

**Centro de Investigación Científica y de Educación
Superior de Ensenada, Baja California**



**Maestría en Ciencias
en Ciencias de la Vida
Orientación en Biología Ambiental**

**Volumen de riego, estado hídrico y producción de frutos en
Vitis vinifera L. bajo irrigación por goteo y por olla de barro
enterrada**

Tesis
para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
Maestra en Ciencias
Presenta:

Cipatli Jiménez Vera

Ensenada, Baja California, México
2019

Tesis defendida por

Cipatli Jiménez Vera

y aprobada por el siguiente Comité

Dr. Rodrigo Méndez Alonzo

Director de tesis

Dra. Coral Moctezuma Martiñón

Dr. Stephen Holmes Bullock Runquist

Dr. Daniel Saucedo Carvajal



Dra. Patricia Juárez Camacho

Coordinador del Posgrado en Ciencias de la Vida

Dra. Rufina Hernández Martínez

Directora de Estudios de Posgrado

Cipatli Jiménez Vera © 2019

Queda prohibida la reproducción parcial o total de esta obra sin el permiso formal y explícito del autor y director de la tesis

Resumen de la tesis que presenta **Cipatli Jiménez Vera** como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Ciencias de la Vida con orientación en Biología Ambiental.

Volumen de riego, estado hídrico y producción de frutos en *Vitis vinifera* L. bajo irrigación por goteo y por olla de barro enterrada

Resumen aprobado por:

Dr. Rodrigo Méndez Alonzo
Director de tesis

En zonas áridas y semiáridas, la escasez de agua afecta la agricultura y lleva a la búsqueda de estrategias de riego más eficientes. La olla de barro enterrada (OBE), o goteo subterráneo localizado, es un sistema de irrigación que permite un ahorro de agua de hasta un 90% respecto al riego superficial. Este sistema consiste en el uso de OBEs sin esmaltar con poros que filtran el agua a una tasa que es determinada por la conductividad hidráulica de las raíces. El objetivo de la presente tesis fue comparar el volumen de agua requerido por el sistema OBE respecto a la irrigación por goteo en 120 plantas de *Vitis vinifera* L. en cuatro viñedos del Valle de Guadalupe, Baja California. Bajo la hipótesis de que la OBE gastaría menor volumen de riego sin modificar el estatus hídrico de las plantas ni la producción de frutos. En cada viñedo se registró el volumen de riego tanto para 15 plantas con OBE como para 15 con irrigación por goteo durante el periodo de brote a cosecha (abril-septiembre 2019). El estado hídrico de las plantas se evaluó en tres campañas (mayo, junio y agosto de 2019, respectivamente), donde se midió a cada individuo el potencial hídrico, la conductancia estomática, la temperatura de las plantas mediante imágenes térmicas remotas, y al final de la cosecha, el peso de frutos y la concentración de azúcares por medición de grados Brix. El volumen de riego por planta durante toda la temporada fue de un máximo de 1,076 litros con goteo y de 511 litros con OBE. El estado hídrico de las plantas no arrojó diferencias significativas entre tratamientos para ninguna de las variables cuantificadas. De manera semejante, en la cosecha no se encontraron diferencias, el peso de frutos y la concentración de azúcares fueron similares en los dos tratamientos de irrigación. Mis resultados indican que la OBE es una alternativa prometedora que incrementa la eficiencia del uso de agua por irrigación en ambientes áridos y semiáridos que no compromete la productividad de los cultivos.

Palabras clave: Agricultura de precisión, conductancia estomática, irrigación, olla de barro enterrada, potencial hídrico, termografía.

Abstract of the thesis presented by **Cipatli Jiménez Vera** as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Life Sciences with orientation in Environmental Biology

Irrigation volume, water status and fruit production in *Vitis vinifera* L. under drip irrigation and buried clay pot

Abstract approved by:

Dr. Rodrigo Méndez Alonzo
Thesis Supervisor

Water scarcity in semiarid and arid environments directly impacts agriculture, enhancing the search for more efficient irrigation strategies. The buried clay pot (BCP), or underground focalized drip system, is a type of irrigation which can achieve savings of up to 90 % in the volume of irrigated water in comparison with superficial flood irrigation. BCP consists of a non-enameled pot, where the porous surface of the pot filters water at a rate determined by the hydraulic conductivity of roots. In this thesis, the main objective was to compare the use of water of the BCP in comparison with drip-irrigation for 120 *Vitis vinifera* plants in four vineyards of the Valle de Guadalupe, Baja California. Our hypothesis was that BCP would reduce the volume of irrigation without compromising the hydraulic status of plants neither the production of fruits. For each vineyard, the volume of irrigation was quantified in the period from the bud break to the harvest (April-September, 2019). The plant water status was quantified during three campaigns (May, June, and August 2019, respectively). In each campaign, I measured the plant water potential, the stomatal conductance, the plant foliage temperature using remote thermography, and at the end of the harvest, the weight and the concentration of sugars in Brix degrees of the juice of the fruits. The maximum volume of irrigation was 1,076 liters per plant during the study period with drip irrigation, and 511 liters with the BCP system. The plant water status did not show any difference between treatments for all the variables quantified. In the same way, at harvest there were no differences as the mass of fruits and the concentration of sugars were similar between treatments. My results thus indicate that BCP is a promising alternative to increase the water use efficiency of irrigation in arid and semiarid environments without compromising the crop productivity.

Keywords: Precision agriculture, stomatal conductance, irrigation, buried clay pot, water potential, thermography.

Dedicatoria

A mi amada familia y a la sociedad

Agradecimientos

A CICESE, al Posgrado en Ciencias de la Vida y al departamento de Biología de la conservación por aceptarme en el posgrado y por ofrecerme una educación superior de alto nivel.

A CONACYT por el apoyo económico con la beca 17294161

Al proyecto CONACYT INEGI: "Evaluación del estrés hídrico en cultivos de climas semiáridos a partir de imagen multiespectral y térmica validada por monitoreo ecofisiológico", Fondo Sectorial CONACYT-INEGI 278755-2016 otorgado a Rodrigo Méndez Alonzo.

Al Dr. Rodrigo Méndez Alonzo por aceptarme y asesorarme en esta travesía por la ciencia aplicada, por apoyarme en todo momento, por ser amable y comprensivo conmigo.

Al Dr. Stephen Holmes Bullock Runquist por sus múltiples observaciones certeras al proyecto, por su comprensión y apoyo.

A la Dra. Coral Moctezuma Martiñón y al Dr. Daniel Saucedo Carvajal por sus amables comentarios y observaciones durante el desarrollo del proceso.

Al Dr. Hiram Rivera Huerta por su elemental apoyo al enseñarme y guiarme con la parte de percepción remota.

Al apoyo de cada viñedo para la realización de este proyecto.

A Ivette Vaillard Nava por permitirnos hacer el experimento en el viñedo Tres Mujeres, por siempre ser amable y confiable. A Alfredo y Eugenio que me apoyaron en la logística de la irrigación.

A Hans Backhoff Jr. por permitirnos realizar el experimento en Monte Xanic, al agrónomo José Ángel Carlos Soto por su valioso apoyo y amable disposición en todo el proceso del experimento en campo.

A Natalia Badán por permitirnos llevar a cabo el experimento en el viñedo Mogor-Badán, al agrónomo Santiago Andrés Torres Bolongaro Crevenna y a Rigo por siempre apoyarme con la irrigación de las plantas y por su amable disposición.

A Santiago Cosío por permitirnos realizar experimentos en el rancho San Gabriel, a los agrónomos Antonio Baro y especialmente a Juan José Villacís Fajardo que siempre me apoyó amablemente para la realización del experimento. A Martín que nos auxiliaba en los momentos de riego.

A todos los amables trabajadores de cada vinícola por la buena disposición de ayudarnos.

Al Técnico académico Eulogio López por su profesionalismo al apoyarme incondicionalmente en las salidas al campo, por los consejos y la alegría. Gran maestro y amigo.

Al Maestro en Ciencias Ramiro Santos Cobos por apoyarme siempre en cualquier salida a campo, por apoyarme en todas mis dudas, gran compañero, maestro y amigo.

A las Maestras en Ciencia Samantha Diaz De León Guerrero y a Anaid Rodríguez Bastarrachea por apoyarme en campo, por enseñarme gentilmente los conocimientos que necesitaba.

A la Maestra en Ciencias Yadira Romero Toledo por todo el apoyo logístico con el drone y por el apoyo en campo.

A los Maestros Mikhail Ramos Domínguez, Edgar Octavio Flores Hernández, Joel Alejandro Arredondo Sainz, Diego Adolfo González Zamora, Khutzy Ketzaly Munguia Ortega por apoyarme en campo, por ser buenos compañeros y amigos.

Al Técnico académico Mario Salazar y a Moisés Montes Olivares por el apoyo en campo.

Al jardinero Leonardo por su amable apoyo con la irrigación de *Tecoma stans* en el campus CICESE.

A Eva Robles Sánchez por todo el maravilloso apoyo con la logística de las salidas a campo, por el apoyo administrativo y por tanta amabilidad.

A todo el personal administrativo que me apoyo en la veloz realización de esta tesis, entre ellos a Elizabeth Avilés Becerril, a Patricia Juárez Camacho, a Linda Lomelí y a Adriana Mejía.

A Atziri, Diego, Ketzaly, Rocío, Leo, Aimé, Ariadna, Carlo, Ramiro, Edgar (“El chido”), Samantha, Alfredo, Alberto, Joel, Moisés, Erick, Rafael, Sofía, Liza y a todos mis amigos del posgrado que me brindaron su amistad y apoyo personal. Los quiero.

A mi amado Humberto Mauricio Solórzano Santos Alonso por todo el apoyo en mis salidas a campo y en mis experimentos, pero sobre todo gracias por el amor.

Tabla de contenido

Resumen en español	ii
Resumen en inglés	iii
Dedicatoria	iv
Agradecimientos	v
Lista de figuras	x
Lista de tablas.....	xii
Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1 Antecedentes	1
1.1.1 Baja California y la agricultura.....	2
1.1.2 Escasez de agua para irrigación en Baja California	3
1.1.3 Agricultura de precisión	4
1.1.4 Transportación de agua desde el suelo a las plantas.....	5
1.1.5 Monitoreo de la fisiología de las plantas	6
1.1.6 Percepción remota y termografía	8
1.1.7 Riego de precisión y fenología de la uva	9
1.1.8 La olla de barro como alternativa de irrigación en zonas áridas	13
1.2 Objetivos.....	17
1.2.1 Objetivo general	17
1.2.2 Objetivos específicos.....	17
1.3 Hipótesis.....	18
1.3.1 Hipótesis general.....	18
1.3.2 Hipótesis específicas	18

Capítulo 2. Materiales y Métodos.....	19
2.1 Área de estudio: Valle de Guadalupe	19
2.1.1 Monte Xanic	20
2.1.2 Mogor-Badán.....	21
2.1.3 Tres Mujeres.....	21
2.1.4 Santo Tomás (rancho San Gabriel).....	22
2.2 Especie de estudio	23
2.2.1 <i>Vitis vinifera</i> L. (Vitaceae).....	23
2.3 Características de las ollas de barro.....	25
2.3.1 Tasa de filtración	25
2.3.2 Grosor de las ollas	26
2.3.3 Contenido de agua en saturación	26
2.3.4 Área superficial de la olla de barro	26
2.3.5 Densidad seca aparente de la pared	27
2.3.6 Porcentaje de porosidad y porosidad	27
2.3.7 Tamaño del poro de la olla.....	27
2.4 Medición del volumen de riego	28
2.4.1 Riego con olla de barro y riego superficial en <i>Tecoma stans</i>	28
2.4.2 Riego con olla de barro y riego por goteo en <i>Vitis vinifera</i>	29
2.5 Fisiología de las plantas	30
2.5.1 Potencial hídrico.....	30
2.5.2 Conductancia estomática	31
2.5.3 Cosecha de frutos y concentración de azúcares	31
2.6 Percepción remota.....	31
2.6.1 Imagen térmica.....	31
2.8 Análisis estadísticos.....	34

Capítulo 3. Resultados	35
3.1 Características de las ollas de barro.....	35
3.1.1 Resumen de las características físicas de la olla	35
3.1.2 Microscopía electrónica de barrido de las paredes de la olla y tamaño del poro	36
3.2 Medición del volumen de riego	36
3.2.1 Riego con olla de barro y riego superficial en <i>Tecoma stans</i>	36
3.2.2 Riego con olla de barro y riego por goteo en <i>Vitis vinifera</i>	37
3.3 Fisiología de las plantas	39
3.3.1 Fisiología de <i>Vitis vinifera</i>	39
3.3.2 Peso de frutos durante la cosecha y azúcares disueltos en los frutos	41
 Capítulo 4. Discusión	 43
4.1. Ahorro promedio en irrigación con olla de barro enterrada	43
4.1.1. Mejoramiento del método de olla de barro enterrada	43
4.2 Valores de referencia fisiológicos y de percepción remota para estrés hídrico en <i>Vitis vinifera</i> en el Valle de Guadalupe, Baja California	45
4.3 El impacto del sistema de riego en el fruto: total de gramos obtenidos y cantidad de azúcares disueltos en los frutos	46
4.4 Recomendaciones de manejo. Uso potencial de irrigación por olla de barro enterrada en México en otros cultivos de zonas áridas	46
 Capítulo 5. Conclusiones	 48
 Literatura citada.....	 49
 Anexos.....	 56

Lista de figuras

Figura 1. Localización de los cuatro sitios de estudio en el Valle de Guadalupe, Baja California.....	19
Figura 2. Viñedo Monte Xanic. Fotografía de Septiembre de 2019.....	20
Figura 3. Viñedo Mogor-Badán. Fotografía de junio de 2019.....	21
Figura 4. Viñedo Tres Mujeres. Fotografía de mayo de 2019.....	22
Figura 5. Viñedo San Gabriel. Fotografía de agosto de 2019.....	23
Figura 6. Frutos de <i>Vitis vinifera</i> . Fotografía de septiembre de 2019 en Monte Xanic.....	24
Figura 7. Método de cabeza constante con botella de Marriotte.....	25
Figura 8. Diagrama de cajas y bigotes del porcentaje de agua usada para regar a <i>Tecoma stans</i>	28
Figura 9. Medición del nivel de agua (cm) para determinar el volumen de agua contenido en la olla de barro.....	29
Figura 10. Esquema de la medición del potencial hídrico con la cámara de presión. Modificado de Pérez-Harguindeguy et al., 2016.....	30
Figura 11. Imagen térmica de una planta de <i>Vitis vinifera</i> en Monte Xanic.....	32
Figura 12. Imagen térmica de dos plantas de <i>Vitis vinifera</i> en Mogor-Badán.....	32
Figura 13. Imagen térmica de dos plantas de <i>Vitis vinifera</i> en Tres Mujeres.....	33
Figura 14. Imagen térmica de una planta de <i>Vitis vinifera</i> en Santo Tomás (Rancho San Gabriel).....	33
Figura 15. Tamaño de poro de las ollas de barro. A) Poros del trozo de la olla A, B) Poros del trozo de la olla B, C) Poros del trozo de la olla C.....	36
Figura 16. Regresión cuadrática de la profundidad de la olla y del volumen de agua asociados con $p < 0.05$	37
Figura 17. Comparación del promedio de litros usados por mes para los dos tratamientos de irrigación..	39
Figura 18. Correlación entre la temperatura registrada debajo de la hoja en campo y la temperatura obtenida por la cámara térmica en cada planta individualmente con una $p < 0.005$	41
Figura 19. Diagrama de cajas y bigotes del peso de los frutos en la cosecha por planta en cada viñedo...	41
Figura 20. Diagrama de cajas y bigotes de la concentración de azúcares disueltos (° Brix) de los frutos por planta para cada viñedo.....	42

Figura 21. Diagrama de cajas y bigotes del riego por bloques en Monte Xanic. Cada letra representa un bloque.....	56
Figura 22. Diagrama de cajas y bigotes del riego por bloques en Santo Tomás. Cada letra representa un bloque.....	56
Figura 23. Diagrama de cajas y bigotes del riego por bloques en Mogor-Badán. Cada letra representa un bloque.....	57
Figura 24. Diagrama de cajas y bigotes del riego por bloques en Tres Mujeres. Cada letra representa un bloque.....	57
Figura 25. Diagrama de cajas y bigotes del potencial hídrico en el día y en la noche para cada viñedo.....	58
Figura 26. Diagrama de cajas y bigotes del potencial hídrico en el día y en la noche para todos los viñedos con olla de barro y con goteo juntos.	58
Figura 27. Boxplot de la conductancia estomática obtenida para cada viñedo.....	59
Figura 28. Boxplot de la conductancia estomática obtenida para todos los viñedos con olla de barro y con goteo juntos.....	59
Figura 29. Boxplot de la temperatura obtenida a partir de percepción remota para todos los viñedos con olla de barro y con goteo juntos. A = Viñedo Tres Mujeres, B = Viñedo Mogor-Badán, C = Rancho San Gabriel (Viñedos Santo Tomás), D = Viñedos Monte Xanic	60
Figura 30. Correlación de las temperaturas ambientales obtenidas en campo y de las temperaturas obtenidas por cámara térmica en cada planta individualmente.....	60
Figura 31. Representación de los diferentes estados fenológicos en los frutos de plantas regadas con olla de barro y plantas regadas por goteo del desarrollo de las flores a la maduración del fruto, Cabernet Sauvignon estaba en los viñedos Tres Mujeres y Xanic, Merlot en Mogor-Badán y Chardonnay en Santo Tomás.....	61
Figura 32. Fotografía térmica obtenida con percepción remota (Mayo de 2019). En el círculo se muestra una fuga de agua.	61

