journal of Enology and Viticulture 55, 121–127.
- Román González, A., Vargas Cuentas, N. I., (2013). *Análisis de imágenes hiperespectrales*. Revista Ingeniería & Desarrollo, 35, 14-17.
- Santesteban, L.G.; Miranda, C.; Marín, D.; Sesma, B.; Intrigliolo, D.S; Mirás-Ávalos, J.M.; Escalona, J.M.; Montoro, A.; De Herralde, F.; Baeza, P.; Romero, P.; Yuste, J.; Uriarte, D.; Martínez-Gascueña, J.; Cancela, J.J.; Pinillos, V.; Loidi, M.; Urrestarazu, J.; Royo, J. (2021). *Medir el potencial hídrico: cuándo, dónde y por qué?* Infowine. Revista en Internet de Viticultura y Enología. España.
- Santesteban, L. G., Di Gennaro, S.F., Herrero-Langreo, A., Miranda, C., Royo, J.B., Matese, A. (2017)a. *High-resolution UAV-based thermal imaging to estimate the instantaneous and seasonal variability of plant water status within a vineyard*. Agric Water Manag. 2017;183:49-59.
- Santesteban, L.G., Miranda, C., Urrestarazu, J., Loidi, M., Royo, J.B. (2017)b. *Severe trimming and enhanced competition of laterals as a tool to delay ripening in Tempranillo vineyards under semiarid conditions*. OENO One. 2017;51(2):191-203. doi:10.20870/oenone.2016.0.0.1583.
- Santesteban, L.G., Miranda, C., Barbarin, I. y Royo, J.B. (2015), *Stable isotopes in viticulture: a review*. Australian Journal of Grape and Wine Research, 21: 157-167. <https://doi.org/10.1111/ajgw.12124>.
- Santesteban, L.G., Di Gennaro, S.F., Herrero-Langreo, A., Miranda, C., Royo, J.B., Matese, A. (2016). *High-resolution UAV-based thermal imaging to estimate the instantaneous and seasonal variability of plant water status within a vineyard*. Agric Water Manag. 2017;183:49-59. doi:10.1016/j.agwat.2016.08.026.
- Santesteban, L.G., Miranda, C., Urrestarazu, J., Vizcaya, I.; Royo, J.B. (2014). *El ratio isotópico del carbono ( $\delta^{13}C$ ) como método de integración a posteriori del estado hídrico del viñedo*. I Jornadas del Grupo de Viticultura y Enología de la Sech – Retos Actuales de I+D en Viticultura, Navarra, España, pp. 146-152.

- Schilardi, C. (2021). *Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera, RASPA*. Posgrado FCA-Universidad Nacional de Cuyo. [https://www.researchgate.net/profile/Carlos\\_Schilardi](https://www.researchgate.net/profile/Carlos_Schilardi)
- Schölander, P.F., Hammel, H.T., Bradstreet, E.D., Hemmingsen, E.A., (1965). *Sap pressure in vascular plants*. Science (80). 148, 146–346.
- Schomwandt, David. (2015). *Teledetección aplicada a las ciencias agronómicas y recursos naturales*. - 1a ed. - Ciudad Autónoma de Buenos Aires: el autor, 2015. ISBN 978-987-33-6687-1
- Secretaría de Ambiente y Ordenamiento Territorial Gobierno de Mendoza, 2022. Informe ambiental 21-22. <https://www.mendoza.gov.ar/wp-content/uploads/sites/15/2022/06/INFORME-AMBIENTAL-2021-2022.pdf>.
- Souza, C., Maroco, J., Dos Santos, T.P., Rodrigues, M.L., Lopes, C.M., Pereira, J.S., Chaves, M. (2005). Impact of deficit irrigation on water use efficiency and carbon isotope composition ( $\delta^{13}\text{C}$ ) of field-grown grapevines under Mediterranean climate. Journal of Experimental Botany, Portugal, vol. 56, No 418, pp. 2163-2172, DOI:10.1093/jxb/eri216.
- Spangenberg, J. E; Schweizer, M.; Zufferey, V. (2020). *Shifts in carbon and nitrogen stable isotope composition and epicuticular lipids in leaves reflect early water-stress in vineyards*. Science of the Total Environment 739 (2020) 140343
- Spangenberg, J.E., Zufferey, V., (2018). *Changes in soil water availability in vineyards can be traced by the carbon and nitrogen isotope composition of dried wines*. Sci. Total Environ. 635, 178–187.
- Spangenberg, J.E.; Vogiatzaki, M.; Zufferey, V. (2017). *Gas chromatography and isotope ratio mass spectrometry of pinot noir wine volatile compounds ( $\delta^{13}\text{C}$ ) and solid residues ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$ ) for the reassessment of vineyard water-status*. J. Chromatogr. A 1517, 142–155.
- Tanny, J., Cohen, S., Grava, A., Naor, A., and Lukyanov., V. (2009). *The effect of shading screens on microclimate of apple orchards*. Acta Horti., 807: 103-108.
- Tomás, M., Medrano, H., Brugnoli, E., Escalona, J. m., Martorell, S., Pou, A., Ribas-Carbó, M., y Flexas, J. (2014). *Variability of mesophyll conductance in grapevine cultivars under water stress conditions in relation to leaf anatomy and water use efficiency*. Australian Journal of Grape and Wine Research, 20(2), 272–280. <https://doi.org/10.1111/ajgw.12069>