Lista de tablas

Tabla 1. Principales etapas fenológicas de la uva. Extraído de Bloesch y Viret, (2008).....	12
Tabla 2. Estimaciones de la eficiencia en el uso de agua (WUE: Water Use Efficiency) para irrigación en varios sistemas de irrigación (Bainbridge, 2002).	16
Tabla 3. Resumen de las características físicas de las ollas de barro.....	35
Tabla 4. Resumen del promedio de los litros usados en cada viñedo (por planta y durante toda la temporada) según el tratamiento. La duración de la temporada fue similar en Mogor-Badán, Monte Xanic y Tres Mujeres (6 meses) pero en Santo Tomás fue de 5 meses. En todos los casos menos en Tres Mujeres, la irrigación con olla de barro ahorro agua.	38
Tabla 5. Medias y desviación estándar de variables fisiológicas y temperaturas en <i>Vitis vinifera</i> . También se muestran las diferencias de las variables entre riego por goteo y por olla de barro, en negrita se encuentran los valores con $p < 0.005$ en la prueba t de Student. CO > SO: Riego con olla mayor a riego por goteo, CO < SO: Riego con olla menor a riego por goteo.....	40
Tabla 6. Medias y desviación estándar de la cosecha y los azúcares disueltos en los frutos de <i>Vitis vinifera</i> . También se muestran las diferencias de las variables entre riego por goteo y por olla de barro, en negrita se encuentran los valores con $p < 0.005$ en la prueba t de Student. CO > SO: Riego con olla mayor a riego por goteo, CO < SO: Riego con olla menor a riego por goteo.....	42
Tabla 7. Volumen de riego por planta por mes cuantificado en cuatro viñedos del Valle de Guadalupe, Baja California, México. Litros por mes corresponden a la lectura del medidor de cada sitio dividido entre el total de plantas por mes, litros totales es la sumatoria de las lecturas por los meses de estudio (abril a septiembre 2019). A = Viñedo Tres Mujeres, B = Viñedo Mogor-Badán, C = Rancho San Gabriel (Viñedos Santo Tomás), D = Viñedos Monte Xanic.....	57

Capítulo 1. Introducción

1.1 Antecedentes

Los pronósticos de cambio climático apuntan a una mayor aridez y escasez de agua a nivel mundial, lo que genera una necesidad imperante de aumentar la eficiencia del uso de agua y productividad en los cultivos (Stocker et al., 2013). La agricultura representa aproximadamente el 70% del consumo de agua dulce extraída para uso humano en el mundo (Bruinsma, 2017). A escala global, la agricultura de riego (o regadío) abarca más de 330 millones de hectáreas, lo que representa el 20% del total de la tierra cultivada y contribuye con el 40% del total de alimentos producidos en todo el mundo (FAO, 2017). Actualmente, la demanda de agua dulce en el mundo es insostenible (Dai, 2013), por lo que su escasez representa la principal amenaza para la sostenibilidad en la producción de alimentos en muchas zonas del mundo (Jagadeesan, 2011).

El uso ineficiente de agua para la producción de cultivos acelera el agotamiento de los acuíferos, reduce el caudal de los ríos, degrada los hábitats de la fauna y la flora silvestres y ha causado la salinización del 20% de las zonas agrícolas irrigadas del mundo (Campanhola et al., 2015). La agricultura contribuye significativamente al cambio climático, el cual es el desafío ambiental más grande que actualmente enfrenta la humanidad. Se estima que el 25 % del total de las emisiones de gases de efecto invernadero pueden atribuirse directamente a la producción de cultivos, a la producción animal y forestal y a la deforestación asociada con el incremento de la actividad agropecuaria (Campanhola et al., 2015).

La crisis climática ha ocasionado cambios en el patrón de precipitación en la República Mexicana al igual que en otras partes del mundo. En las zonas áridas del país, como la zona noroeste, donde se encuentran los municipios con mayor productividad agrícola, las sequías han sido cada vez más severas y esto ha incrementado la vulnerabilidad de la población a la inseguridad alimentaria (CONAGUA. Comisión Nacional del Agua, 2013). Se pronostica que, en México, para las décadas posteriores al 2025 las sequías junto con la sobreexplotación de los acuíferos subterráneos afectarán severamente la producción de cultivos. Este escenario generan serias amenazas para los cultivos de riego (Greenpeace, 2012). La superficie de riego nacional en 2016 fue de 27.6% del total del área sembrada. Por otra parte, en México 6.5 millones de hectáreas bajo riego sufren de una baja eficiencia en el manejo del agua debida al deterioro de la infraestructura y a la tecnología prevaleciente al momento de su construcción, situación que agrava esta problemática (CONAGUA. Comisión Nacional del Agua, 2018).

Por todas las razones antes mencionadas, es necesario hacer un uso más eficiente del agua y reducir su consumo en la agricultura para poder avanzar hacia la sustentabilidad. Es necesario el desarrollo de tecnologías y el mejoramiento de prácticas para incrementar o mantener igual la producción de alimentos (CONAGUA. Comisión Nacional del Agua, 2013). La agricultura sostenible busca utilizar los recursos de una forma eficiente, por lo que el manejo eficiente del agua en la agricultura de secano y regadío es un reto que debe abordarse a través del conocimiento científico, para no comprometer la producción de alimentos (Steduto et al., 2012).

1.1.1 Baja California y la agricultura

México tiene características geográficas que lo colocan como uno de los países más vulnerables a los efectos del cambio climático. La Península de Baja California (PBC) es una de las zonas del país con mayor riesgo de sufrir sequías y altas temperaturas, por tanto, tiene una alta vulnerabilidad al cambio climático en el futuro (INECC & SAGARPA, 2018; PECC, 2014). Estos riesgos se deben a que en la PBC predominan el clima muy seco (69%), el clima seco (24 %) y el templado subhúmedo y semifrío (7%) en las sierras de Juárez y San Pedro Mártir. La temperatura media anual es de **18 a 19 °C** (INEGI, 2017, 2018). En la mayor parte de la PBC las lluvias son muy escasas, alrededor de 200 mm de precipitación total anual. Sin embargo, la agricultura es una actividad económicamente importante ya que se cultivan una gran variedad de especies de alto valor económico como el algodón, trigo, alfalfa, cebollín, aceituna, vid, jitomate y ajonjolí (CONAGUA. Comisión Nacional del Agua, 2015; INEGI, 2018). Para el periodo de 2013 a 2014 se sembraron, regaron y cosecharon 184,909 hectáreas con un valor de \$7,018.77 millones de pesos (CONAGUA. Comisión Nacional del Agua, 2015).

En la región noroeste del Estado de Baja California se encuentran los climas templado y seco con lluvias de invierno (clima mediterráneo), lo cual es una condición muy particular, ya que en el resto del país las lluvias ocurren en verano; esta característica ha permitido el cultivo de vid y olivo (INEGI, 2017, 2018). En esta región el cultivo de uva (*Vitis vinifera*) es de alto valor económico, en las últimas décadas la exportación de este fruto ha ido aumentando (principalmente a Estados Unidos), por ejemplo, en 2016 se produjeron 351 mil toneladas de uva de las cuales el 36.4 % de la producción se exportó (SAGARPA, 2017). Del total de uva consumida en México (274.98 mil toneladas), 24.4% se destina a la elaboración de vino. En este sentido, la región vitivinícola del Valle de Guadalupe, Baja California representa una región

historica en la producción de uva para vino y concentra el mayor porcentaje de producción con un 57 % del total de los 11 Estados productores (SAGARPA, 2017, 2018).

1.1.2 Escasez de agua para irrigación en Baja California

En el 2009 los costos medios de producción de uva en el estado de Baja California ascendieron a 48,405 pesos por hectárea mientras que el costo de los sistemas de riego se estimaron en 10,664 pesos que equivalen al 22% del costo total (González Andrade, 2015). Sin embargo, debido a que la escasez de agua es una de las principales limitantes para las vitivinícolas, la producción de uva no alcanza las 10 toneladas por hectárea. En el Valle de Guadalupe se estima que el consumo de agua por hectárea de vid oscila entre 8.5 y 12 mil m³ que se reflejan en un rendimiento promedio de 7 ton/ha con un costo de hasta 13,076 pesos por hectarea (González Andrade, 2015; Muñoz y Sánchez, 2018). Esto indica que la uva es un cultivo de alta demanda de agua y de baja eficiencia respecto a la cantidad de agua necesaria para producir un kilogramo de uva (Muñoz y Sánchez, 2018).

La extracción de agua para actividades agrícolas y vitivinícolas proviene del acuífero Guadalupe y del Arroyo Guadalupe. El acuífero se encuentra integrado por arroyos de tipo intermitente que se integran formando el cauce principal del Arroyo Guadalupe. Históricamente el acuífero ha representado la única fuente de agua para los habitantes del valle, las poblaciones colindantes y para el desarrollo de la agricultura (CONAGUA, 2015; SPA, 2016). El impulso del cultivo de la vid y de otros cultivos típicamente mediterráneos, como el olivo, ejercen una presión creciente sobre el acuífero, que sumada a los volúmenes que se extraen para uso público urbano en la ciudad de Ensenada, se ha tornado en un estado de sobreexplotación del recurso que resulta insostenible, con serias repercusiones sobre la economía y calidad de vida de la población (SPA, 2016).

En los viñedos a nivel mundial, sobre todo en regiones áridas, utilizan como sistema de irrigación generalizado el sistema por goteo (FAO, 2018; Larry E Williams, 2002). Este tipo de tecnología fue considerada hasta hace relativamente poco tiempo como sinónimo de eficiencia y ahorro de agua en materia de riego, pero requiere de un alto mantenimiento que involucra el uso de sustancias químicas para su limpieza y riesgo de fugas. En zonas semiáridas, las limitaciones impuestas a la agricultura por la escasez de agua han llevado a la búsqueda de estrategias de riego y al desarrollo de sistemas cada vez más eficientes, como son la programación mejorada del riego y la selección de variedades de cultivos eficientes

en el uso del agua (Pereira et al., 2002; SPA, 2016; Zúñiga et al., 2016). La agricultura necesaria para el futuro debe mostrar flexibilidad, un potencial para aumentar rendimientos sustancialmente a nivel mundial y la capacidad de proporcionar buenos ingresos para el agricultor. Sólo el conocimiento científico y la investigación pueden hacer eso (Trewavas, 2008).

1.1.3 Agricultura de precisión

Arriba se mencionaron algunas de las problemas actuales y futuros ocasionadas por el cambio climático en la agricultura como son la sequía y la escasez de agua, pero también están la erosión excesiva, la contaminación del agua y el aumento de la resistencia de las plagas a los biocidas (Bongiovanni y Lowenberg-Deboer, 2004), que en conjunto, nos orillan a generar tecnologías y sistemas de monitoreo de cultivos más efectivos y con estándares de calidad más altos. La agricultura de precisión (AP) parece ser un enfoque multidisciplinario capaz de responder a los retos del cambio climático y a la escasez de agua (Gago et al., 2015). Conocer la eficiencia del uso de agua en los cultivos siempre ha representado un reto clave y se requieren enfoques mejorados para el monitoreo y la programación del riego que impliquen mediciones directas o indirectas del estado del agua de las plantas (Gonzalez-Dugo et al., 2012).

Es posible definir la AP como el tipo de agricultura que aumenta el número de decisiones correctas por unidad de área por unidad de tiempo con los beneficios netos asociados. La agricultura de precisión es una estrategia de gestión y evaluación en el espacio-tiempo de la producción de cultivos mediante la integración de tecnologías específicas (incluyendo prácticas) con altos niveles de detalle (McBratney et al., 2005).

Los principales objetivos de la AP son optimizar el uso de los recursos disponibles para aumentar la rentabilidad y prácticas que sean menos perjudiciales para los sistemas naturales (Bongiovanni y Lowenberg-Deboer, 2004). En segundo lugar, reducir el impacto ambiental negativo y tercero, mejorar la calidad del ambiente de trabajo y los aspectos sociales asociados a la agricultura, la ganadería y las profesiones relevantes (Gebbers y Adamchuk, 2010). En la AP se reduce y se hace un uso más eficiente de los insumos de producción como energía, fertilizantes, agua o productos químicos y mano de obra, y al mismo tiempo minimiza los costos de los insumos (Matese y Di Gennaro, 2015). Al cumplir los objetivos de la AP los productores reducen la incertidumbre que enfrentan en la toma de decisiones (Council, 1997; Pierce y Nowak, 1999) y así, disminuyen el impacto sobre el medio ambiente y minimizan su consumo

energético, lo que permite incrementar los rendimientos agrícolas y coadyuvar a la mitigación del cambio climático global (Chartuni Mantovani y Magdalena, 2014; Marino et al., 2015).

Las tecnologías de monitoreo que se utilizan en la agricultura de precisión incluyen el uso de sensores para la obtención de información del campo sobre las características físicas y químicas del suelo, topografía, datos de productividad, características fisiológicas de las plantas (Jones, 2004), así como mediciones de la heterogeneidad del terreno ligados a sistemas de posicionamiento preciso (variabilidad espacial y/o temporal del cultivo). A partir de la integración espacial (geográfica) y/o temporal de los distintos datos, se optimiza el rendimiento económico y se pueden reducir los impactos ambientales en el área de producción (Chartuni Mantovani y Magdalena, 2014; Marino et al., 2015).

1.1.4 Transportación de agua desde el suelo a las plantas

Las propiedades del suelo desempeñan un papel importante en los cultivos, por lo que conocer la variabilidad espacial de las características del suelo dentro de un cultivo permite una mejor comprensión de la variabilidad de la respuesta fisiológica de las plantas (Matese y Di Gennaro, 2015). En particular, el contenido de humedad del suelo desempeña un papel clave en la producción de cultivos, ya que sirve como disolvente para varios nutrientes minerales que permiten el desarrollo correcto de la planta. Además, el contenido de humedad tiene un impacto significativo en la percolación y la evaporación en las plantas, en la descomposición microbiológica de la materia orgánica del suelo (Pradhan et al., 2018). La información detallada sobre la humedad del suelo, por lo tanto, es esencial para la programación del riego, para poder reducir al mínimo el estrés hídrico de la planta, para evitar un riego excesivo o insuficiente y para mejorar el rendimiento de los cultivos (Nwogwu et al., 2018; Pradhan et al., 2018).

La capacidad de retención de agua del suelo depende principalmente de la textura y contenido de materia orgánica. El agua es retenida por el suelo en función del tamaño de las partículas del suelo, su área superficial y su capacidad de intercambio de cationes. Cuanto menor sea el tamaño de partícula, mayor será el área superficial. Por lo tanto, partículas con superficies más grandes permiten que el suelo retenga más cantidad de agua. El contenido de materia orgánica del suelo también influye en su capacidad de retención de agua. Cuanto mayor es el contenido de materia orgánica, mayor es su capacidad de retención de agua (Nwogwu et al., 2018).

Los espacios entre las partículas del suelo se conocen como espacios porosos o huecos, que consisten en una cantidad variable de aire y agua. La cantidad de espacio vacío dentro de un suelo depende de la distribución de los tamaños de partículas y su agregación, se cuantifica por la porosidad del suelo (Nwogwu et al., 2018). El agua que entra al suelo puede estar retenida en los poros o sobre las superficies de las partículas por atracción molecular y por enlaces químicos no covalentes hasta que la masa del agua gana a estas fuerzas y se drena. La cantidad de agua que se retiene contra la gravedad se conoce como capacidad de campo (se expresa como porcentaje por volumen). La fracción retenida por capilaridad queda a disposición de las plantas o a la evaporación, mientras la fracción adherida a las partículas del suelo requiere mayor tensión para removerse. La determinación de la capacidad de campo es extremadamente útil porque es uno de los factores que permiten calcular la cantidad potencial de agua disponible para el uso de la planta (Nwogwu et al., 2018). Sin embargo, suelos arcillosos con altas capacidades de campo pueden retener químicamente gran parte del agua por unidad de volumen, haciéndola por tanto inaccesible para las plantas. Una manera de evaluar este gradiente de disponibilidad de agua para la planta es mediante el estudio del potencial hídrico, que se define como la diferencia de energía libre de una solución respecto al agua pura (Taiz y Zeiger, 1991, 2002). Por ejemplo, en un sistema de ósmosis con dos cámaras divididas por una membrana semipermeable, donde el solvente sea agua y los solutos sales, el agua se moverá de la solución con menor concentración de solutos al de mayor concentración. En el extremo, si un compartimento de este sistema tiene agua pura, el agua nunca se moverá hacia el agua pura, y la energía libre del movimiento del solvente será progresivamente mayor mientras mayor sea la diferencia de concentración de solutos entre ambas cámaras. En ecofisiología vegetal, esta magnitud se conoce como potencial hídrico y es relevante para describir el estado hídrico de plantas en comparación con el agua pura.

1.1.5 Monitoreo de la fisiología de las plantas

La fisiología de las plantas responde directamente a la disponibilidad del agua en los tejidos de la planta, ya sea en las raíces, hojas o tallos, más que por los cambios en el contenido o potencial hídrico del suelo. Como resultado, una mayor precisión en la aplicación del riego puede obtenerse mediante un tercer enfoque, el uso de la "detección del estrés de la planta". Para este enfoque, las decisiones de programación de riego se basan en las respuestas de la planta en lugar de mediciones directas del estado hídrico del suelo (Jones, 2004; Jones y Vaughan, 2010). Actualmente se sabe que la disponibilidad de agua es un potente regulador del desarrollo de las plantas y que induce la ramificación de la raíz a través de un

proceso denominado hidropatrón (hidropatterning) (Robbins y Dinneny, 2015, 2017). El hidropatrón o patrón de forrajeo ocurre en las células de la punta de la raíz, estas células son capaces de integrar información fisiológica de la planta con la humedad local del ambiente para dirigir el crecimiento de la raíz hacia donde el agua está disponible o prevenir su desarrollo donde el agua está menos disponible (Bao et al., 2014; Robbins y Dinneny, 2015, 2017).

Las medidas del estado hídrico de las plantas que podrían ser las más apropiadas para los propósitos de programación de riego incluyen mediciones directas de algún aspecto del potencial hídrico de la planta, así como mediciones de varios procesos de la planta que se sabe que responden de manera sensible a los déficits hídricos (Jones, 2004). Uno de los mejores métodos para cuantificar las necesidades de irrigación de los cultivos es la cuantificación del potencial hídrico de las plantas por medio de la cámara de presión (Scholander et al., 1965; Shackel et al., 1997). Este método consiste en medir la tensión de la savia en el xilema de plantas vasculares. A turgencia igual a cero, este procedimiento proporciona una relación lineal entre la concentración intracelular de solutos y la tensión del xilema. A partir de curvas de tensión-volumen se puede extrapolar el volumen de agua intracelular. En otras palabras, se refleja con bastante precisión la turgencia de las células de la hoja y el estrés hídrico de la planta (Scholander et al., 1965). Desafortunadamente, a menudo se encuentra que esto es bastante insensible a la variación en el contenido de humedad del suelo. Se suele pensar que no es muy conveniente para la programación del riego porque las mediciones de rutina antes del amanecer son difíciles de obtener y, en el mejor de los casos, solo se pueden obtener por día (Jones, 2004). Sin embargo, estudios recientes señalan que todas las especies tienden a tener ciclos circadianos, y encontraron que la luz es el sincronizador que determinaría los patrones de variación circadiana en estas especies, lo que sugiere que las plantas modifican su comportamiento hidráulico con base en la hora del día (Santos y Méndez-Alonzo, 2018).

Se ha informado que el potencial hídrico de las hojas puede, cuando se corrige la variación diurna y ambiental, proporcionar un índice sensible para el control del riego (Peretz et al., 1984). La mayor pérdida de agua desde la planta es vía transpiración a través de los estomas, por lo que cuando la planta pierde agua desde las hojas su potencial hídrico se reduce. La pérdida de agua en las hojas por la transpiración es la fuerza que permite el ascenso del agua desde las raíces hasta la parte más alta de la planta (copa) (Serra-Stepke y Carey, 2010).

El estado hídrico de la planta, y especialmente el de las hojas, generalmente se controla mediante el cierre de estomas u otros mecanismos reguladores. El estrés hídrico induce el cierre del estoma y, por lo tanto, reduce el enfriamiento por evaporación y aumenta la temperatura de la hoja, es decir, la temperatura del

dosel, está inversamente relacionado con la transpiración y la conductancia estomática (Berni et al., 2009; Gonzalez-Dugo et al., 2012; Jones, 2004). En consecuencia de lo anterior, se reconoce ampliamente que la temperatura del dosel es confiable como un aproximado para el monitoreo del estado hídrico de la planta (Jones, 2004).

La conductancia estomática se puede medir con precisión utilizando porómetros de difusión, lamentablemente, las mediciones requieren mucha mano de obra y no son adecuadas para la automatización (Jones, 2004). Se ha demostrado que los indicadores de estrés derivados de imágenes aéreas térmicas son efectivas porque describen con precisión la heterogeneidad espacial que se encuentra naturalmente en los huertos (Berni et al., 2009; Gonzalez-Dugo et al., 2012).

1.1.6 Percepción remota y termografía

Actualmente existe un gran interés en las tecnologías de detección remota capaces de proporcionar información sobre los parámetros biofísicos y el estado fisiológico de las plantas (Jones y Vaughan, 2010). Estos enfoques de detección remota aérea se validan con datos tomados directamente de la planta, por ejemplo, mediciones relacionadas con el crecimiento y el vigor de la planta, tales como el índice de área foliar (LAI), biomasa, contenido de clorofila o caroteno, o bien el estado hídrico de la planta representado por conductancia estomática (g_s) y potencial hídrico foliar (Ψ) (Berni et al., 2009; Gago et al., 2015; Gonzalez-Dugo et al., 2012; Zarco-Tejada et al., 2012).

Las técnicas de detección remota y proximal, tienen la capacidad de proporcionar información instantánea, no destructiva y cuantitativa y, por lo tanto, la capacidad de visualizar patrones y gradientes del estado de agua de muchos cultivos agrícolas (Chaerle y Van Der Straeten, 2000; Marino et al., 2015; McBratney et al., 2005). En los últimos años, el uso de vehículos aéreos no tripulados (UAV, por sus siglas en inglés) para fines civiles aumentó gracias a los avances tecnológicos, la reducción de costos y el tamaño de los sensores relacionados con el Sistema de Posición Global (GPS), los vuelos preprogramados, las IMU (Unidades de Movimiento Inercial) y los dispositivos automáticos. En este sentido, la tecnología UAV puede llenar el vacío de conocimiento entre la hoja y el dosel al mejorar tanto la resolución espacial como la temporal de los sistemas de detección remota actuales más comunes (Gago et al., 2015).

Las tecnologías de detección remota básicamente hacen uso de las reflexiones de las hojas y los doseles en el rango visible del espectro electromagnético (RGB, rojo, verde y azul) y en otras longitudes de onda como el infrarrojo y el térmico (Gago et al., 2015; Gonzalez-Dugo et al., 2012; Zhang y Kovacs, 2012). La reflectancia de la hoja se puede usar como un indicador de la función y vigor de la planta porque la luz reflejada depende directamente de la composición del pigmento de la hoja (por ejemplo, clorofilas y xantofila), lo cual puede reflejar el estado fisiológico de las plantas (Jones y Vaughan, 2010) además de su contenido de agua y características estructurales. El monitoreo remoto de estas reflectancias específicas se mide comúnmente usando cámaras visibles, multispectrales e hiperespectrales (Jacquemoud et al., 2009; Jones y Vaughan, 2010; Zarco-Tejada et al., 2012). El índice más empleado es muy probablemente el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) o de “verdor” (Gago et al., 2015):

$$NDVI = \frac{IR - R}{IR + R}$$

donde IR (infrarrojo) es la reflectancia en la banda del infrarrojo cercano (aprox. 800 nm) y (R) en la banda roja (aprox. 680 nm), originalmente incorporadas en las bandas de sensores del satélite clásico LandSat para el rojo y el infrarrojo (Gago et al., 2015).

Los índices de vegetación (VI) se pueden usar para monitorear las condiciones de las plantas, evaluar el estado de los nutrientes de las plantas, detectar estrés abiótico y biótico, estimar la tasa de crecimiento de las plantas y las condiciones fisiológicas, así como pronosticar los rendimientos de los cultivos (Marino et al., 2015).

Por su parte, la termografía permite visualizar las diferencias en las temperaturas de superficies al detectar la radiación infrarroja emitida [infrarrojo de onda larga (8–14 mm)]. El software informático transforma estos datos de radiación en imágenes térmicas en las que los niveles de temperatura se indican mediante un gradiente de color falso (Chaerle y Van Der Straeten, 2000).

1.1.7 Riego de precisión y fenología de la uva

La Viticultura de Precisión es un concepto que empieza a tener impacto en el sector vitivinícola. Su implementación práctica está ligada al desarrollo de las tecnologías antes mencionadas (Arnó Satorra et al., 2009; Chaerle y Van Der Straeten, 2000; Jones y Vaughan, 2010). Un conocimiento preciso sobre

cuando regar y la cantidad de agua que se debe aplicar es esencial para lograr una gestión sostenible (Ondrašek, 2019).

Se ha reportado que el nivel de uso del agua del viñedo depende de varios factores, durante su establecimiento, un viñedo utiliza menos agua que un viñedo maduro. En los primeros dos años de crecimiento las vides solo usan aproximadamente el 50 por ciento de agua que una vid madura (Larry E Williams, 2000). Una de las mayores dificultades del manejo del riego está asociada con estimaciones pobres o nulas del estado hídrico de la planta (Poblete-Echeverría et al., 2019). Recientemente, varios estudios han estimado los requerimientos de agua de los viñedos mediante uno o varios de los siguientes métodos: percepción remota (termografía), medidas del potencial hídrico del suelo y de la planta (Bellvert et al., 2015, 2014; L E Williams et al., 2012; Larry E Williams, 2002) que sirven para establecer con mayor precisión los regímenes de riego. Además, también es importante estimar la evapotranspiración potencial del cultivo, que indica las pérdidas naturales de agua por evaporación y transpiración, dato muy importante para la elaboración de las necesidades hídricas del cultivo (Hidalgo, 2002).

La raíz en vid tiene un período de crecimiento inicial, que toma de 7 a 10 años; posteriormente un período de estabilización, de 10 a 40 años; y finalmente un período de decadencia, que se presenta a partir de los 50 años de edad de la planta (Martínez de Toda Fernández, 1991). El sistema radical está formado por una estructura principal de raíces (6-100 mm de diámetro), las cuales usualmente se encuentran a una profundidad de 30 a 35 cm desde la superficie del suelo, y raíces más pequeñas permanentes (2-6 mm de diámetro), las cuales derivan de esta estructura principal y crecen ya sea en forma horizontal o hacia abajo. El crecimiento de las raíces incluye la reanudación de la división y la elongación celular en la zona apical de las raíces que sobrevivieron el invierno, lo cual produce nuevas raíces absorbentes jóvenes y la expansión radial de las raíces persistentes (Serra-Stepke y Carey, 2010). En un estudio donde se comparó el crecimiento radicular de la vid bajo varios regímenes de riego, se demostró que el 75% de las raíces se distribuyen en los primeros 40 cm del perfil del suelo, con una mayor proliferación en la hilera de plantación y no en la calle, ya que en las hileras se encontraba el suelo más húmedo (Ojeda y Pire, 1996).

El estado hídrico de la planta tiene un efecto directo en el rendimiento y en la composición de las bayas, pero las propiedades físicas del suelo son consideradas como las más importantes para causar variabilidad espacial. El diseño de un sistema de riego sin tener en cuenta la variabilidad espacial del suelo y el estado hídrico de la planta puede potencialmente aumentar la variabilidad en el rendimiento y la composición de las bayas en un viñedo. Un problema generalizado en muchos viñedos es que el conocimiento de un diseño de riego defectuoso ocurre después de que se configura el sistema (Bellvert et al., 2012).

Las características cualitativas de las bayas de uva en la cosecha (tamaño de la baya, contenido de sólidos solubles, pH, acidez total, concentraciones de antocianinas y polifenoles) se consideran factores importantes y determinantes en la producción de vinos de alta calidad (Mullins et al., 1992). En las últimas décadas, una extensa investigación en el cultivo de uva ha generado controversia sobre los efectos de la estrategia de riego en la calidad de las bayas y en la fenología (Girona et al., 2009). Es importante recordar que la fenología es el estudio de eventos o etapas de crecimiento de plantas o animales que se repiten estacionalmente, así como, su relación con factores climáticos (Mullins et al., 1992). Por un lado, se ha reportado que el estrés hídrico durante la temporada de crecimiento tiene algunos efectos beneficiosos en la calidad de las bayas de uva (aumento de las concentraciones de sólidos solubles) (Girona et al., 2009; L E Williams y Matthews, 1990), para Girona y colaboradores (2009) el estrés hídrico previo al envero fue muy eficiente para reducir el tamaño de las bayas, pero este efecto no se tradujo en una mejora cualitativa en la calidad del mosto. Otro estudio sugiere que el estrés hídrico tardío tiene efectos ligeramente negativos sobre el contenido de sólidos solubles en la cosecha del mismo año, pero plantas sometidas a riego restringido después del envero resultó en mayores concentraciones de azúcar y antocianinas en la fruta de la siguiente temporada (Petrie et al., 2004). También hay estudios que basan todo el riego en intervalos de estrés hídrico leve en la vid (de -1.0 a -1.2 MPa al medio día) para incrementar las concentraciones de sólidos solubles y antocianinas (Acevedo-Opazo et al., 2010). Estas investigaciones son ejemplos de estudios que muestran lo susceptibles que son los frutos de la vid al estrés hídrico.

La creación de escalas que describan las etapas de fenológicas de la vid propuesta por los diferentes autores no siempre es la misma. Los descriptores más comunes son el código Baggiolini, subdividido en dieciséis etapas de la A a la P (Baggiolini, 1952; Baillod y Baggiolini, 1993) y el código Eichhorn, con veintidós etapas del 01 al 47 (Eichhorn y Lorenz, 1977). En la actualidad existe un código decimal (de 00 a 100) o la escala BBCH que describe etapas fenológicas de varias monocotiledóneas y que fue desarrollado principalmente por las instituciones: Federal Biological Institute (BBA), Federal Variety Institute (BSA) y Industry Association Agrar (IVA). Estas etapas principales van desde el comienzo del ciclo de crecimiento (el inicio del brote) hasta la caída de la hoja (Lorenz et al., 1995). En la tabla 1 podemos ver las etapas principales de acuerdo con Bloesch y Viret (2008).

Tabla 1. Principales etapas fenológicas de la uva. Extraído de Bloesch y Viret, (2008)

Etapas fenológicas	Descripción
Estadio 0	Brotación
Etapa 1	Desarrollo de la hoja
Etapa 5	Aparición de inflorescencias
Etapa 6	Floración
Etapa 7	Desarrollo del fruto
Etapa 8	Maduración de bayas
Etapa 9	Senescencia y comienzo del período de latencia

Sin embargo, al hablar del desarrollo de las bayas, el desarrollo de las bayas tiene un crecimiento doble sigmoide (Martínez de Toda Fernández, 1991) y se divide en tres etapas fenológicas: Etapa I (desde la antesis hasta la producción de fruta), Etapa II (desde la producción de fruta hasta el envero) y Etapa III (desde el envero hasta la cosecha de la fruta) (Girona et al., 2009). El enfoque más común es la aplicación de riego deficitario regulado donde la cantidad de riego se reduce, generalmente durante el período entre el establecimiento de bayas y el envero. Las reducciones al riego en esta etapa fenológica particular retrasan el desarrollo del dosel y dan como resultado una reducción del tamaño de la baya (McCarthy et al., 2002). Se han reportado los efectos del déficit hídrico en el desarrollo de la baya de uva y se enlistan a continuación algunos de los resultados (McCarthy et al., 2002):

- El crecimiento de las bayas fue más sensible al estrés hídrico durante la división celular del pericarpio.
- Se necesitaban mayores niveles de estrés hídrico para reducir el tamaño de las bayas en comparación con el crecimiento vegetativo.
- Una reducción en el tamaño de la baya y, por lo tanto, en el nivel de cultivo, resultó en una maduración más temprana de la fruta.
- Las bayas más pequeñas dieron como resultado una mayor concentración de antocianinas.

- El estrés hídrico durante las primeras etapas de la maduración de las bayas puede mejorar la concentración de antocianinas.
- El estrés hídrico durante el período de maduración (posterior al envero) redujo la acumulación de solutos en las bayas.
- La acumulación de compuestos aromatizantes ocurrió relativamente tarde en el proceso de maduración y fue sensible al estrés hídrico.
- Con los sistemas de riego modernos, fue posible manipular la disponibilidad de agua del suelo en la medida necesaria para influir precisamente en el crecimiento vegetativo y reproductivo

1.1.8 La olla de barro como alternativa de irrigación en zonas áridas

Las prácticas de irrigación innovadoras no convencionales pueden mejorar la eficiencia del uso de agua, obteniendo una ventaja económica para los agricultores y a la vez una disminución del daño ambiental (Bhatt y Kanzariya, 2017; Levidow et al., 2014). Los sistemas de riego subterráneos se originaron como una alternativa para mitigar los problemas de drenaje y la pérdida de agua por las altas tasas de evaporación y para lograr el máximo control sobre el contenido de humedad en la zona más activa de la raíz (Ayars et al., 2015). Este tipo de sistemas, por lo tanto, permite un ahorro considerable del agua en zonas áridas con poca disponibilidad de agua (Montemayor et al., 2012).

El método de riego con olla enterrada (goteo subterráneo) es uno de los sistemas más eficientes conocidos y es ideal para jardineros y pequeños agricultores. Este método de irrigación tradicional ya se practicaba en China desde hace 2000 años y existen reportes de que esta técnica ha sido utilizada en Irán, India, países africanos y sudamericanos (Bainbridge, 2001; Mondal, 1984). En este sistema de riego se utiliza una olla de arcilla sin esmaltar que, se entierra y se llena de agua para proporcionar un riego controlado a las plantas. La pared de la arcilla filtra el agua a través de los poros y se propone que este flujo es controlado por el uso de agua de la planta o capacidad autorreguladora (Bainbridge, 2001, 2006). Esta idea requiere apoyo experimental, sin embargo, queda claro que este método ofrece una forma sencilla, eficiente y económica de proporcionar irrigación subsuperficial localizada (Goyal y Panigrahi, 2016).