- Trigo-Córdoba, E., Bouzas-Cid, Y., Orriols-Fernández, I., & Mirás-Avalos, J. M. (2015). *Effects of deficit irrigation on the performance of grapevine (Vitis vinifera L.) cv. "Godello" and "Treixadura" in Ribeiro, NW Spain*. *Agricultural Water Management*, 161, 20–30. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.07.011>
- Tummala, A. R., Dutta, A. (2017). *An overview of Cube-Satellite propulsion technologies and trends*. *Aerospace*, 4(4), 1–30. <https://doi.org/10.3390/aerospace4040058>.
- Turner, N.C. (1987). *The use of the pressure chamber in studies of plant water status. Proceedings of the International Conference on Measurement of Soil and Plant Water Status*. Utah State University, Logan, Utah. Vol. 2: 13-24
- Uriarte, D., Intrigliolo, D. S., Mancha, L. A., Valdés, E., Gamero, E., & Prieto, M. H. (2016). *Combined effects of irrigation regimes and crop load on "Tempranillo" grape composition*. *Agricultural Water Management*, 165, 97–107. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.11.016>
- Urvieta, R., Gregory, J., Buscema, F., Bottini, R., Fontana, A. (2021). *Terroir and vintage discrimination of Malbec wines based on phenolic composition across multiple sites in Mendoza, Argentina*. *Scientific Reports* (11:2863). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-82306-0>
- Valentini, G., Allegro, G., Pastore, C., Colucci, E., Magnanini, E., & Filippetti, I. (2019). *Climate change and vine training systems: the influence different spatial distribution of shoots may have on sugar accumulation in Sangiovese grapevines*. *BIO Web of Conferences*, 13, 04006. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20191304006>
- Valone, R. C. (1998). *Influencia del estado hídrico sobre desarrollo, rendimiento y calidad enológica en vid*. Tesis Magister Scientiae. Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza. Argentina.
- Van den Bosch, M. E. (2022). *Evaluación económica de las pérdidas por granizo en los oasis de la provincia de Mendoza e identificación de eventos extremos*. Copyright: Facultad de Ciencias Económicas, Universidad de Buenos Aires. ISSN: 2250-687X - ISSN (En línea): 2250-6861. Argentina.
- van Leeuwen C.; Trégoat, O.; Choné, X.; Bois, B.; Pernet, D.; Gaudillère, J-P. (2009). *Vine water status is a key factor in grape ripening and vintage quality for red Bordeaux wine*. How can it be assessed for vineyard management purposes? *J. Int. Sci. Vigne Vin*, 43(3), 121– 134.
- van Leeuwen, C.; Barbe, J-C.; Darriet, P.; Geffroy, O.; Gomès, E.; Guillaumie, S.; Helwi, P.; Laboyrie, J.; Lytra, G.; Le Menn, N.; Marchand, S.; Picard, M.; Pons, A.; Armin

- Schüttler, A.; Thibon, C. (2020). *Recent advancements in understanding the terroir effect on aromas in grapes and wines*. *OENO One* 20, 985-1006. DOI:10.20870/oeno-one.2020.54.4.3983
- van Leeuwen, C. (2010). *Terroir: the effect of the physical environment on vine growth, grape ripening and wine sensory attributes*. DOI:10.1533/9781845699284.3.273. ENITA - Université de Bordeaux, France.
- van Leeuwen, C. (2018). *Terroir: The effect of the physical environment on vine growth, grape ripening and wine sensory attributes*. DOI:10.1533/9781845699284.3.273
- van Leeuwen, C.; Pieri, P.; Gowdy, M.; Ollat, N.; Roby, J.-P. (2019). *Reduced density is an environmental friendly and cost effective solution to increase resilience to drought in vineyards in a context of climate change*. *OENO One* 53, 129–146 (2019). <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2019.53.2.2420>
- van Leeuwen, C.; Trégoat, O; Choné, X.; Bois, B.; Pernet D. and Gaudillère J-P. (2009). *Vine water status is a key factor in grape ripening and vintage quality for red Bordeaux wine. How can it be assessed for vineyard management purposes?* *J. Int. Sci. Vigne Vin*, 43(3), 121– 134.
- van Zyl, J. L. y H. W. Weber.1981. *The effect of various supplementary irrigation treatments on plant and soil moisture relationships in a vineyard (Vitis vinifera var. Chenin Blanc)*. *S.Afr.J.Enol. Vitic. Vol 2*: 83-99.
- Venios, X., Korkas, E., Nisiotou, A., & Banilas, G. (2020). *Grapevine responses to heat stress and global warming*. *Plants*, 9(12), 1–15. <https://doi.org/10.3390/plants9121754>
- Vila, H.; Pérez Peña, J.; Cavagnaro, J.B. (2013). *Evitación del estrés en la vid: estrategias varietales frente al déficit hídrico*. INTA. Repositorio.inta.gob.ar
- Vila, H.F., Paladino, S. C.; Nazralla, J. J. B.; Lucero, C. C. (2010). *Manual de calidad de uva. Guía práctica para conocer y evaluar la calidad de uva para vino*. 1ra Edición, Luján de Cuyo, Mendoza, Argentina: Ediciones INTA, 2010. ISBN 978-987-1623-78-5.
- Vila, H.F., Paladino, S. C.; Nazralla, J. J. B.; Lucero, C. C. (2009). *Manual de técnicas analíticas para la evaluación de compuestos fenológicos y otros componentes de la uva*. 1ra Edición, Luján de Cuyo, Mendoza, Argentina, Ediciones INTA 2009. ISBN 978-967-1623-42-6.