Las ollas se entierran hasta el cuello en el suelo y se llenan de agua cuando se vacía para mantener el agua del suelo en un nivel favorable para el crecimiento de las raíces. La porosidad de la pared de la olla depende de los materiales de fabricación (generalmente una mezcla de arcilla y arena en una proporción de 4: 1) y de la temperatura de cocción. (Tripathi et al., 2017). La filtración de agua por la pared de la olla se ve afectada por varios factores, tales como la conductividad hidráulica saturada del material de la olla, el espesor de la pared, el área de la superficie (M. M. Abu-Zreig y Atoum, 2004; Altaf Ali Siyal et al., 2016), la textura de suelo, el tipo de cultivo, la tasa de evapotranspiración, el microclima y la competencia de las malezas. (Altaf A. Siyal et al., 2009; Altaf Ali Siyal et al., 2016). Además, existe una relación débil y positiva entre la temperatura y la tasa de filtración de agua (Ansari et al., 2015). Abu-Zreig y colaboradores (2018) reportan que la tasa de filtración se ve afectada también por la cabeza hidráulica positiva debido a la profundidad del agua dentro de las ollas y la cabeza de succión negativa en la superficie exterior de las ollas. Este grupo de trabajo encontró que las tasas de filtración pueden ocurrir incluso bajo un cabezal hidráulico negativo, lo que indica la posibilidad de utilizar sistemas de riego con olla de barro para el riego deficitario (Majed M. Abu-Zreig et al., 2018). Abu-Zreig y colaboradores (2018) reportan que las tasas de filtración pueden ocurrir incluso bajo un cabezal hidráulico negativo, lo que indica la posibilidad de utilizar sistemas de riego con olla de barro para el riego deficitario (Majed M. Abu-Zreig et al., 2018). El éxito y la sostenibilidad de este sistema de riego depende del conocimiento de los factores que afectan la conductancia del agua desde la pared de la olla. Siyal y colaboradores (2016) recomiendan que antes de la instalación de las ollas en campo, se debe determinar el radio de humedecimiento del suelo y la tasa de filtración, ya que esto ayudará a conocer la distancia máxima que puede haber entre las ollas que permita el mejor ambiente húmedo del suelo, principalmente en la zona más activa de la raíz.

Datos previos sobre el patrón de humedecimiento del suelo en ollas de 10 L muestran que después de 10 días enterradas, el área de superficie humedecida del suelo es de alrededor de 0.6-0.7 m² (Altaf A. Siyal et al., 2009). El contenido de humedad del suelo en ese estudio fue aproximadamente igual a la capacidad de campo del suelo cerca de las paredes de la olla que se reduce al aumentar la distancia de la pared. Otro factor importante que se debe considerar es la textura del suelo. Siyal et al.(2009) hicieron simulaciones y pruebas en campo que mostraron que la dispersión horizontal del agua es mayor en los suelos de textura más fina. Por otra parte, una olla del mismo tamaño pero con diferente conductividad hidráulica puede modificar el patrón de humedecimiento del suelo y por lo tanto, los patrones de enraizamiento de las plantas. Las ollas de barro, incluso con agua salina, se han utilizado de forma continua de 3 a 6 años (6 a 12 temporadas) (Goyal y Panigrahi, 2016).

Algunas de las ventajas de las ollas de barro señaladas por varios autores se enlistan a continuación (Ansari et al., 2015; Bainbridge, 2002, 2006; Bhatt y Kanzariya, 2017; Goyal y Panigrahi, 2016; Mondal, 1984; Altaf Ali Siyal et al., 2016; Tripathi et al., 2017):

- Se han utilizado con éxito para una amplia gama de plantas anuales y perennes, incluidas muchas verduras y frutas.
- Es especialmente útil en condiciones difíciles de alta salinidad o alcalinidad, aridez extrema o donde el suministro de agua y otros recursos es limitado.
- Con este sistema, el problema de malezas disminuye drásticamente.
- La irrigación con olla facilita un rápido establecimiento y crecimiento de las plantas.
- El suministro de agua controlada puede reducir los problemas de acumulación de agua y de secado rápido.
- Es posible reducir el uso de agua en un 90% en comparación con el riego de superficie.
- Se puede usar para establecer plantas en pendientes pronunciadas y áreas de drenaje rápido donde el riego convencional no es práctico.
- El costo para adoptar este método es bastante menor en comparación con el riego por goteo y, por lo tanto, puede ser adoptado por pequeños y medianos agricultores.
- La gestión eficiente del agua mediante el uso de esta técnica puede ofrecer una solución a la crisis de agua que se avecina y ayudaría a incrementar la producción agrícola en áreas deficientes en agua para nuestro país.
- Este método ofrece una alternativa para el cultivo de plantas en áreas remotas donde es difícil y costoso acceder a verduras frescas.
- Las ollas de barro, incluso con agua salina, pueden utilizarse de forma continua por 3 a 6 años, es decir, para 6 a 12 temporadas de cultivo.

El potencial de ahorro de agua de la tecnología depende de la cantidad de ollas, la duración del cultivo y el cronograma de presentación, el agua equivalente a uno o dos riegos con el método de riego de superficie puede ser suficiente para toda la temporada de crecimiento de un cultivo (Bainbridge, 2002; Goyal y Panigrahi, 2016). Por ejemplo, para un calendario de llenado de días alternos, con 800 ollas de 10 L de capacidad, puede requerir solo 4.8 cm de agua por hectárea para un cultivo de 120 días de duración. Bainbridge (2002), calculó teóricamente que la eficiencia del uso del agua con el sistema de ollas de arcilla enterrada es más alta que en cualquier otro sistema de riego (Tabla 1). Este método ofrece por tanto, una forma sencilla, eficiente y económicamente redituable para lograr una irrigación subsuperficial localizada (Goyal y Panigrahi, 2016).

Varios estudios demuestran que el riego por goteo subterráneo (OBE) maximiza el rendimiento y reduce la demanda de agua relativa con respecto a otros métodos (Ansari et al., 2015; Ayars et al., 1999; Bainbridge, 2002; Lamm y Trooien, 2003; Lucero-Vega et al., 2017; Martínez y Reza, 2014). Se ha reportado que es posible ahorrar hasta un un 60% y un 30% de agua en comparación con irrigaciones de superficie y de goteo (Ansari et al., 2015), y un 70% de agua en comparación con el riego superficial y el riego por aspersión (Daka, 1991).

Tabla 2. Estimaciones de la eficiencia en el uso de agua (WUE: Water Use Efficiency) para irrigación en varios sistemas de irrigación (Bainbridge, 2002).

Método de irrigación	WUE ($t\ ha^{-1}\ cm^{-1}$) ¹	WUE ($t\ ha^{-1}\ cm^{-1}$) ²
Surco cerrado	0.7	0.7
Aspersor	0.9	0.9
Goteo	1-2.5	1.4
Cápsula porosa (presión)	1.9+	1.9
Cápsula porosa (sin presión)	2.5+	2.5
Olla de barro enterrada	2.5-7	2.5-6.0
Mecha	-	4.0

Se ha corroborado la eficiencia de la olla en diferentes cultivos como el melón, el jitomate, el pepino y el frijol (Bainbridge, 2015). Un estudio reciente realizado en Etiopía, evaluó el rendimiento del jitomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) bajo diferentes tratamientos de irrigación incluyendo la olla de barro, se encontró que este sistema tiene una mayor eficiencia en comparación con los otros tipos de irrigación

estudiados (Tesfaye et al., 2012). También se reportó que el riego con olla afectó de manera positiva a *Berberis thunbergii*, *Pyracantha* sp., y a una *Rosa* híbrida en cuanto a altura y un mayor número de hojas (Ansari et al., 2015). Sin embargo, no existe información contundente para cultivos de uva para vino que compare la eficiencia de uso de agua entre irrigación por goteo y por olla de barro.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Comparar la eficiencia de dos métodos de irrigación (por goteo y con olla de barro enterrada) en el cultivo de *Vitis vinifera* L. en cuatro viñedos del Valle de Guadalupe.

1.2.2 Objetivos específicos

1. Comparar el volumen de riego que se invierte en irrigación subterránea basada en ollas de barro y en irrigación por goteo en *Vitis vinifera* L.
2. Comparar el estado hídrico de *Vitis vinifera* L. bajo irrigación con olla de barro y con irrigación por goteo mediante técnicas fisiológicas (potencial hídrico y conductancia estomática) y mediante percepción remota con imágenes térmicas.
3. Determinar la cantidad de fruto (kg/planta) y su contenido de azúcar (° Brix) con ambos métodos de irrigación.

1.3 Hipótesis

1.3.1 Hipótesis general

La irrigación subterránea con olla de barro enterrada reducirá el volumen de agua de riego en comparación con la irrigación por goteo sin que se presenten diferencias en el estado hídrico en plantas de *Vitis vinifera* de cuatro viñedos del Valle de Guadalupe.

1.3.2 Hipótesis específicas

1. Al reducir las pérdidas por percolación y evaporación, el volumen de agua de riego provisto por la irrigación con ollas de barro será significativamente menor al invertido en irrigación superficial por goteo en *Vitis vinifera* en los cuatro viñedos del Valle de Guadalupe estudiados.
2. Si la irrigación con olla de barro le permite a la planta obtener agua gradualmente acorde a sus necesidades hídricas, el potencial hídrico, la conductancia estomática y la temperatura foliar no serán diferentes en comparación a la irrigación por goteo en *Vitis vinifera* en cuatro viñedos del Valle de Guadalupe estudiados.
3. Si las plantas irrigadas con olla de barro enterrada obtienen la cantidad de agua necesaria para mantener su crecimiento, la masa de frutos y el contenido de azúcares disueltos en los frutos no será diferente respecto a las plantas regadas por goteo.

Capítulo 2. Materiales y Métodos

2.1 Área de estudio: Valle de Guadalupe

Los sitios de estudio se encuentran en la región vitivinícola del Valle de Guadalupe, Baja California, México. Esta región presenta una temperatura media anual de 16.8 °C, con una precipitación media anual de 295 mm, de acuerdo con el estudio del CONAGUA sobre el acuífero Guadalupe (CONAGUA, 2015). El muestreo se realizó en cuatro viñedos: Tres Mujeres, Mogor-Badán, Santo Tomás y Monte Xanic (Figura 1).

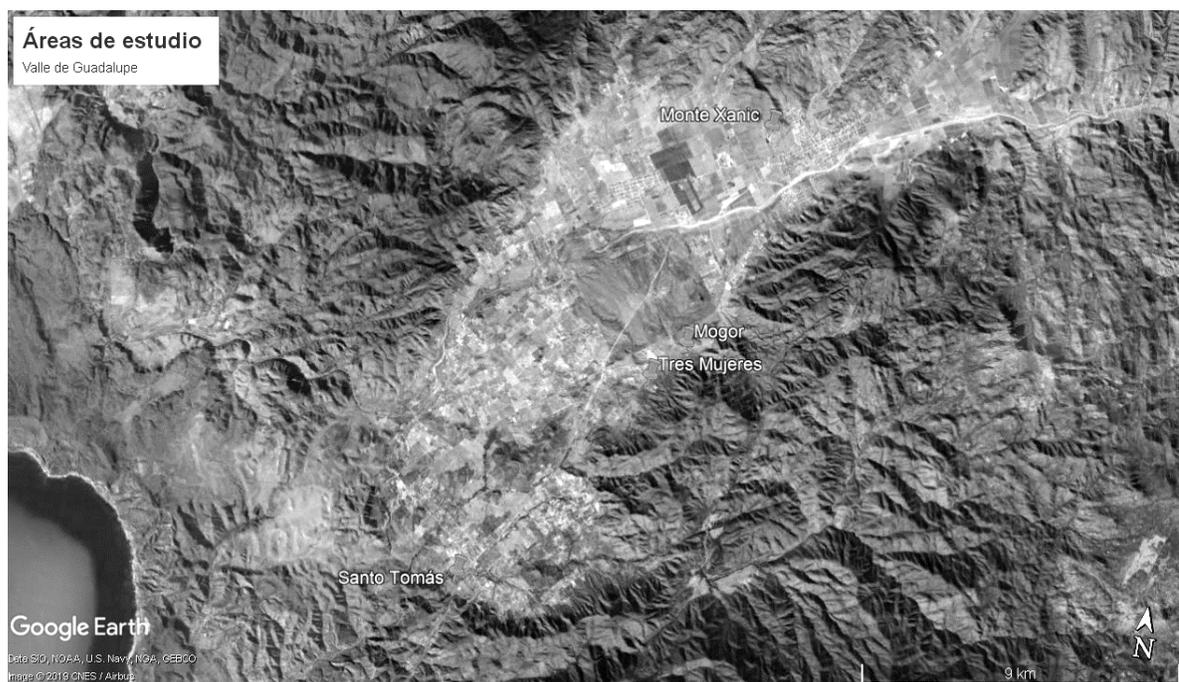


Figura 1. Localización de los cuatro sitios de estudio en el Valle de Guadalupe, Baja California.

En cada viñedo se seleccionaron 30 plantas. Dado que este estudio se realizó en diferentes viñedos, la variedad de uva estudiada y la edad de las plantas no fueron la misma en todos los sitios. De este modo, para controlar la variabilidad entre viñedos, las 30 plantas se dividieron en tres bloques de 10 plantas (A, B y C). Cada bloque contenía 5 plantas bajo el tratamiento de irrigación por goteo y 5 con olla de barro enterrada, separadas entre sí por una o dos plantas que no eran consideradas en el experimento. En cada bloque las plantas fueron de la misma edad y de la misma variedad de *Vitis vinifera*. El estudio se realizó del brote a la cosecha en todos los viñedos porque es la temporada de riego. Es de resaltar que no todos los viñedos empezaron y terminaron la temporada al mismo tiempo y en los análisis se toma en cuenta la temporada de riego particular.

2.1.1 Monte Xanic

Este viñedo está ubicado en las coordenadas 32°05'42.7" N, 116°35'14.62" O), la vinícola tiene aproximadamente 30 años produciendo uva para vino. Para el experimento se seleccionaron uvas de la variedad Cabernet Sauvignon de 4 años de edad y el año de estudio fue el primer año de cosecha (Figura 2). Este viñedo cuenta con una alta inversión en tecnología de irrigación, incluyendo bombeo propio, así como un alto número de trabajadores para el manejo de las plantas. El agua la almacenan en un lago artificial que abastece de agua para riego.



Figura 2. Viñedo Monte Xanic. Fotografía de Septiembre de 2019.

2.1.2 Mogor-Badán

En este rancho se cultivan las variedades Cabernet Sauvignon, Cabernet Franc y Merlot, las plantas tienen hasta 65 años (coordenadas 32°02'08.85" N, 116°36'10.09" O). En este sitio se utilizaron plantas de la variedad Merlot con 7 años de edad, se pueden apreciar en la figura 3. Este viñedo cuenta con infraestructura de riego para suplir con líneas de irrigación a todo el terreno, pero suele sufrir de poca disponibilidad de agua.



Figura 3. Viñedo Mogor-Badán. Fotografía de junio de 2019.

2.1.3 Tres Mujeres

El rancho Tres Mujeres (coordenadas 32°01'32.99" N, 116°36'43.54" O). lleva 14 años de producción de vino y es el rancho más pequeño de los estudiados. Las plantas que se utilizaron fueron de la variedad Cabernet Sauvignon de 4 años de edad en su primer año de cosecha, se pueden apreciar en la figura 4. Este viñedo no cuenta con poca infraestructura hidráulica y todo el trabajo de riego, poda, fertilización, etc. se hace a mano, tampoco llevan registro escrito de los riegos y es el rancho con menos disponibilidad de agua.



Figura 4. Viñedo Tres Mujeres. Fotografía de mayo de 2019.

2.1.4 Santo Tomás (rancho San Gabriel)

El rancho San Gabriel (coordenadas $31^{\circ}58'00.49''$ N, $116^{\circ}39'43.31''$ O) cultiva uva para la vinícola Santo Tomás, una casa vinícola con 130 años de antigüedad. Santo Tomás es la primera bodega de vino comercial de Baja California y de México. Las plantas que se utilizaron para el experimento fueron de la variedad Chardonnay de 35 años de edad. Este viñedo cuenta con infraestructura hidráulica, medidores de flujo y tiene almacenes de agua para el riego, así como personal y maquinaria para el resto de los procesos agronómicos. El cuadrante utilizado es un cuadrante experimental donde se intenta realizar agricultura orgánica, se puede apreciar en la Figura 5.



Figura 5. Viñedo San Gabriel. Fotografía de agosto de 2019.

2.2 Especie de estudio

2.2.1 *Vitis vinifera* L. (Vitaceae)

La uva se domestica desde hace más de 8,000 años y actualmente se reconocen unas 2,000 variedades de cultivo, entre uvas blancas y negras, de mesa, para vino o pasificación (Castroviejo, 2015). Esta especie es probablemente nativa del suroeste de Asia (regiones del Caspio y el Cáucaso) y de la Europa adyacente (Missouri Botanical Garden, 2018). Las primeras pruebas carpológicas y arqueológicas del uso de variedades de cultivo de vid se han encontrado en la región caucásica (Georgia y Armenia), dentro del “Triangulo de la uva fértil” y en la región occidental de la cuenca mediterránea (Sur de Francia y España) (Castroviejo, 2015).

Vitis vinifera, comúnmente conocida como uva de vino europea o uva común, es una enredadera leñosa de hoja caduca que sube por zarcillos ramificados a 40-60 cm (Missouri Botanical Garden, 2018). Puede llegar hasta 20 m de altura con tronco sinuoso de hasta 40 cm de diámetro. Los tallos jóvenes tienen zarcillos más o menos numerosos opuestos a las hojas, a veces fuertemente lignificados. Las hojas van de enteras a palmadas de hasta cinco o siete lóbulos, el haz es glabro y envés glabro o peloso. Inflorescencia

en panícula pedunculada, compacta y opuesta a las hojas. Las flores son minúsculas y pentámeras, hermafroditas o unisexuales (dioicas). Las uvas maduran en verano, son ovoides de tamaño con color y sabor muy variables (Castroviejo, 2015). Las funciones del tronco son principalmente el almacenamiento de sustancias de reserva, la contención de los brazos y pámpanos, la conducción de agua y elementos minerales y fotosintatos. Los pámpanos son los brotes que portan las yemas, las hojas, los zarcillos y las inflorescencias (Chauvet y Reynier, 1984, Figura 6). La raíz tiene un período de crecimiento inicial, que toma de 7 a 10 años; posteriormente un período de estabilización, de 10 a 40 años; y finalmente un período de decadencia, que en general se presenta a partir de los 50 años de edad de la planta (Martínez de Toda Fernández, 1991).

Actualmente, la planta de uva se compone por dos individuos genéticamente diferentes: el primero constituye el sistema radicular, denominado patrón o portainjerto (*Vitis spp.*, de especies americanas), y el segundo, injertado por el viticultor, correspondiente a la parte aérea que se denomina púa, variedad o injerto (*Vitis vinifera* L.). Esta última, conforma el tronco, los brazos y los pámpanos, que son portadores de los principales órganos de la vid (yemas, hojas y racimos) (Martínez de Toda Fernández, 1991).

Para el cultivo de la vid se considera que las temperaturas medias anuales no deben ser inferiores a los 9°C, situándose el óptimo entre 11 y 18°C, los máximos diarios pueden llegar a los 40 o 45°C. Para el periodo caduco puede soportar hasta -15°C (Hidalgo, 2002). Se cultiva mejor en suelos profundos, francos, ricos en humus, de humedad media, bien drenados, a pleno sol. Se desempeña bien en las margas de grava (Missouri Botanical Garden, 2018). Se consideran suficientes 500 mm de lluvia anuales para realizar un cultivo sin necesidad de regar (cultivos en secano) o 700 m³ por hectárea en un año (Mullins et al., 1992).



Figura 6. Frutos de *Vitis vinifera*. Fotografía de septiembre de 2019 en Monte Xanic.

2.3 Características de las ollas de barro

2.3.1 Tasa de filtración

Se realizaron un conjunto de experimentos para estimar la tasa de filtración (en mililitros por 24 horas) de las ollas de barro a la atmósfera dentro de una habitación donde se midió la temperatura y humedad relativa. El volumen de filtración libre de las ollas se puede correlacionar con el volumen de filtración a través del suelo en condiciones de campo.

Se eligieron tres ollas que previamente se llenaron y se dejaron vaciar al aire libre. Las elegidas tuvieron una velocidad de filtración distinta, rápida (A), media (B) y lenta (C). Se utilizó el método de cabeza constante para medir la conductividad hidráulica saturada de las ollas (Abu-Zreig y Atoum, 2004; Siyal et al., 2016). En este método, cada olla seleccionada fue mantenida dentro de una habitación donde se registraba diariamente la temperatura y humedad relativa. Para medir la tasa de flujo de salida en condiciones de cabeza constante se realizó un arreglo de botella Marriotte, como se muestra en la Fig. 7. En este arreglo, el volumen infiltrado es medido a partir del mantenimiento del nivel de agua de un contenedor de cristal graduado conectado por una manguera a la olla. El volumen diario de filtración de una olla es igual a la disminución en el volumen de agua en la botella de Marriotte (M. M. Abu-Zreig y Atoum, 2004; Majed M. Abu-Zreig et al., 2018; Altaf Ali Siyal et al., 2016).



Figura 7. Método de cabeza constante con botella de Marriotte.

2.3.2 Grosor de las ollas

El grosor de la pared de la olla se determinó rompiéndolas al final del experimento y luego midiendo el grosor de la pared de las piezas fracturadas con la ayuda de un Vernier en milímetros (Mitutoyo 293-330-30, Sakado, Japón).

2.3.3 Contenido de agua en saturación

El contenido de agua saturada de las paredes de la olla se determinó colocando trozos de olla en agua durante tres días para la saturación y luego se determinó el peso saturado utilizando el equilibrio de pesaje. El peso seco de los trozos también se registró después de secarlos en un horno a 105°C durante 36 horas. El porcentaje de contenido de agua en saturación con base en el peso (θ_s) se determinó mediante el método gravimétrico utilizando la siguiente relación (Majed M. Abu-Zreig et al., 2006; Altaf Ali Siyal et al., 2016):

$$\theta_s = \frac{W_w - W_d}{W_d} (100)$$

Donde θ_s es el contenido de agua en porcentaje en la pared de la olla en saturación; W_w es el peso de una pieza saturada de la pared de la olla; W_d es el peso seco al horno de la pieza de la olla.

2.3.4 Área superficial de la olla de barro

El área superficial (mm^2) se obtuvo mediante el modelado en 3D con el programa SOLIDWORKS 2019 (Dassault Systemés, Tennessee, Estados Unidos).

2.3.5 Densidad seca aparente de la pared

La densidad aparente de la pared de las ollas se calculó dividiendo su peso seco entre el volumen de la pared (el área de superficie multiplicada por el espesor de la pared) (Majed M. Abu-Zreig et al., 2006; Altaf Ali Siyal et al., 2016) como se indica en la siguiente ecuación:

$$\rho d = \frac{Wd}{AL} \times 100$$

donde ρd es la densidad de la olla seca, A es el área de la superficie y L es el espesor de la pared de la olla.

2.3.6 Porcentaje de porosidad y porosidad

El porcentaje de porosidad se calculó multiplicando el porcentaje de contenido de agua (θ_s) por la densidad seca aparente (ρd) dividida por la densidad del agua. Para obtener la porosidad se utilizó la siguiente ecuación:

$$n = 1 - \frac{\rho d}{\rho w}$$

Dónde n es la porosidad de la pared de la jarra y ρw es la densidad del agua (Majed M. Abu-Zreig et al., 2006; Altaf Ali Siyal et al., 2016).

2.3.7 Tamaño del poro de la olla

El tamaño del poro de la pared se determinó mediante microscopía electrónica de barrido con un microscopio Hitachi SU3500 (Hitachi High-Technologies Corporation, 2001), se utilizaron los fragmentos de olla mencionados anteriormente, después de haber sido sometidos a un proceso de deshidratación a 60°C durante 20 horas en un horno.

2.4 Medición del volumen de riego

2.4.1 Riego con olla de barro y riego superficial en *Tecoma stans*

Como experimento piloto, se realizaron riegos semanales en 10 árboles de *Tecoma stans* en el campus Ensenada del CICESE. Cinco de los árboles incluyeron tratamiento de olla de barro, incluyendo una o dos ollas por árbol, y cinco contaron con riego superficial. La cuantificación del volumen de riego para los dos tratamientos se realizó con una cubeta graduada en litros, con esta cubeta se cuantificó el volumen de agua que requirieron las ollas para ser rellenadas. Para el riego superficial se administraban 20 litros en cada ocasión. Con este experimento se midieron el uso de agua de las ollas en la práctica y se obtuvo un ahorro de agua de 31.8% entre los meses de octubre de 2018 a marzo de 2019 (Fig. 8).

También se midió el potencial hídrico de *Tecoma stans* en este experimento preliminar y no mostraron diferencias significativas entre los tratamientos.

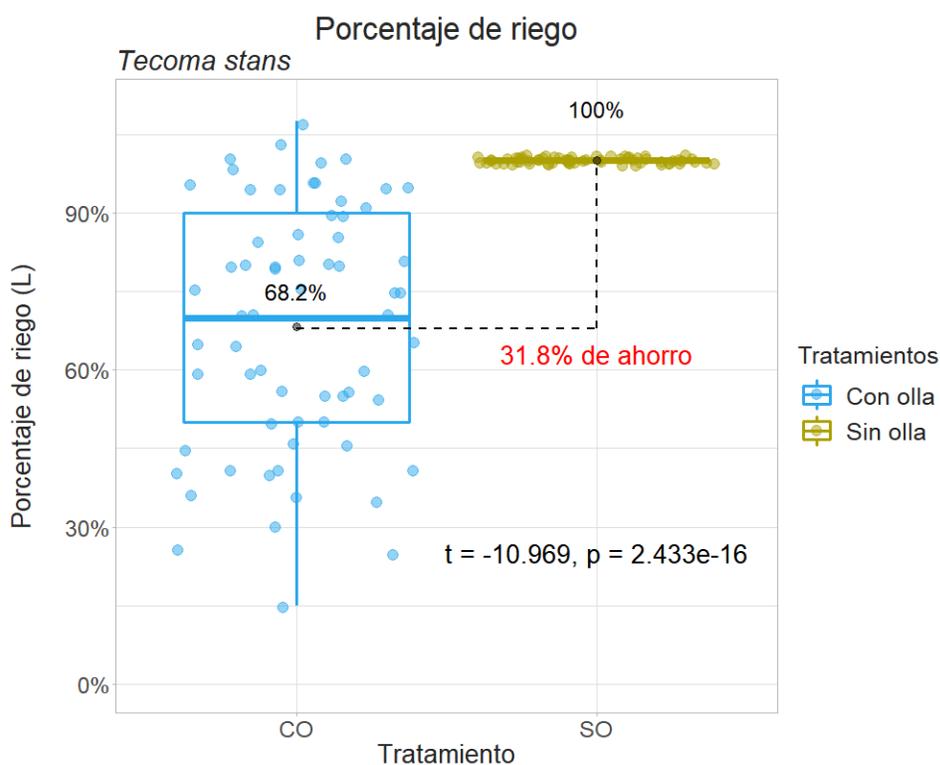


Figura 8. Diagrama de cajas y bigotes del porcentaje de agua usada para regar a *Tecoma stans*.

Mediante el uso de reglas de madera y de mediciones en distintos tiempos, fue posible hacer una asociación de altura y del volumen de agua contenido dentro de las ollas. Posteriormente, se desarrolló un sistema basado en una regresión de profundidad de la olla y el volumen de agua que contenía la olla en 19 ejemplares como se muestra en la Fig. 9.



Figura 9. Medición del nivel de agua (cm) para determinar el volumen de agua contenido en la olla de barro.

2.4.2 Riego con olla de barro y riego por goteo en *Vitis vinifera*

El mismo método de riego con olla de barro utilizado en *Tecoma stans* fue usado también para *Vitis vinifera* en los cuatro viñedos. En el riego por goteo, los productores siguieron su propio calendario de riego semanal (con distancias de riego de 2 o 3 días y hasta 21 días según el manejo de riego), con excepción de Tres Mujeres que no llevan calendario de riego. En la mayoría de los viñedos el calendario de riego se basa en las horas de riego, ya que, cada gotero está diseñado para irrigar de 2 a 4 litros por hora. Sin embargo, en el rancho San Gabriel se cuenta con medidor y el calendario de riego se basa en m^3 por cuadrante. En este sitio se nos proporcionó la bitácora de riego de datos obtenidos del medidor del cuadrante con 2610 plantas, es decir, de los cuatro viñedos es el único que tiene medidor y que, por lo tanto, nos proporcionaron datos más precisos del agua que se gasta en esa viña. Para todos los viñedos se calcularon los promedios y totales de litros regados por planta en cada mes durante la temporada de brote a cosecha correspondiente a cada viñado.

2.5 Fisiología de las plantas

Las mediciones fisiológicas se realizaron en tres campañas durante el crecimiento del fruto de *Vitis vinifera* en los meses de mayo, junio y agosto del 2019. En estas campañas se tomó el potencial hídrico y la conductancia estomática de medio día (entre 11 am y 1 pm, hora de verano de Ensenada) y durante la noche. Las imágenes térmicas se tomaron en el mismo intervalo de 11 am a 1 pm los mismos días.

2.5.1 Potencial hídrico

El potencial hídrico (ψ) de las hojas se midió mediante una cámara de presión modelo 1505D (PMS Instrument Company, 2019). El método consistió en cortar una hoja terminal en cada planta, introducir la hoja en la cámara sellada y aplicar un gas inerte hasta que la savia del xilema forme una gota en la zona de corte como se indica en la figura 10 (Scholander et al., 1965).

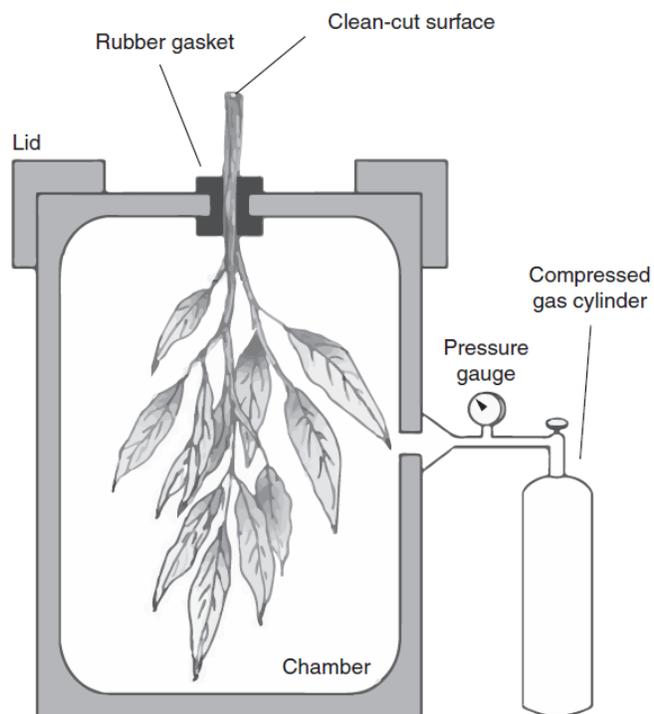


Figura 10. Esquema de la medición del potencial hídrico con la cámara de presión. Modificado de Pérez-Harguindeguy et al., 2016.

2.5.2 Conductancia estomática

La conductancia estomática (g_s) se midió con un porómetro foliar SC-1 (METER Group, 2019). Las mediciones se realizaron en una rama con exposición hacia el sur, independiente de las utilizadas para cuantificar el potencial hídrico. Las medidas se realizaron en la cara abaxial de las hojas y se limpió cualquier humedad con un con papel secante. Fue necesario realizar calibraciones del equipo varias veces si ocurría algún cambio de temperatura (en °C) y humedad relativa (en %) (Santos et al., *en prep*).

2.5.3 Cosecha de frutos y concentración de azúcares

Al final de la cosecha se pesaron los frutos por planta y se midió la concentración de azúcares disueltos con un refractómetro (Handheld Brix Refractometers, BTX-1, VEE GEE Scientific) en tres de los cuatro viñedos estudiados.

2.6 Percepción remota

2.6.1 Imagen térmica

Las imágenes térmicas se tomaron con una cámara térmica Zenmuse XT (DJI, Schezuan, China) en un vehículo aéreo no tripulado Matrice 100. La altura de vuelo fue de 10 m de altura en modo manual y las fotografías se procesaron con el software FlirTools. Para validar los datos obtenidos de manera remota se tomaron simultáneamente medidas de la temperatura por debajo de la hoja (con un termohigrometro) en la que se midió la conductancia estomática.