- Vilanova, M., Rodríguez-Nogales, J. M., Vila-Crespo, J., Yuste, J. (2018). *Influence of water regime on yield components, must composition and wine volatile compounds of Vitis vinifera cv. Verdejo*. Australian Journal of Grape and Wine Research, 25(1), 83-91. <https://doi.org/10.1111/ajgw.12370>
- Villalobos-González, L., Muñoz Araya, M., Franck, N., Pastenes, C. (2019). *Controversias en midday water, regulación potencial y estomática. Controversies in Midday Water Potential Regulation and Stomatal Behavior Might Result From the Environment, Genotype, and/or Rootstock: Evidence From Carménère and Syrah Grapevine Varieties*. doi.org/10.3389/fpls.2019.01522
- Villalpando Tovalín, F. (2022). Tesis doctoral *Estructura de ensamble de datos georreferenciados y no referenciados a través de optimización de estrategias fotogramétricas SFM-MVS: aplicaciones en cuerpos de agua superficiales*. Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C. San Luis Potosí. México.
- Warren, C.R.; McGrath, J.F.; Adams, M.A. (2001) *Water availability and carbon isotope discrimination in conifers*. Oecologia 127, 476-486.
- Werner, C.; Schnyder, H.; Cuntz, M.; Keitel, C.; Zeeman, M.J.; Dawson, T.E.; Badeck, F.W.; Brugnoli, E.; Ghashghaie, J.; Grams, T.; Kayler, Z.; Lakatos M.; Lee, X.; Máguas, C.; Ogée, J.; Rascher, K.G.; Siegwolf, R.T.W.; Unger, S.; Welker, J.; Wingate, L.; Gessler, A. (2012). *Progress and challenges in using stable isotopes to trace plant carbon and water relations across scales*. Biogeosciences, 9: 3083 – 311.
- Williams, L. E., Do Koozliam, N. K. y Wample, R. (1994). *Grape*. In: *Handbook of Environmental Physiology of fruit crops*. Vol. I: Temperature crops. B. Schaffer and P. Anderser (Ed.) pp. 85-133. CRC Press, Inc. Florida - USA.
- Yakir, D., Israeli, Y. (1995). *Reduced solar irradiance effects on net primary productivity (NPP) and the  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  values in plantations of Musa sp., Musaceae*. Geochimica et Cosmochimica Acta 59, 2149-2151.
- Young, H. D., Freedman, R., Sears, Zemansky. (2009). *Física Universitaria con física moderna*. Volumen 2. Decimosegunda edición. Pearson educación, México, 2009.
- Yuste, J., Vicente, A., & Martínez-Porro, D. (2018). *La dosis de riego en cv. Verdejo: Estado hídrico, efectos fisiológicos y repercusión agronómica en la D.O. Rueda*.

*Instituto Tecnológico Agrario de Castilla y León. CN Riegos XXXVI, Valladolid.*  
<https://doi.org/10.25028/cnriegos.2018.a02>.

Zimmerman JK, Ehleringer JR (1990) *Carbon isotope ratios are correlated with irradiance levels in the Panamanian orchid *Catasetum viridiflavum**. *Oecologia* 83: 247-249.

### **ANEXO 1: Cálculo de la ETc y Programa de riego**

Procedimiento de cálculo para la determinación de la ETc de acuerdo:

$$ETc = Kc * ETo \quad (4.1)$$

En función de la base de datos climatológicos, se estimó la tasa de evapotranspiración del cultivo de referencia (ET<sub>o</sub>). Se estableció el coeficiente de cultivo (K<sub>c</sub>) para fase inicial, media y final del cultivo para zonas áridas mediante el modelo computarizado de parámetros físicos Soil Water Characteristics (Alonso *et al.*, 2017) y procedimientos FAO 56. El software, utiliza el método de la FAO Penman-Monteith (Allen *et al.*, 2006) para determinar la evapotranspiración (ET<sub>c</sub>) en base a datos climáticos ET<sub>o</sub> y del cultivo (K<sub>c</sub>). A partir de los resultados obtenidos del software se estimaron analíticamente los requerimientos de agua para los viñedos. Por último, en función de los requerimientos de agua para el cultivo y un porcentaje de rendimiento para sistemas de riego por goteo, se organizó el sistema de riego con frecuencia de cada dos días y reposición a capacidad de campo, para asegurar una temporada sin estrés hídrico en el cultivo (Montoro Rodríguez *et al.*, 2021).

### 7.1- Caracterización climática

La evapotranspiración se calculó con los datos meteorológicos de acuerdo a la base de registros climáticos anteriormente citados; aplicados en el programa CROPWAT 8.0. La estación AERO San Rafael, se ubicó con el número de localización 57 de la base de datos del simulador, localizada en: longitud Sur 34,58 y Latitud oeste 68,40; con una elevación de 748 m. Para la variable velocidad del viento, se tuvo en cuenta el ajuste por altura que recomienda el procedimiento FAO 56.

Se modificó la velocidad del viento de la base de datos, para proyectar los valores a la altura de canopia, aproximadamente 2 metros de altura (7.1). Estas modificaciones se llevaron a cabo, debido a que los valores de velocidad obtenidos de la estación meteorológica, se registran a 10 metros desde el nivel del suelo. De acuerdo a la siguiente ecuación, se obtuvieron los resultados necesarios para estimar la ET<sub>o</sub>.

$$v = v1 * \frac{4.87}{\ln(67.8 * z - 5.42)} \quad (7.1)$$

Donde las variables son:

*v* velocidad del viento a 2 m sobre la superficie [m s<sup>-1</sup>],

*v1* velocidad del viento medida a *z* m sobre la superficie [m s<sup>-1</sup>],

*z* altura de medición sobre la superficie [m].

Como se observa en la tabla 18, la reducción de la velocidad de circulación del aire a 2 metros de altura desde el nivel del suelo, es significativamente menor y representa un 25% de disminución de la variable.

Tabla 18. Valores de velocidad del viento ajustados a la altura de canopia en función de las velocidades medias registradas por la estación meteorológica AERO San Rafael.

|            | Velocidad del viento (10 metros) (km/día) | Velocidad del viento corregida (2 metros)(km/día) |
|------------|---|---|
| Enero      | 121                                       | 91  |
| Febrero    | 121                                       | 91  |
| Marzo      | 95  | 71  |
| Abril      | 95  | 71  |
| Mayo       | 121                                       | 91  |
| Junio      | 95  | 71  |
| Julio      | 121                                       | 91  |
| Agosto     | 147                                       | 110   |
| Septiembre | 164                                       | 123   |
| Octubre    | 147                                       | 110   |
| Noviembre  | 147                                       | 110   |
| Diciembre  | 147                                       | 110   |

En función de la base de datos climatológicos históricos de velocidad de viento, insolación y radiación de estación Aero San Rafael, en conjunto con los valores de los registros de la estación meteorológica INTA, Rama Caída (Temperatura mínima y máxima y humedad relativa). El cálculo se ejecutó con la velocidad del viento corregida por la variable altura de cultivo. La localización de la base estación Aero San Rafael, ubicada en el distrito de Las Paredes, corresponde a la posición 57 de la base de datos de CROPWAT.