Las imágenes obtenidas se procesaron con el programa FlirTools como se puede apreciar en las Figuras 11-14. Este programa nos permite obtener medidas puntuales de la temperatura, generar círculos o rectángulos para un área determinada y obtener la temperatura mínima, máxima y promedio de la figura elegida. A continuación, se muestran ejemplos de cómo se obtuvieron las temperaturas en cada uno de los viñedos:

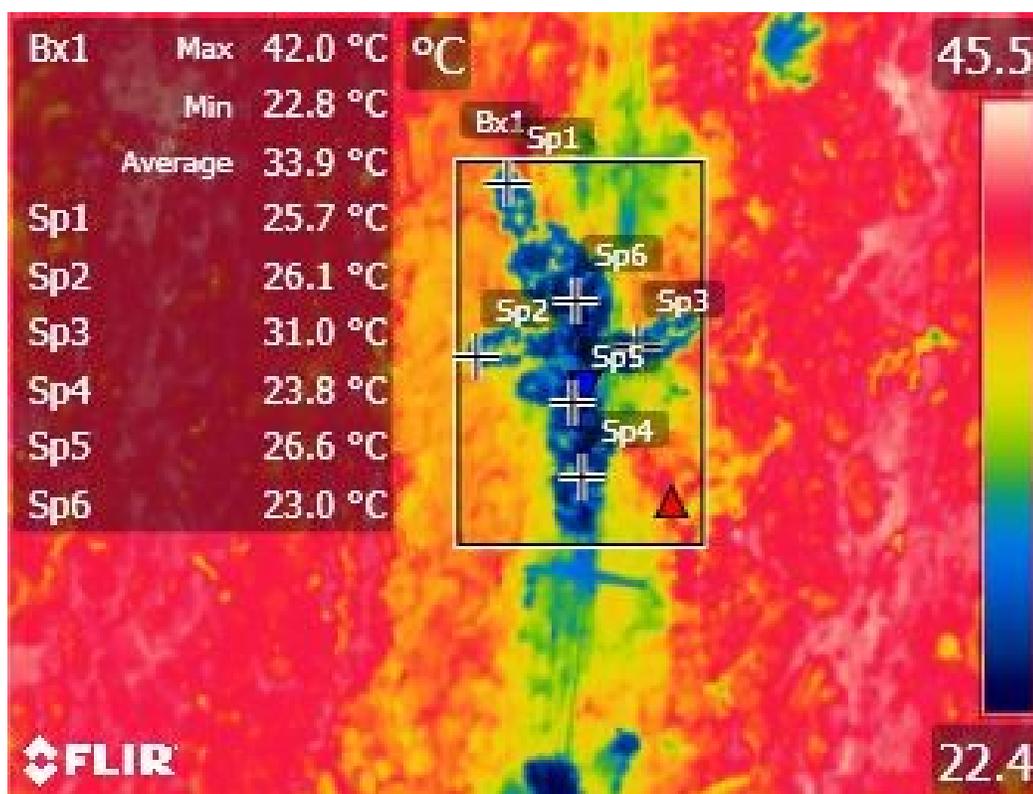


Figura 11. Imagen térmica de una planta de *Vitis vinifera* en Monte Xanic.

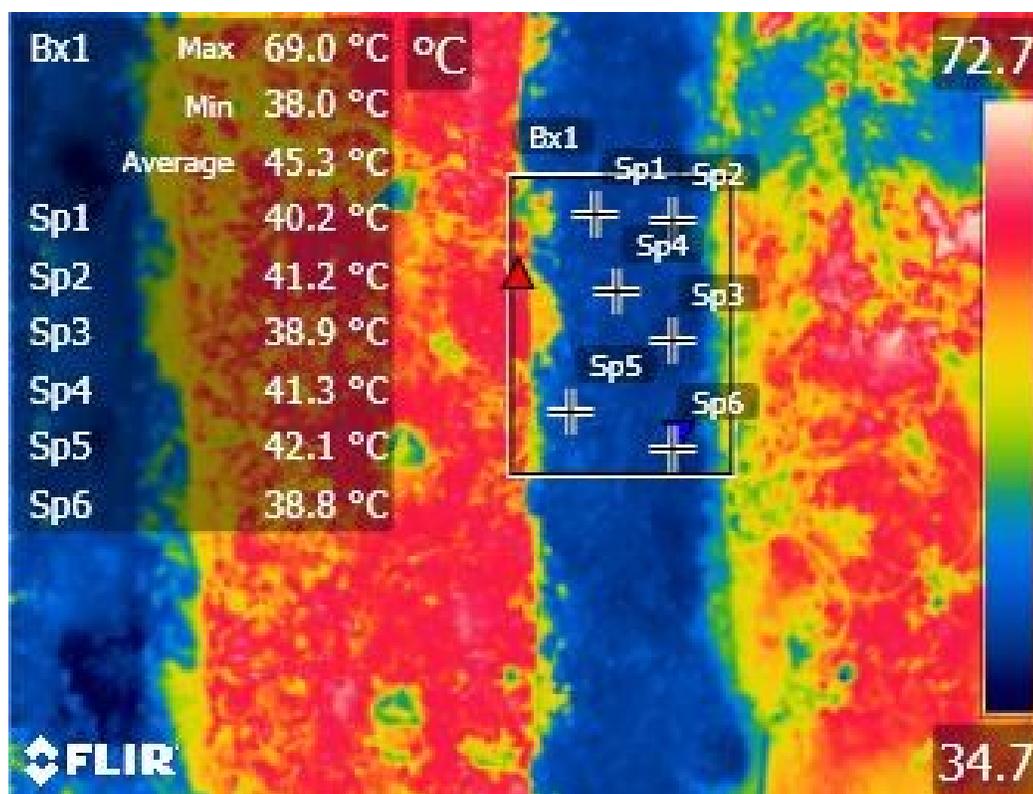


Figura 12. Imagen térmica de dos plantas de *Vitis vinifera* en Mogor-Badán.

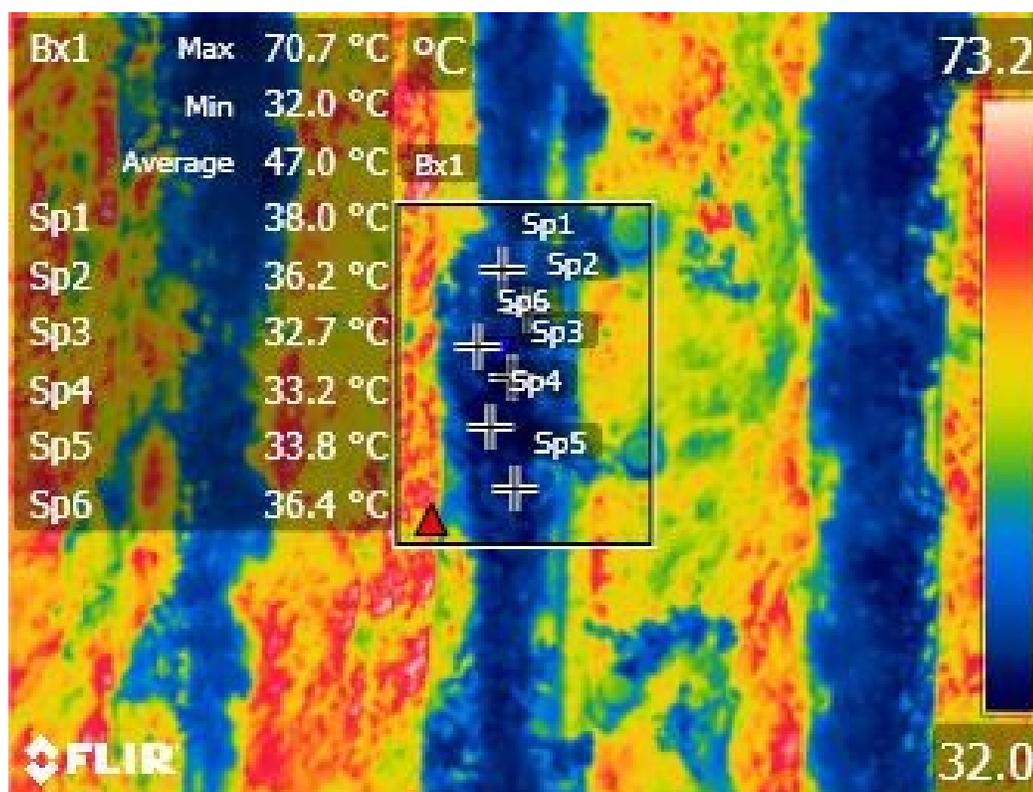


Figura 13. Imagen térmica de dos plantas de *Vitis vinifera* en Tres Mujeres.

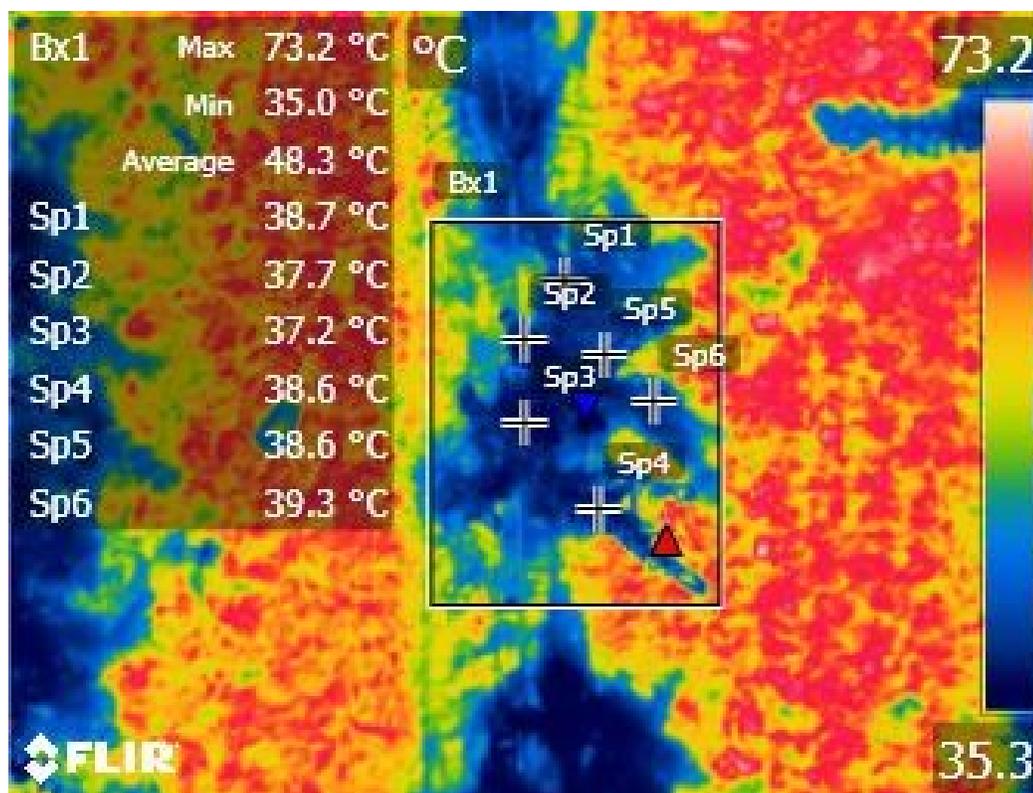


Figura 14. Imagen térmica de una planta de *Vitis vinifera* en Santo Tomás (Rancho San Gabriel).

Las imágenes térmicas se obtuvieron a partir de vuelos que se hicieron de manera simultánea con la toma de las medidas de potencial hídrico y de conductancia estomática, además, se tomaron medidas de temperatura ambiental y por debajo de la hoja (con un termohigrómetro) para la medición de la conductancia estomática.

2.8 Análisis estadísticos

El diseño del experimento fue en bloques. En cada bloque se estudiaron diez plantas (que fueron asignadas por los productores) distribuidas espacialmente de manera lineal, a cinco de ellas se les colocaron ollas, y en la misma línea, a una distancia de dos plantas a otras cinco plantas se les dio un tratamiento de riego por goteo. En total, en cada viñedo se estudiaron tres bloques de cinco plantas con olla y cinco plantas con riego por goteo. Para comparar las variables fisiológicas, el volumen de riego y la temperatura a partir de sensores remotos, se realizaron pruebas estadísticas de t-student pareadas, comparando los tratamientos de olla y riego por goteo. La información se presentó de manera gráfica usando R Studio versión 3.4.4 (RStudio versión 3.4.4, 2015).

Capítulo 3. Resultados

3.1 Características de las ollas de barro

3.1.1 Resumen de las características físicas de la olla

La tasa de filtración fue variable entre ollas, desde 371 ml por día hasta 6,500 ml por día. Los parámetros físicos de las ollas se muestran en la Tabla 3. Tanto la tasa de filtración como el tamaño promedio del poro y la porosidad fueron mayores en la olla A, intermedios en la olla B y menores en la olla C.

Tabla 3. Resumen de las características físicas de las ollas de barro.

Característica	Olla		
	A	B	C
Altura (mm)	325	315	315
Diámetro máximo (mm)	303.99	299.21	297.62
Diámetro base (mm)	140	130	153.66
Volumen (ml)	9800	10600	10800
Tamaño promedio del poro (μm)	9.902	6.425	1.69
Área superficial (mm^2)	15393.8	13273.2	18529.87
% Contenido de agua en saturación	16.79	19.25	18.54
Grosor (mm)	16.27	11.02	10.99
Porcentaje de peso	16.9	19.22	18.6
Densidad (g/cm^3)	1.81	1.87	1.85
Tasa de filtración (ml/día)	6494.12	1000	371.43
Volumen de la pared (mm^3)	250457.12	146270.66	203766.8
Densidad seca aparente de la pared (g/cm^3)	3.92	3.65	3.58
% Porosidad	66.32	70.15	66.62
Porosidad	2.92	2.65	2.58

3.1.2 Microscopía electrónica de barrido de las paredes de la olla y tamaño del poro

Mediante la microscopía electrónica de barrido se obtuvieron las medidas de los poros de las ollas seleccionadas. De cada olla se midieron tres trozos y de cada trozo se obtuvieron al menos tres medidas que se promediaron al final (Tabla 3). Los poros variaron desde 39.3 μm hasta menos de 1 μm como se puede apreciar en la Figura 15, donde también se observa que tanto la tasa de filtración como la porosidad y el tamaño de poro en la olla C fueron menores en todos los casos y en la olla A fueron mayores. Es decir, cuando encontré un tamaño de poro mayor, también aumento la tasa de filtración y la porosidad.

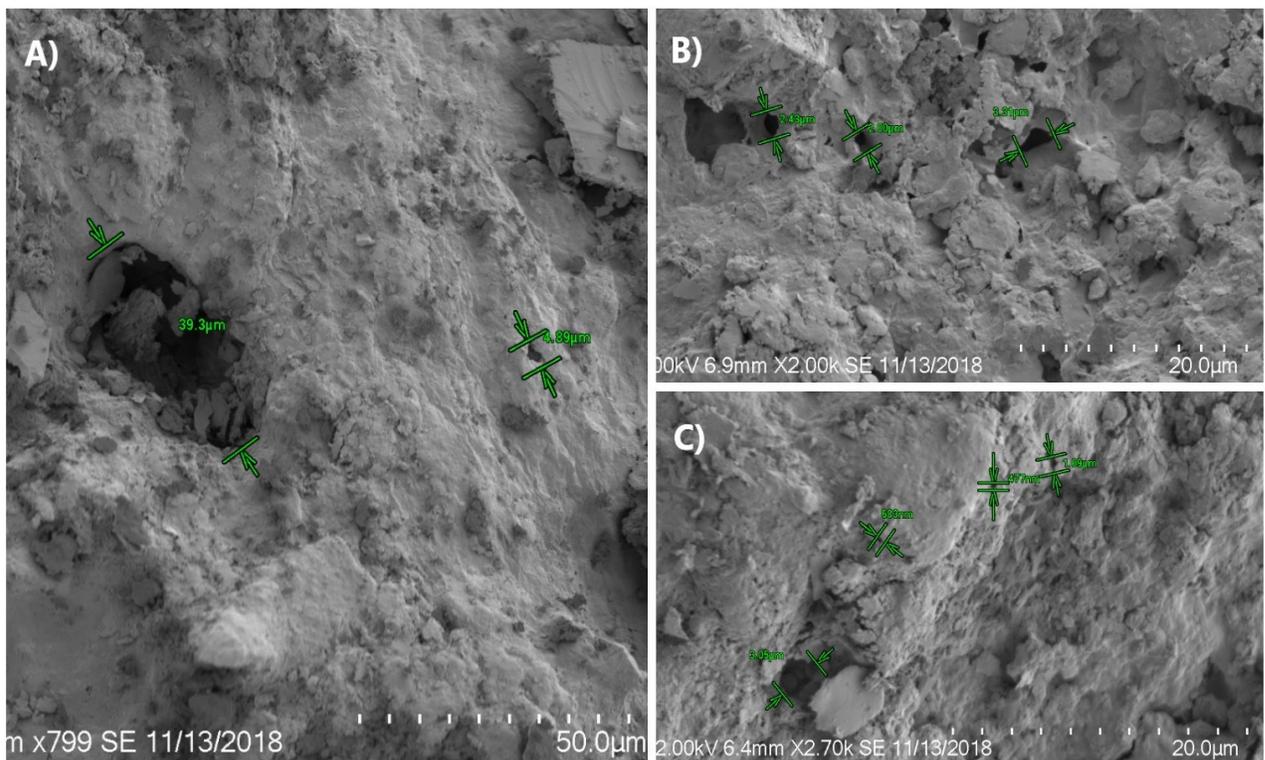


Figura 15. Tamaño de poro de las ollas de barro. A) Poros del trozo de la olla A, B) Poros del trozo de la olla B, C) Poros del trozo de la olla C.

3.2 Medición del volumen de riego

3.2.1 Riego con olla de barro y riego superficial en *Tecoma stans*

Para corroborar que mediante la técnica de regla es posible predecir los litros de agua que contiene la olla de barro, se realizaron medidas en una muestra de 19 ollas con los que se regaron varios árboles de *Tecoma stans* subterráneamente. Para cada olla, se relacionó la profundidad en centímetros con el

volumen de agua contenido en la olla. La regresión cuadrática presentó mejor ajuste que la lineal mediante la comparación de modelos por el criterio de información de Akaike. La regresión lineal tuvo un valor de AIC de 40.08 y un R^2 de 0.90. En cambio, la regresión cuadrática tuvo un valor de AIC de 23.77 y un R^2 de 0.98 como podemos ver en la Figura 16.