El programa informático, estima la ETo mensual expresada en mm de agua/día, y un promedio anual.

De acuerdo a la Figura 41, se puede observar que durante los meses del ensayo: enero, febrero y marzo; la evapotranspiración del cultivo de referencia, ETo, fueron de 5,35; 4,85 y 3,45 (mm de agua/día).

Los valores muestran una relación directa con el descenso de las temperaturas mínimas, máximas, insolación y radiación en función del avance de la temporada estival.

| País            | Location 57 |             | Estación  | SAN-RAFAEL-AERO+INTA |            |                        |             |    |
|-----------------|-------------|-------------|-----------|----------------------|------------|------------------------|-------------|----|
| Altitud         | 748         | m.          | Latitud   | 34.58                | °S         | Longitud               | 68.40       | °W |
| Mes             | Temp Min    | Temp Max    | Humedad   | Viento               | Insolación | Rad                    | ETo         |    |
|                 | °C          | °C          | %         | km/día               | horas      | MJ/m <sup>2</sup> /día | mm/día      |    |
| Enero           | 14.2        | 30.9        | 52        | 91                   | 9.2        | 24.9                   | 5.35        |    |
| Febrero         | 13.1        | 29.6        | 56        | 91                   | 9.2        | 23.3                   | 4.85        |    |
| Marzo           | 10.9        | 26.2        | 65        | 71                   | 7.6        | 18.2                   | 3.45        |    |
| Abril           | 6.7         | 22.6        | 60        | 71                   | 6.4        | 13.4                   | 2.35        |    |
| Mayo            | 3.3         | 19.1        | 64        | 91                   | 5.2        | 9.5                    | 1.63        |    |
| Junio           | 0.3         | 15.5        | 71        | 71                   | 4.8        | 8.0                    | 1.03        |    |
| Julio           | -0.6        | 15.3        | 63        | 91                   | 5.4        | 9.0                    | 1.23        |    |
| Agosto          | 1.0         | 17.6        | 58        | 110                  | 5.4        | 11.2                   | 1.85        |    |
| Septiembre      | 3.4         | 19.8        | 58        | 123                  | 6.4        | 15.4                   | 2.68        |    |
| Octubre         | 6.9         | 23.6        | 58        | 110                  | 7.2        | 19.4                   | 3.58        |    |
| Noviembre       | 10.3        | 27.0        | 59        | 110                  | 8.0        | 22.6                   | 4.51        |    |
| Diciembre       | 12.9        | 29.8        | 52        | 110                  | 8.8        | 24.7                   | 5.30        |    |
| <b>Promedio</b> | <b>6.9</b>  | <b>23.1</b> | <b>60</b> | <b>95</b>            | <b>7.0</b> | <b>16.6</b>            | <b>3.15</b> |    |

Figura 41. Resultado de interfase CROPWAT 8.0. Registros estación AERO San Rafael, base histórica vinculada a CROPWAT 8.0, con velocidad corregida a 2 metros de altura.

### 7.2- Cálculo de precipitación efectiva

Se consideró el contexto de región árida, dado el valor de la sumatoria anual de precipitaciones de valores históricos, de 341.3 mm. Para el cálculo de precipitación efectiva, se tienen en cuenta criterios de diseño en el peor escenario, por lo que se utilizó la fórmula empírica para el cálculo de la precipitación efectiva, donde el único aporte hídrico mínimamente significativo es en enero, con un valor de 5,6 mm de acuerdo a la tabla 19.

Tabla 19. Precipitación (mm) y Precipitación efectiva (mm) en CROPWAT 8.0

| Mes        | Precipit. (mm) | Prec. Efec (mm) |
|------------|----------------|-----------------|
| Enero      | 47.6           | 5.6             |
| Febrero    | 44.5           | 0.0             |
| Marzo      | 34.8           | 0.0             |
| Abril      | 25.9           | 0.0             |
| Mayo       | 16.3           | 0.0             |
| Junio      | 10.9           | 0.0             |
| Julio      | 10.8           | 0.0             |
| Agosto     | 12.0           | 0.0             |
| Septiembre | 21.1           | 0.0             |
| Octubre    | 34.0           | 0.0             |
| Noviembre  | 35.2           | 0.0             |
| Diciembre  | 39.7           | 0.0             |
| Total      | 332.8          | 0.0             |

### 7.3- Caracterización del cultivo

Para determinar las variables necesarias que caracterizan el cultivo, se determinó el  $K_c$  de acuerdo al procedimiento propuesto en FAO 56 (Allan *et al.*, 2006); y se establece el calendario de riego durante 190 días, desde 25 de setiembre hasta el 02 de abril; y se estimó el  $K_c$  ini (coeficiente del cultivo durante la etapa inicial de crecimiento),  $K_c$  med (coeficiente del cultivo durante la etapa de mediados de temporada) y el  $K_c$  fin coeficiente del cultivo al finalizar la etapa final de crecimiento.

#### 7.3.1- Ajustes de $K_c$ por condiciones climáticas

De acuerdo a los datos históricos, para el mes de inicio de la simulación, trabajamos los resultados de la interfase 1, a partir del dato  $ETo$ ; y la frecuencia implementada por sistema riego por goteo automatizado cada dos días. Se calculó  $K_c$  para inicio, mediados y final de desarrollo vegetativo del cultivo, de acuerdo a ecuaciones (7.2), (7.3), (7.4) y (7.5) y complemento de gráficas de acuerdo a procedimiento FAO 56 (Allen *et al.*, 2006).

$K_c$  ini

- $ETo$  de Septiembre= 2.68 mm
- Frecuencia de riego = 2 días

$$K_{c\ ini} = K_{c\ ini(\text{Fig.29})} + \frac{(I-10)}{(40-10)} * [K_{c\ ini(\text{Fig.30})} - K_{c\ ini(\text{Fig.29})}] \quad (7.2)$$

$$K_{c\ ini} = 0,97 + \frac{(30-10)}{(40-10)} * [1,55 - 0,5] = 1,67$$

- Ajuste de  $K_{c\ ini}$  según frecuencia de mojado de la superficie

$$K_{c\ ini} = K_{c\ ini} * 0,35 \quad (7.3)$$

$$K_{c\ ini} = 1,67 * 0,35 = 0,58$$

- Ajuste de  $K_{c\ ini}$  para el período: mes setiembre

$$K_{c\ ini} = 0,58$$

$K_c$  med

- De acuerdo a FAO 56 (Allan *et al.*, 2006):  $K_{c\ med}$ : 0.70, para vid.

$$K_{c\ med} = K_{c\ med} + [0,04 * (v^2 - 2) - 0,004 * (HR_{\min} - 45)] * \left(\frac{h}{3}\right)^{0.3} \quad (7.4)$$

Dónde:

Velocidad viento (diciembre): 1,27 m/s

HR<sub>min</sub>: 30% (Cuadro 16, Manual FAO-56 pag. 124)

H: 1,80 metros (altura de espaldero).

- Ajuste de  $K_{c\ med}$  para etapa del año: diciembre

$$K_{c\ med} = 0,7 + [0,04 * (1,27 - 2) - 0,004 * (30 - 45)] * \left(\frac{1,8}{3}\right)^{0,3} = 0,73$$

$$K_{c\ med} = 0,73$$

### $K_{c\ fin}$

- Para la fase final, etapa en que se desarrolla la vendimia, se calculó:

$$K_{c\ fin} = K_{c\ fin} + [0,04 * (v_2 - 2) - 0,004 * (HR_{min} - 45)] * \left(\frac{h}{3}\right)^{0,3} \quad (7.5)$$

Dónde:

Velocidad viento (Marzo): 71 km/día=0.82 m/s

HR<sub>min</sub>: 30% (Cuadro 16, Manual FAO 56 pág. 124)

H: 1,80 metros (altura de espaldero).

K<sub>cfin</sub>: 0.45 (FAO 56)

$$K_{fin} = 0,45 + [0,04 * (0,82 - 2) - 0,004 * (30 - 45)] * \left(\frac{1,8}{3}\right)^{0,3} = 0,46$$

$$K_{fin} = 0,46$$

Con los datos de  $K_c$  ajustados, se establecieron las características del cultivo, con una profundidad radicular de 1 metro, una fracción de agotamiento crítico del 0,45, (que es el 45 % del agua totalmente disponible en el suelo), donde la humedad del suelo por debajo de este valor representa el nivel crítico de humedad del suelo. Todos los datos se agregan en la interfase de CROPWAT 8.0, de acuerdo a Figura 42.

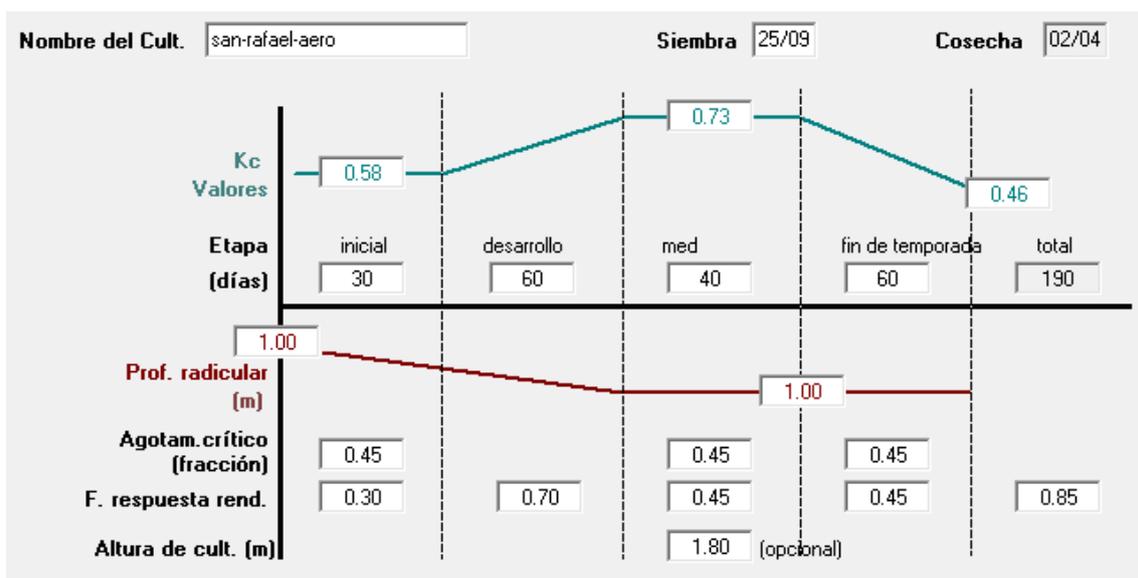


Figura 42. Datos de simulación CROPWAT 8.0, período septiembre - abril

Si el valor de humedad en el suelo descendiera, se generaría el estrés por falta de agua, afectando la evapotranspiración de cultivo y la producción y hasta la capacidad de campo del mismo.

#### 7.4- Caracterización del suelo

El suelo del bloque de riego se programó de acuerdo a un perfil homogéneo de 1000 mm de profundidad ( $D = 1000$  mm). Se utilizó el programa Soil Water Characteristics para un suelo con textura franco arenoso, compuesto de 16% de arcilla, 64% arena y 0,8% de materia orgánica para definir las características hídricas del suelo. La densidad aparente del suelo ( $\rho_a$ ), se definió en un valor de  $1,51 \text{ g/cm}^3$ ; valor comprendido en el rango de suelo arenoso.