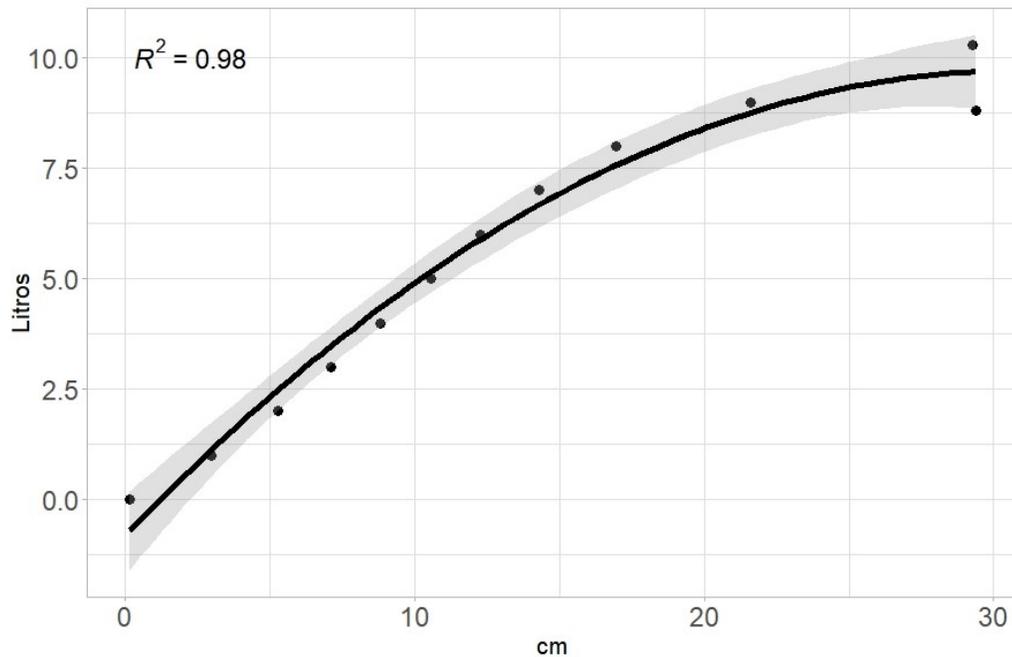


Figura 16. Regresión cuadrática de la profundidad de la olla y del volumen de agua asociados con $p < 0.05$.

3.2.2 Riego con olla de barro y riego por goteo en *Vitis vinifera*

Cada semana se llenaron de agua las ollas de barro enterradas y se comparó el volumen de agua utilizada con este método con los datos proporcionados por los agrónomos de cada viñedo sobre las horas de goteo o de los m^3 irrigados. A continuación, se muestran los resultados en general y por viñedo en la tabla 4 y en la figura 17 se pueden observar los litros usados por planta en cada mes de la temporada, separado por viñedo.

En Monte Xanic, las hojas de las plantas del bloque C se retrasaron en la expansión de yemas axilares a hojas hasta el mes de julio, por lo cual el agrónomo de este sitio decidió regar con goteo y con olla al mismo tiempo (Figura 21 del anexo). Esto llevó a que este bloque de plantas tuviera doble riego respecto a las otras plantas durante un par de meses y se eliminaron del experimento. Sin embargo, como se puede observar en la tabla 4, el riego por goteo total en toda la temporada (para cada planta) fue 227 litros mayor

que con riego por goteo. En Mogor-Badán el volumen de riego con olla fue cerca de 50% menor ($p < 0.0005$) que el riego por goteo (Tabla 4 y figura 23 del anexo).

Tabla 4. Resumen del promedio de los litros usados en cada viñedo (por planta y durante toda la temporada) según el tratamiento. La duración de la temporada fue similar en Mogor-Badán, Monte Xanic y Tres Mujeres (6 meses) pero en Santo Tomás fue de 5 meses. En todos los casos menos en Tres Mujeres, la irrigación con olla de barro ahorro agua.

Viñedo	Tratamiento	Litros promedio \pm desviación estándar por planta por mes	Diferencia entre riego promedio con olla vs con goteo	Litros totales usados en la temporada	Diferencia del total de litros usados con olla vs con goteo
Mogor-Badán	Goteo	108.7 \pm 0	47.7	652	286.1
	Olla de barro	61 \pm 23.2	CO<SO	365.9	
Monte Xanic	Goteo	120 \pm 0	37.9	720	227.5
	Olla de barro	82.1 \pm 13.83	CO<SO	492.5	
Santo Tomás	Goteo	215.2 \pm 0	146.3	1076	731.7
	Olla de barro	68.9 \pm 21.28	CO<SO	344.3	
Tres Mujeres	Goteo	60.7 \pm 0	8.7	364	52.6
	Olla de barro	69.4 \pm 25.91	CO>SO	416.6	

En el viñedo Tres Mujeres fue el único sitio donde el volumen de riego con olla fue mayor por 53 litros al riego por goteo (tabla 4, figura 24 del anexo). Es importante mencionar que es el único viñedo donde no hubo ahorro de agua con el tratamiento de olla de barro. El rancho San Gabriel, propiedad de viñedos Santo Tomás fue el viñedo que más agua gastó en el riego, cerca de 3 veces más que con olla de barro, o alrededor de 700 litros más en riego por goteo que por olla (Tabla 4, figura 22 del anexo).

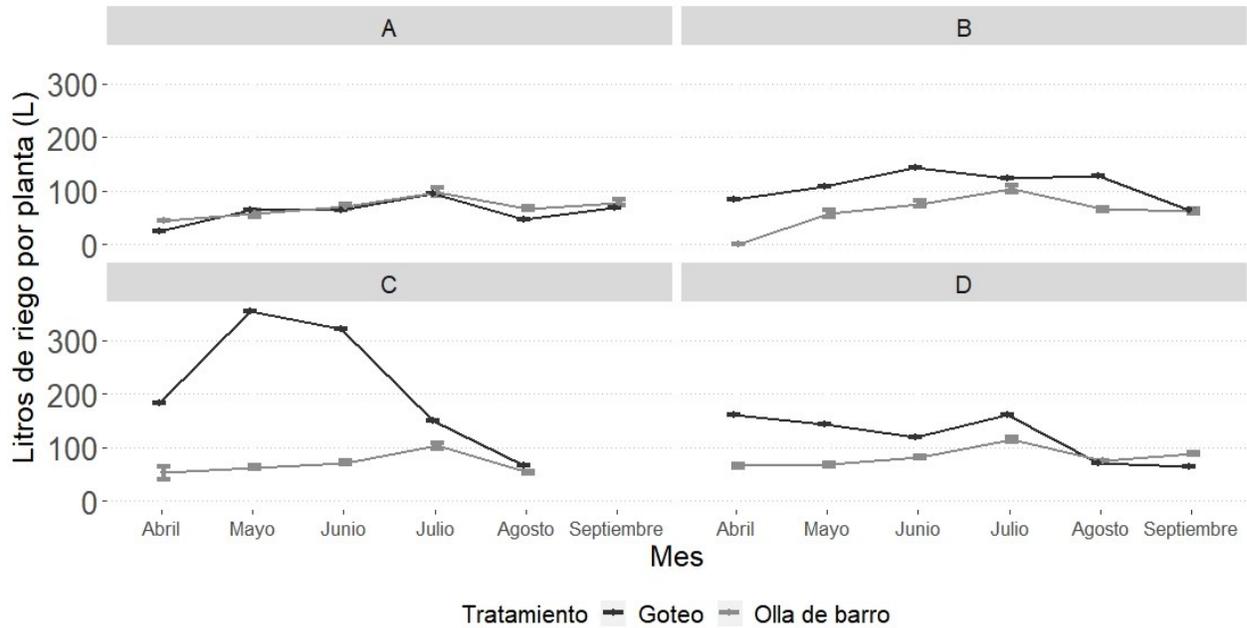


Figura 17. Comparación del promedio de litros usados por mes para los dos tratamientos de irrigación. Desde el brote hasta la cosecha de *Vitis vinifera* en los cuatro viñedos del Valle de Guadalupe. La gráfica muestra las medias e intervalos de confianza al 95% de los litros usados para riego de abril a septiembre de 2019 por planta. A = Viñedo Tres Mujeres, B = Viñedo Mogor-Badán, C = Rancho San Gabriel (Viñedos Santo Tomás), D = Viñedos Monte Xanic.

3.3 Fisiología de las plantas

3.3.1 Fisiología de *Vitis vinifera*

Los resultados de los promedios y de las comparaciones entre tratamientos de las variables fisiológicas y la temperatura del follaje con termografía por medio de pruebas t-Student se presentan en la Tabla 5 (Figuras 25-29 del anexo). De todas las variables fisiológicas estudiadas solamente se presentaron diferencias significativas entre tratamientos en Mogor-Badán donde la conductancia estomática de día y el potencial hídrico de noche fueron menores con riego por OBE, y en Monte Xanic donde las temperaturas del follaje fueron mayores con olla que con riego por goteo. Para poder validar las temperaturas tomadas remotamente con mediciones en tierra, se correlacionaron linealmente mediciones de la temperatura debajo de la hoja con las temperaturas proporcionadas con el sensor remoto (Figuras 18).

Tabla 5. Medias y \pm desviación estándar de variables fisiológicas y temperaturas en *Vitis vinifera*. También se muestran las diferencias de las variables entre riego por goteo y por olla de barro, en negrita se encuentran los valores con $p < 0.005$ en la prueba t de Student. CO > SO: Riego con olla mayor a riego por goteo, CO < SO: Riego con olla menor a riego por goteo.

			Potencial hídrico (MPa)	Diferencia del potencial hídrico entre goteo y OBE	Conductancia estomática (mmol/m ² s)	Diferencia de Conductancia estomática entre goteo y OBE	Temperatura con cámara térmica (°C)	Diferencia de temperatura entre goteo y OBE
Mogor-Badán	Día	Goteo	-1.38 \pm 0.15	0.03	311.24 \pm 46.64	54.81 CO<SO	31.53 \pm 0.76	1.48
		Olla de barro	-1.35 \pm 0.11		256.43 \pm 38.61		33.01 \pm 0.81	
Mogor-Badán	Noche	Goteo	-0.37 \pm 0.05	0.07 CO<SO	99.26 \pm 11.18	8.83	-	-
		Olla de barro	-0.44 \pm 0.05		90.43 \pm 11.18		-	
Monte Xanic	Día	Goteo	-1.27 \pm 0.09	0	338.94 \pm 46.63	24.45	24.97 \pm 1.55	2.32 CO>SO
		Olla de barro	-1.27 \pm 0.07		314.49 \pm 61.53		27.29 \pm 1.27	
Monte Xanic	Noche	Goteo	-0.47 \pm 0.05	0.03	151.66 \pm 20.14	21.55	-	-
		Olla de barro	-0.44 \pm 0.05		130.11 \pm 19.41		-	
Santo Tomás	Día	Goteo	-1.22 \pm 0.14	0.03	296.89 \pm 51.2	1.4	31.84 \pm 3.23	0.45
		Olla de barro	-1.25 \pm 0.19		298.29 \pm 68.2		32.29 \pm 2.6	
Santo Tomás	Noche	Goteo	-0.3 \pm 0.03	0	135.89 \pm 23.46	8.11	-	-
		Olla de barro	-0.3 \pm 0.03		127.78 \pm 26.5		-	
Tres Mujeres	Día	Goteo	-1.37 \pm 0.16	0.05	300.81 \pm 59.68	38.94	35.65 \pm 2.22	0.83
		Olla de barro	-1.42 \pm 0.13		339.75 \pm 53.34		34.82 \pm 1.4	
Tres Mujeres	Noche	Goteo	-0.53 \pm 0.09	0.11	112.46 \pm 14.42	4.26	-	-
		Olla de barro	-0.42 \pm 0.09		116.72 \pm 21.42		-	

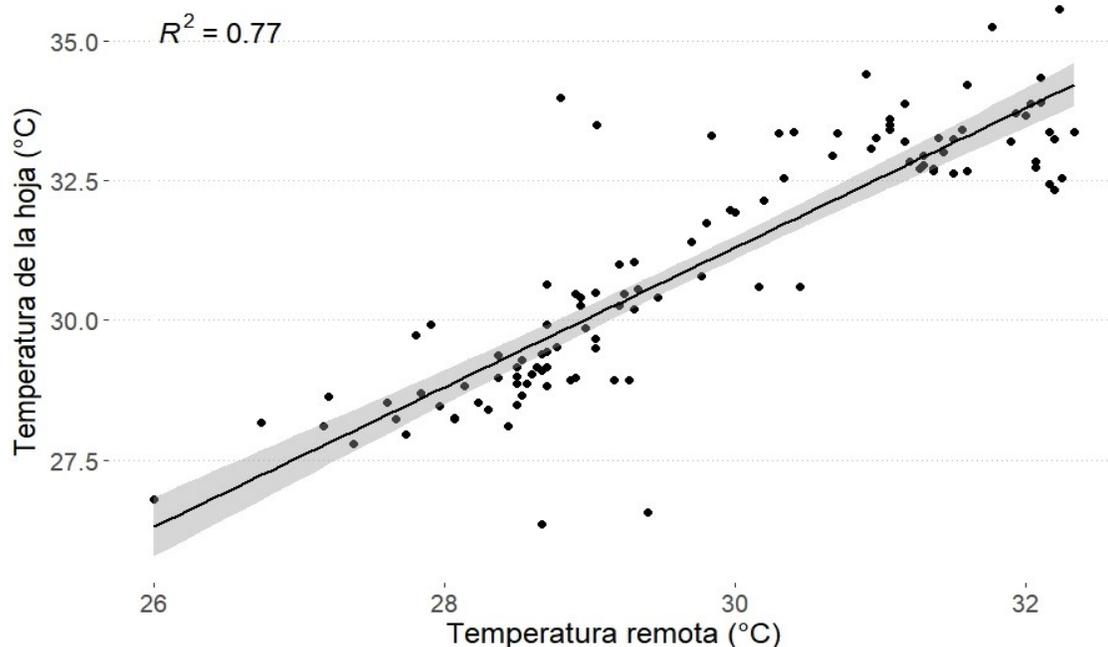


Figura 18. Correlación entre la temperatura registrada debajo de la hoja en campo y la temperatura obtenida por la cámara térmica en cada planta individualmente con una $p < 0.005$.

3.3.2 Peso de frutos durante la cosecha y azúcares disueltos en los frutos

Al momento de la cosecha se pesaron los frutos por planta (Figura 19 y Tabla 6), en cada viñedo la cosecha fue en una fecha distinta entre finales de agosto y principios de octubre. No hubo diferencias significativas en el peso de las uvas por planta entre tratamientos en ningún viñedo. Para el viñedo de Santo Tomás no se tienen datos porque se cosechó sin previo aviso y no se pudo cuantificar ni el peso de los frutos ni la concentración de azúcares.

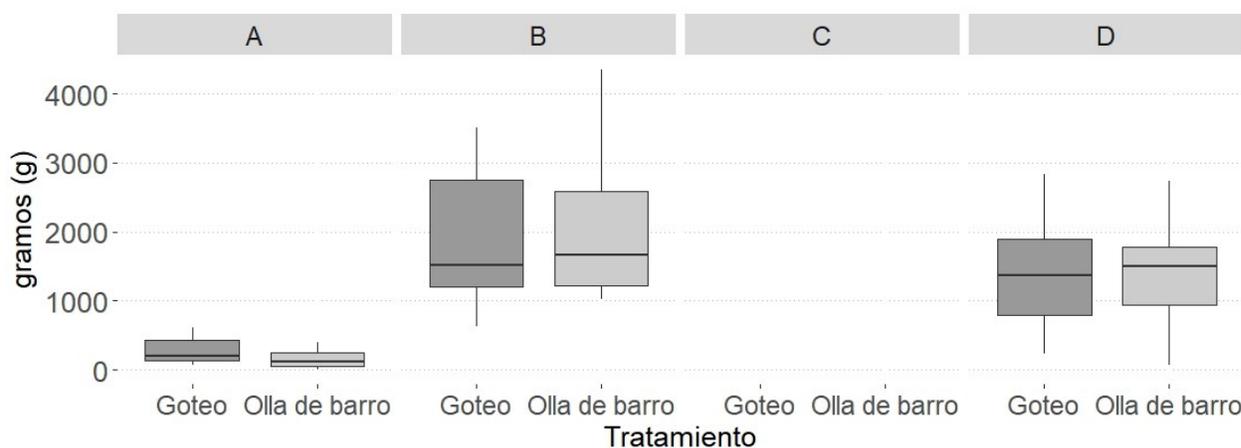


Figura 19. Diagrama de cajas y bigotes del peso de los frutos en la cosecha por planta en cada viñedo. A = Viñedo Tres Mujeres, B = Viñedo Mogor-Badán, C = Rancho San Gabriel (Viñedos Santo Tomás), D = Viñedos Monte Xanic.

Tabla 6. Medias y desviación estándar de la cosecha y los azúcares disueltos en los frutos de *Vitis vinifera*. También se muestran las diferencias de las variables entre riego por goteo y por olla de barro, en **negrita** se encuentran los valores con $p < 0.005$ en la prueba t de Student. CO > SO: Riego con olla mayor a riego por goteo, CO < SO: Riego con olla menor a riego por goteo.