##### 7.4.1- Resumen de las principales capacidades hídricas del suelo

Por las características de porosidad y composición del suelo, el 42,9% del suelo puede contener agua entre sus poros. Donde ese valor desciende a medida que pasa el tiempo, y la máxima capacidad de agua que retiene puede ser del 19,5%. De acuerdo a  $W_{ur}$  (capacidad de umbral de riego) de 15,45% para nuestro ensayo, representa el límite de contenido hídrico. Dado que el diseño de riego es sin déficit hídrico, este valor no debe ser inferior. El límite de  $W_m$  (punto de marchitez permanente) del 10,5% no se alcanzó en este ensayo, ya que por debajo del cual, la vid no podrá extraer agua. Todos estos valores se resumen en la tabla 20. Las hojas de las plantas se marchitan y no son capaces de recuperarse cuando se colocan en una atmósfera de agua durante la noche.

Tabla 20. Resultado de las capacidades hídricas del suelo, a partir del programa Soil Water Characteristics. Donde  $W_{ur} = W_c - (p \times (W_c - W_m))$  y  $p = 45\%$  (agua fácilmente disponible) (Cuadro 22-FAO 56)

| Capacidad Hídrica | v%v   | g%g  | PM (kpa) | PM + O (kpa) |
|-------------------|-------|------|----------|--------------|
| $W_s$             | 42,9  | 28,4 | 3        | 70           |
| $W_c$             | 19,5  | 12,9 | 33       | 177          |
| $W_m$             | 10,5  | 7,0  | 1232     | 1500         |
| $W_{ur}$          | 15,45 | 10,2 | 129      | 311          |

##### 7.4.2- Determinación de láminas estratégicas

A partir de los resultados de las capacidades hídricas del suelo, se calcularon las diferentes láminas de agua.

Lámina disponible total: La cantidad de agua necesaria para llevar al suelo desde su punto de marchitez permanente ( $W_m$ ) a su capacidad de campo ( $W_c$ ), corresponde a una lámina de 27 mm.

$$dt = ((W_c - W_m)/100) \times p_{ea} \times D \times PSM \times (1 - (\%p)) \quad (7.6)$$

$$dt = ((12,9 - 7)/100) \times 1,51 \times 1000 \times 0,3 \times 1 = \mathbf{27 \text{ mm}}$$

Lámina de riego remanente óptima u objetivo ( $d_{re}$ ): La cantidad de agua necesaria para llevar al suelo desde su punto de su capacidad de umbral de riego o agua fácilmente aprovechable ( $W_{ur}$ ) a su capacidad de campo ( $W_c$ ) se calculó en 12 mm de lámina.

$$drop = ((W_c - W_m)/100) \times p_{ea} \times D \times p \times PSM \times (1 - (\%p)) \quad (7.7)$$

$$drop = ((12,9 - 7)/100) \times 1,51 \times 1000 \times 0,45 \times 0,3 \times 1 = \mathbf{12,15 \text{ mm}}$$

Lámina remanente óptima u objetivo: La cantidad de agua necesaria para llevar al suelo desde su punto de marchitez permanente ( $W_m$ ) a su capacidad de agua fácilmente aprovechable o umbral de riego ( $W_{ur}$ ), resultó en 14,85 mm de lámina

$$dre = ((W_{ur} - W_m)/100) \times p_{ea} \times D \times PSM \times (1 - (\%p)) \quad (7.8)$$

$$dre = ((10,2 - 7)/100) \times 1,51 \times 1000 \times 0,3 \times 1 = \mathbf{14,85 \text{ mm}}$$

#### 7.4.3- Esquema estratégico de variables hídricas para el manejo del riego

La tabla 21 resume los valores de las capacidades características del suelo, y las láminas de riego.

Se observa que para mantener a las cepas sin estrés hídrico la capacidad del umbral de riego o agua fácilmente aprovechable, se mantiene con una lámina de riego remanente de 14,85 mm.

Este valor representa la humedad que va a tener el suelo, al momento de aplicar el riego. Y se debe aportar 12,15 mm de lámina de riego óptima, para alcanzar la capacidad de campo ( $W_c$ ) en un riego full, y esta variable define el momento en el cual se debe regar.

Tabla 21. Valores de capacidad de campo (Wc), capacidad de umbral de riego (Wur) y punto de marchitez permanente (Wm); en función de características de composición del suelo y láminas de riego. El factor de agotamiento de  $p=0,45$ ; marca el límite para conservar el agua disponible fácilmente aprovechable por las cepas.

|     | KPa  | v%v   | g%g  |                                      | Lámina de riego<br>(mm) | p    |
|-----|------|-------|------|--------------------------------------|-------------------------|------|
| Wc  | 33   | 19,5  | 12,9 | Agua (fuerza gravitacional)          | 27                      | 1    |
| Wur | 311  | 15,45 | 10,2 | Agua fácilmente disponible (capilar) | 14,85                   | 0,45 |
| Wm  | 1500 | 10,5  | 7    | Agua remanente (capilar)             | 0                       | 0    |
|     |      |       |      | Agua higroscópica                    |                         |      |

### 7.5- Requerimientos de agua para el cultivo

En riego por goteo, se considera un porcentaje de suelo mojado del 30%. La lámina disponible total (dt) calculada fue de 27 mm. Para proceder con la simulación en CROPWAT 8.0, se modificó el valor a 30 mm, ya que es el límite inferior que permite. De acuerdo a las características radicales de las vides, se estableció una profundidad radicular máxima de 1 metro. La humedad de suelo inicialmente disponible, dre, se redondeó a 15 mm.

El simulador estableció los requerimientos de riego en mm/década (un diseño para 10 días consecutivos) e identifica las etapas iniciales, desarrollo y final del ciclo vegetal. El valor de ETc (mm/día), puede ajustarse con la modificación de las variables climatológicas. La lámina de riego requerida por el cultivo fue calculada por el simulador

con un valor de 544,6 mm. Las necesidades hídricas del cultivo, en función de las etapas inicio, desarrollo, mediado y fin; son: 4.8%, 29.2%, 33.6% y 32.4% respectivamente del total de la lámina de riego (Figura 43). Este valor representa las necesidades hídricas netas del cultivo. Este valor debe afectarse por el rendimiento y eficiencia del sistema de riego, para cuantificar la necesidad bruta del programa de riego.

| Mes | Decada | Etapa | Kc   | ETc    | ETc          | Prec. efec | Req. Riego   |
|-----|--------|-------|------|--------|--------------|------------|--------------|
|     |        |       | coef | mm/día | mm/dec       | mm/dec     | mm/dec       |
| Sep | 3      | Inic  | 0.58 | 1.73   | 10.4         | 0.0        | 10.4         |
| Oct | 1      | Inic  | 0.58 | 1.90   | 19.0         | 0.0        | 19.0         |
| Oct | 2      | Inic  | 0.58 | 2.08   | 20.8         | 0.0        | 20.8         |
| Oct | 3      | Des   | 0.59 | 2.28   | 25.1         | 0.0        | 25.1         |
| Nov | 1      | Des   | 0.61 | 2.57   | 25.7         | 0.0        | 25.7         |
| Nov | 2      | Des   | 0.64 | 2.87   | 28.7         | 0.0        | 28.7         |
| Nov | 3      | Des   | 0.66 | 3.15   | 31.5         | 0.0        | 31.5         |
| Dic | 1      | Des   | 0.69 | 3.45   | 34.5         | 0.0        | 34.5         |
| Dic | 2      | Des   | 0.71 | 3.77   | 37.7         | 0.0        | 37.7         |
| Dic | 3      | Med   | 0.73 | 3.87   | 42.6         | 0.0        | 42.6         |
| Ene | 1      | Med   | 0.73 | 3.89   | 38.9         | 0.0        | 38.9         |
| Ene | 2      | Med   | 0.73 | 3.90   | 39.0         | 0.0        | 39.0         |
| Ene | 3      | Med   | 0.73 | 3.78   | 41.6         | 0.0        | 41.6         |
| Feb | 1      | Fin   | 0.71 | 3.55   | 35.5         | 0.0        | 35.5         |
| Feb | 2      | Fin   | 0.66 | 3.21   | 32.1         | 0.0        | 32.1         |
| Feb | 3      | Fin   | 0.62 | 2.72   | 21.7         | 0.0        | 21.7         |
| Mar | 1      | Fin   | 0.58 | 2.26   | 22.6         | 0.0        | 22.6         |
| Mar | 2      | Fin   | 0.53 | 1.83   | 18.3         | 0.0        | 18.3         |
| Mar | 3      | Fin   | 0.48 | 1.49   | 16.4         | 0.0        | 16.4         |
| Abr | 1      | Fin   | 0.45 | 1.23   | 2.5          | 0.0        | 2.5          |
|     |        |       |      |        | <b>544.6</b> | <b>0.0</b> | <b>544.6</b> |

Figura 43. Interfase de CROPWAT 8.0. Requerimientos de agua para el cultivo. El valor de la lámina de agua anual calculada es de 544.6 mm/año = 544.6 mm/ciclo = 5446 m<sup>3</sup>/ha.año

El simulador relaciona las necesidades de agua para las vides en función del valor de ETc. De esta forma se optimiza el recurso hídrico a partir de un programa de riego que considera las variables ambientales y del cultivo.

Como se observa en la Figura 44, las barras representan la cantidad de agua expresada en mm de lámina de agua para 10 días. A partir de mediados de abril, el riego se suspende hasta inicios del mes de septiembre.

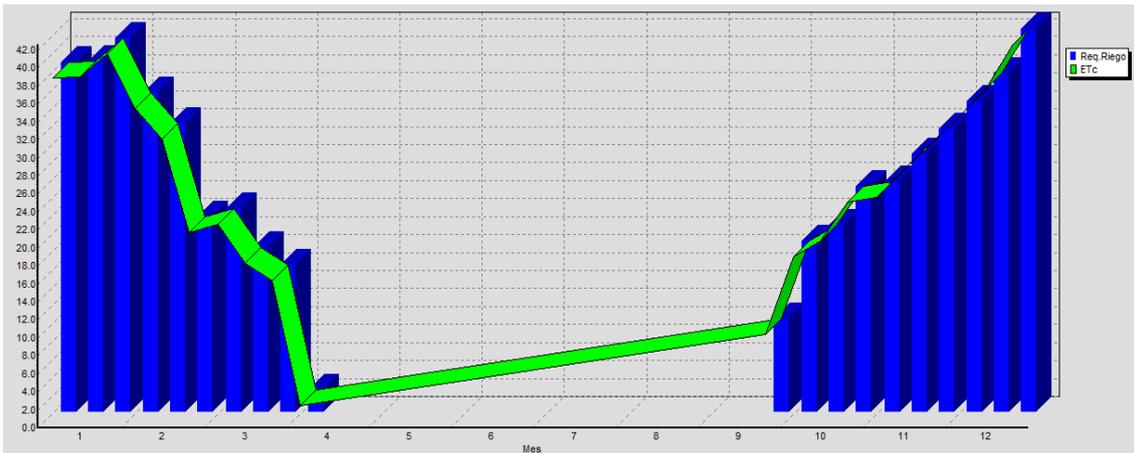


Figura 44. Requerimientos de agua del cultivo, y evolución del Etc (mm/dec), para el ciclo anual de enero (mes 1) a diciembre (mes 12)

### 7.6- Criterios para la programación de riego

Se propone regar a 100% de Etc en todas las etapas de cultivo para evitar el estrés hídrico. Respecto a la eficiencia de riego se tomaron las siguientes consideraciones, establecidas para sistemas de riego por goteo.

Para la eficiencia de aplicación se estableció una base de cálculo dentro del rango sugerido por la bibliografía,  $EAP=0.85$ ; y para eficiencia de conducción interna,  $ECI=0.95$ . El producto de ambos factores representa la  $eficiencia=0.81$ .

En el simulador se trabajó con el momento de riego a agotamiento crítico, que representa el nivel crítico de humedad en el suelo a partir del cual ocurre estrés por falta de agua; con aplicación de lámina de agua hasta la reposición de la capacidad de campo ( $Wc= 30 \text{ mm}$ ) y eficiencia del 81%. Con estas variables, el programa estima el programa de riego que a continuación se detalla.

#### 7.6.1- Programa del riego

El programa de riego indica el caudal de agua en l/s/ha, de acuerdo a fecha calendario con frecuencia de riego cada 2 días, para una lámina bruta de 686 mm de agua de riego necesaria por cada 10 días, como se observa en la tabla 22.

Se discrimina en el mismo la etapa del desarrollo vegetativo del cultivo (inicial, desarrollo, mediados y fin).

Tabla 22. Programa de riego con los requerimientos reales del cultivo, expresados en lámina bruta (mm). Se expresan los totales para 10 días consecutivos, con riego cada 2 días.

| Fecha | Día | Etap<br>a | Ks | ETa | Agot. | Lám.Net<br>a | Lam.B<br>r. | Caudal |
|-------|-----|-----------|----|-----|-------|--------------|-------------|--------|
|-------|-----|-----------|----|-----|-------|--------------|-------------|--------|

|                |     |     | fracc. | %   | %  | mm           | mm         | l/s/ha       |
|----------------|-----|-----|--------|-----|----|--------------|------------|--------------|
| 25-sep         | 1   | Ini | 0.91   | 91  | 55 | 16.6         | 20.5       | 2.37         |
| 3-oct          | 9   | Ini | 1      | 100 | 48 | 14.4         | 17.7       | 0.26         |
| 11-oct         | 17  | Ini | 1      | 100 | 51 | 15.4         | 19         | 0.28         |
| 18-oct         | 24  | Ini | 1      | 100 | 49 | 14.6         | 18         | 0.3          |
| 25-oct         | 31  | Des | 1      | 100 | 52 | 15.6         | 19.2       | 0.32         |
| 31-oct         | 37  | Des | 1      | 100 | 46 | 13.7         | 16.9       | 0.33         |
| 6-nov          | 43  | Des | 1      | 100 | 51 | 15.4         | 19         | 0.37         |
| 12-nov         | 49  | Des | 1      | 100 | 53 | 16           | 19.8       | 0.38         |
| 17-nov         | 54  | Des | 1      | 100 | 48 | 14.3         | 17.7       | 0.41         |
| 22-nov         | 59  | Des | 1      | 100 | 50 | 14.9         | 18.4       | 0.43         |
| 27-nov         | 64  | Des | 1      | 100 | 53 | 15.8         | 19.5       | 0.45         |
| 2-dic          | 69  | Des | 1      | 100 | 55 | 16.4         | 20.2       | 0.47         |
| 6-dic          | 73  | Des | 1      | 100 | 46 | 13.8         | 17.1       | 0.49         |
| 10-dic         | 77  | Des | 1      | 100 | 46 | 13.8         | 17.1       | 0.49         |
| 14-dic         | 81  | Des | 1      | 100 | 50 | 15.1         | 18.6       | 0.54         |
| 18-dic         | 85  | Des | 1      | 100 | 50 | 15.1         | 18.6       | 0.54         |
| 22-dic         | 89  | Des | 1      | 100 | 51 | 15.3         | 18.9       | 0.55         |
| 26-dic         | 93  | Med | 1      | 100 | 52 | 15.5         | 19.1       | 0.55         |
| 30-dic         | 97  | Med | 1      | 100 | 52 | 15.5         | 19.1       | 0.55         |
| 3-ene          | 101 | Med | 1      | 100 | 52 | 15.5         | 19.2       | 0.56         |
| 7-ene          | 105 | Med | 1      | 100 | 52 | 15.6         | 19.2       | 0.56         |
| 11-ene         | 109 | Med | 1      | 100 | 52 | 15.6         | 19.2       | 0.56         |
| 15-ene         | 113 | Med | 1      | 100 | 52 | 15.6         | 19.3       | 0.56         |
| 19-ene         | 117 | Med | 1      | 100 | 52 | 15.6         | 19.3       | 0.56         |
| 23-ene         | 121 | Med | 1      | 100 | 51 | 15.2         | 18.8       | 0.54         |
| 27-ene         | 125 | Med | 1      | 100 | 50 | 15.1         | 18.7       | 0.54         |
| 31-ene         | 129 | Med | 1      | 100 | 50 | 15.1         | 18.7       | 0.54         |
| 4-feb          | 133 | Fin | 1      | 100 | 47 | 14.2         | 17.5       | 0.51         |
| 8-feb          | 137 | Fin | 1      | 100 | 47 | 14.2         | 17.5       | 0.51         |
| 12-feb         | 141 | Fin | 1      | 100 | 45 | 13.5         | 16.7       | 0.48         |
| 17-feb         | 146 | Fin | 1      | 100 | 53 | 16           | 19.8       | 0.46         |
| 22-feb         | 151 | Fin | 1      | 100 | 50 | 15.1         | 18.6       | 0.43         |
| 27-feb         | 156 | Fin | 1      | 100 | 45 | 13.6         | 16.8       | 0.39         |
| 5-mar          | 162 | Fin | 1      | 100 | 47 | 14           | 17.3       | 0.33         |
| 12-mar         | 169 | Fin | 1      | 100 | 50 | 15           | 18.5       | 0.31         |
| 20-mar         | 177 | Fin | 1      | 100 | 49 | 14.7         | 18.1       | 0.26         |
| 30-mar         | 187 | Fin | 1      | 100 | 50 | 14.9         | 18.4       | 0.21         |
| 2-abr          | Fin | Fin | 1      | 0   | 9  |              |            |              |
| <b>TOTALES</b> |     |     |        |     |    | <b>555.7</b> | <b>686</b> | <b>18.39</b> |

El cálculo de riego de acuerdo a las temperaturas y precipitaciones medias del año 2020, mostró valores similares pero superiores a los obtenidos mediante el promedio histórico de las variables mencionadas. Con datos históricos se determinó un

total de lámina neta de 544.4 mm, y lámina bruta de 672 mm de agua; vs 555.5 mm y 685.8 mm para la temporada 2020 respectivamente.

Con ambas bases de datos, se confirmó que el diseño de programa de riego aplicado fue 100 % ETc, y adecuado para no provocar estrés hídrico en las plantas.