Sitio	Tratamiento	Peso de la cosecha (kg/planta)	Diferencia en el peso de cosecha	Azúcares disueltos en los frutos (°Brix)	Diferencia en los °Brix
Mogor-Badán	Goteo	1.97 ± 0.99	0.043	25.17 ± 0.76	0.75 CO>SO
	Olla de barro	2.013 ± 0.93		25.92 ± 1.11	
Monte Xanic	Goteo	1.42 ± 0.83	0.06	24.62 ± 1.44	0.42
	Olla de barro	1.36 ± 0.79		24.2 ± 1.74	
Santo Tomás	Goteo	-	-	-	-
	Olla de barro	-		-	
Tres Mujeres	Goteo	0.278 ± 0.2	0.12	25.85 ± 1.81	0.93
	Olla de barro	0.15 ± 0.14		24.92 ± 1.62	

Al cosechar y pesar los frutos se tomaron 3 muestras de uvas de distintos racimos con el fin de medir los azúcares disueltos (grados Brix) por planta y hacer una comparación cuantitativa de la concentración de azúcares de los frutos (Figura 20 y Tabla 6). En Monte Xanic y en Tres Mujeres no hubo diferencias en la concentración de azúcares entre tratamientos, pero en Mogor-Badán las uvas regadas con olla de barro presentaron mayores grados Brix que las uvas regadas por goteo

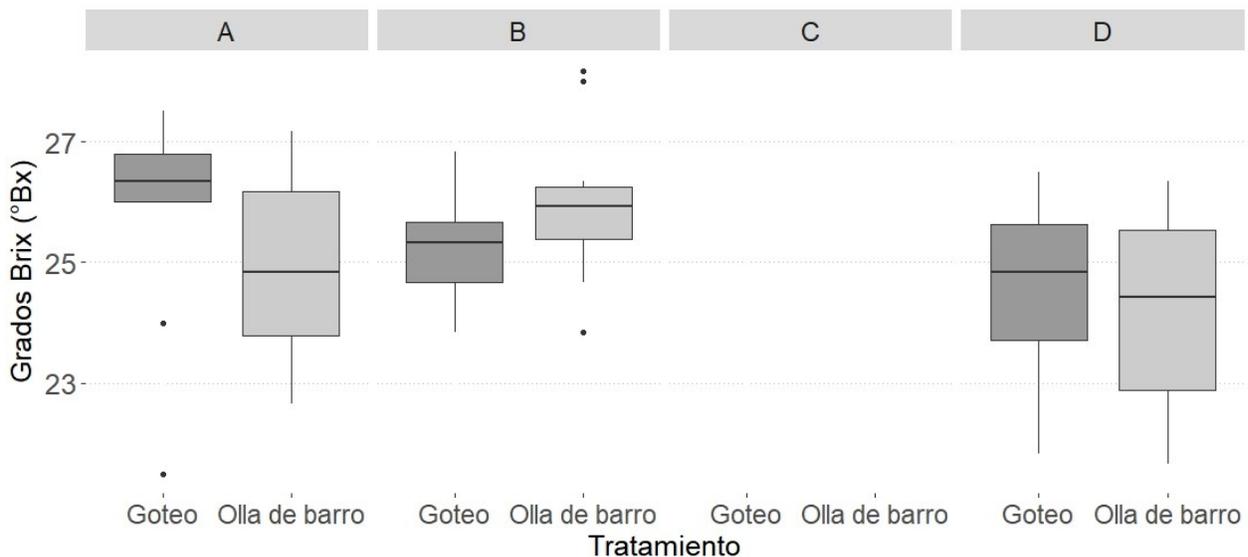


Figura 20. Diagrama de cajas y bigotes de la concentración de azúcares disueltos (° Brix) de los frutos por planta para cada viñedo. A = Viñedo Tres Mujeres, B = Viñedo Mogor-Badán, C = Rancho San Gabriel (Viñedos Santo Tomás), D = Viñedos Monte Xanic.

Capítulo 4. Discusión

4.1. Ahorro promedio en irrigación con olla de barro enterrada

Encontré que el uso en irrigación de las ollas de barro enterradas puede reducir el volumen de agua en comparación con el riego por goteo hasta en un 65 % (Tabla 4, Santo Tomás). Esta conclusión se deriva tanto de los datos obtenidos con el árbol de ornato *Tecoma stans* y de los datos obtenidos de los viñedos al comparar los tratamientos, como de la información obtenida del volumen de riego entre los cuatro viñedos (Tabla 7). Estos cuatro viñedos tienen diferente disponibilidad hídrica, y por tanto una alta variabilidad en el volumen de riego aplicado por goteo.

La variabilidad en el volumen con riego por goteo, en la mayoría de los casos, fue mucho mayor a la presentada por el riego con olla de barro enterrada (OBE). Por ejemplo, en varias ocasiones encontré que los goteros emitían mucho más que los litros especificados por los agrónomos, es decir, había fugas. Esto se corroboró al realizar las evaluaciones de temperatura mediante sensores remotos, que detectaban la presencia de muchas fugas en los goteros de irrigación (Figura 23 del anexo). Estos factores contribuyeron a que tanto la media como la varianza de la irrigación con goteo superó en la mayor parte de los casos al riego por OBE.

En el rancho San Gabriel de la vitícola Santo Tomás tuve la única medición del volumen de riego con medidor, pudiendo calcular de manera más precisa el volumen de riego por el total de plantas para cada fecha de medición y para toda la temporada de estudio. Además, el cuadrante donde se llevó a cabo el estudio estaba destinado a experimentación y, por tanto, tuvo más variaciones en el manejo agronómico. En los otros tres viñedos el cálculo de volumen de irrigación se realizó con base en los estimados de calendarios de irrigación por parte de los productores. Excepto en Tres Mujeres, en todos los viñedos el volumen de riego con OBE fue significativamente menor al riego por goteo. Esto lo atribuyo a que en Tres Mujeres no hay un calendario de riego y es el viñedo con menor disponibilidad hídrica, por lo cual los riegos fueron mucho más infrecuentes que en los otros viñedos.

4.1.1. Mejoramiento del método de olla de barro enterrada

Dentro de las posibilidades para mejorar y hacer más eficiente el método de OBE se encuentran:

- 1) Mejorar los procesos de producción de ollas, para poder estandarizar la proporción de arcilla y arena 4:1 y, también las temperaturas de cocción. Al tener las ollas proporciones estándar de clases y calidades de arcillas y arenas, además de ser cocidas con temperaturas estandarizadas, se podrá reducir la variabilidad tanto en la tasa de filtración como en la conductancia hidráulica de OBE y podrá tenerse un mejor control del volumen de riego aplicado. Actualmente, la producción de OBE es realizada de manera artesanal, sin tomar en cuenta proporciones ni temperatura de cocción por lo cual, se presenta una variabilidad en sus características físicas (Tabla 3, figura 15). Para incrementar la demanda de este producto, se podrían establecer procesos de diseño industrial dirigidos a la estandarización y producción masiva (como se realiza en otros países), para disminuir costos y emisiones de carbono, así como para incrementar la rentabilidad para los artesanos y productores.
- 2) En este experimento no se conocía la frecuencia de riego para llenar las ollas, por lo cual se acudía semanalmente a realizar el llenado de manera manual. Una vía de mejora en este método es utilizar los goteros de riego acoplados a un tubo de conexión) para llenar el interior de las ollas calculando un tiempo de llenado equivalente al volumen de la olla (a partir de un flujo de 2 L/hora, esto implicaría regar durante 4-5 horas a la semana). Este simple procedimiento evitaría el llenado manual e implica un cambio muy simple de diseño en las OBE.
- 3) Métodos para incrementar la vida útil de la OBE. La vida útil promedio de la OB es de 5 a 6 años, de acuerdo con los reportes de la literatura. Sin embargo, consideramos que es posible extender su vida útil si se evita que las raíces secundarias entren en contacto con la superficie de la arcilla. Cubrir a la OBE con malla anti-raíces con una capa de sustrato nutritivo entre la arcilla y la malla podría extender la vida útil del producto y mejorar su “servicio”, aunque esto implicaría incrementar la inversión inicial y produciría residuos plásticos en el sustrato.
- 4) Acoplar la instalación de OBE a estudios previos de agricultura de precisión. En este estudio no se evaluó la heterogeneidad espacial del terreno ni la textura del suelo, que se sabe influye en la dirección de flujo de la microirrigación con OBE (Altaf A. Siyal et al., 2009; Altaf Ali Siyal et al., 2016). Del mismo modo, no se estudiaron las propiedades del suelo como la materia orgánica, pH, contenido de macro y micro nutrientes. Conjuguar el método OBE con estudios espaciales podría permitir establecer el sitio adecuado para la instalación de OBE, así como analizar qué fertilizantes pueden pasar a través de las paredes de la OBE y realizar fertilizaciones de manera puntual a la escala de la planta, reduciendo pérdidas económicas y contaminación por exceso de fertilización.

Del mismo modo, el método OBE podría coadyuvar a la aplicación de bioestimulantes dirigidos específicamente a la rizósfera.

- 5) Es importante contar con información sobre el uso de OBE y su relación con diferentes texturas del suelo, por ejemplo, suelo con textura mineral y suelo con alto contenido de materia orgánica. Hay formulaciones estándares sobre capacidad de campo en relación a estos componentes, pero para suelos de ladera en Baja California se estima que la materia orgánica, aún siendo menor a 2% por peso, contribuye un 30% por volumen de la Capacidad de campo del suelo (Fong, 2019). El manejo agronómico de los viñedos no siempre favorece mantener la materia orgánica del suelo, menos a la profundidad de las raíces, pero es un manejo factible de cambiar.

4.2 Valores de referencia fisiológicos y de percepción remota para estrés hídrico en *Vitis vinifera* en el Valle de Guadalupe, Baja California

Para evaluar el estado hídrico en vid, utilicé una combinación de medidas ecofisiológicas y cuantificaciones basadas en sensores remotos térmicos. Aunque no se encontraron correlaciones entre las temperaturas y la conductancia estomática, el uso de la termografía ha sido reportado como un indicador del estatus hidráulico de plantas de vid (Chaerle y Van Der Straeten, 2000). Mis datos indican que en general no hubo diferencias en la fisiología de las plantas cuantificadas en los bloques experimentales de los dos tipos de técnica de irrigación y cuando estas se presentaron, fue posible que la baja variabilidad de las ollas haya influido en la detección de significancia de los análisis estadísticos. Por ejemplo, ni la conductancia de los estomas ni el potencial hídrico a medio día o nocturno mostraron evidencia de que las OBE generarán mayor estrés hidráulico a las plantas que el riego por goteo.

De manera más sorprendente, aún con los distintos regímenes de irrigación entre viñedos y las enormes diferencias de manejo en riego entre sitios, el potencial hídrico y la conductancia de los estomas prácticamente no presentó variación entre viñedos (Tabla 7, figura 26 y 28 del anexo). Esto puede deberse a que estas medidas son reflejo de los ciclos circadianos de las plantas, donde la luz es la condición ambiental clave para poder determinar estos valores (Santos et al. *en prep*).

Por otro lado, la termografía remota (validada con mediciones directas en la planta) tampoco mostraron diferencias entre los diferentes bloques o viñedos (Figura 29 del anexo).

Mis datos indican que el método OBE no modifica el estado de estrés hídrico de las plantas en comparación con el riego por goteo, por lo cual puede ser utilizado en viñedos para reducir el volumen de riego, sin modificar el estado hídrico de las plantas.

4.3 El impacto del sistema de riego en el fruto: total de gramos obtenidos y cantidad de azúcares disueltos en los frutos

En el rancho San Gabriel de Santo Tomás, se presentó al final del experimento un problema en los frutos por ataque de los hongos patógenos de la especie *Botrytis cinerea* (cenicilla). El Rancho San Gabriel fue el sitio que más agua utilizó y este factor pudo haber influido en la dispersión o brote de la enfermedad. Debido a este problema, la cosecha se realizó de manera urgente y no se pudo estimar la masa de frutos ni medir grados Brix, que reflejan la concentración de azúcares disueltos en el zumo.

Sin embargo, para el resto de los viñedos se pudo cuantificar la masa y concentración de azúcares entre tratamientos al interior de los viñedos. Encontré que no hubo diferencia entre tratamientos. Al no presentarse diferencias entre masa de frutos en la cosecha y grados Brix, podemos garantizar la efectividad del método de OBE para reducir el volumen de irrigación en el Valle de Guadalupe, sin modificar sustancialmente las propiedades del producto.

4.4 Recomendaciones de manejo. Uso potencial de irrigación por olla de barro enterrada en México en otros cultivos de zonas áridas

Mis datos indican que el uso de la OBE es una alternativa potencialmente adecuada para disminuir el volumen de riego en ambientes áridos y semi-áridos de México. La instalación de este tipo de infraestructura es relativamente fácil y el costo es competitivo respecto a otros tipos sistemas de riego (cerca de 70 pesos por olla para 2019). Esto implica que para un caso como el Rancho San Gabriel (Santo Tomás), se podría potencialmente ahorrar hasta 732 litros de agua por planta por temporada del brote a la cosecha, equivalentes a 1,910 metros cúbicos para un cuadrante de 2610 plantas. El costo aproximado de inversión en OBE sería aproximadamente 183,000 pesos, más la instalación de aditamentos para facilitar el riego automatizado. Calculando un flujo de 2 litros por hora, podría establecerse el llenado de las ollas en cinco horas, y la frecuencia de irrigación podría reducirse a una vez cada semana o cada diez

días, dependiendo de la temperatura y textura del suelo (en este estudio se encontró que, en el lapso de una semana, las OBE todavía contaban con agua hasta 30% del volumen total).

El método OBE además de ser recomendable para viñedos, se recomienda para riego de arbolado urbano. Por ejemplo, en el campus de CICESE se podrían regar casi la totalidad de los árboles del campus (cerca de 200), utilizando dos OBE por árbol, con una inversión cercana a los \$30,000, lo que reduciría el volumen de riego, facilitaría la tarea de los operarios y evitaría la mortalidad del arbolado urbano de alto costo económico y ambiental.

Por último, sugiero que este método se explore también en otro tipo de especies como ya se ha sugerido (Bainbridge, 2002). Consideramos que este método podría tener aplicaciones para el cultivo de almendra, granada, oliva, algarrobo, pistache, entre otros frutales de climas semi-áridos, incluso en plantaciones de especies no frutales como *Yucca schidigera*. De generarse un mayor mercado para las OBE, podría también mejorar sus procesos de producción y establecer a Tecate como un centro de industria de insumos agrícolas, reduciendo el volumen de agua empleado en la agricultura.

Capítulo 5. Conclusiones

- 1) El método de irrigación por Olla de Barro Enterrada (OBE) ofrece ahorros de hasta más de 50% de volumen de riego en comparación con el riego por goteo a lo largo de la temporada de brote a cosecha de la vid.
- 2) El OBE no modifica el estado hídrico de las plantas medido con el potencial hídrico y conductancia estomática en comparación con el riego por goteo.
- 3) El OBE no modifica la masa total de frutos ni la concentración de azúcares disueltos en el zumo (grados Brix) en comparación con el riego por goteo.
- 4) El OBE ofrece ahorros de más del 35 % del volumen de riego en arbolado urbano.
- 5) El OBE puede ser un método de aplicación masiva en las zonas áridas y semi-áridas si se mejoran sus procesos de producción.
- 6) El uso de OBE reduce sustancialmente el volumen de riego en agricultura, sin disminuir la productividad. Esta información puede aplicarse para poder alcanzar los objetivos de la Agenda 2030 de la ONU, específicamente los ODS 2 (hambre cero), 6 (agua y saneamiento), 11 (ciudades y comunidades sostenibles) y 12 (Producción y consumo responsable).

Literatura citada

- Abu-Zreig, M. M., Atoum, M. F. 2004. Hydraulic characteristics and seepage modelling of clay pitchers produced in Jordan. *Canadian Biosystems Engineering*, 15(1), 15–20.
- Abu-Zreig, Majed M., Abe, Y., Isoda, H. 2006. The auto-regulative capability of pitcher irrigation system. *Agricultural Water Management*, 85(3), 272–278. doi:<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2006.05.002>
- Abu-Zreig, Majed M., Zraiqat, A. M., Elbaset, M. A. 2018. Seepage Rate from Ceramic Pitchers under Positive and Negative Hydraulic Head. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 34, 4, 707–714.
- Acevedo-Opazo, C., Ortega-Farias, S., Fuentes, S. 2010. Effects of grapevine (*Vitis vinifera* L.) water status on water consumption, vegetative growth and grape quality: An irrigation scheduling application to achieve regulated deficit irrigation. *Agricultural Water Management*, 97(7), 956–964. doi:<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.01.025>
- Ansari, H., Naghedifar, M. R., Faridhosseini, A. 2015. Performance evaluation of drip, surface and pitcher irrigation systems: A case study of prevalent urban landscape plant species. *International Journal of Farming and Allied Sciences*, 4(8), 610–620.
- Arnó Satorra, J., Martínez Casanovas, J. A., Ribes Dasi, M., Rosell Polo, J. R. 2009. Precision viticulture. Research topics, challenges and opportunities in site-specific vineyard management. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 7(4), 779–790.
- Ayars, J. E., Phene, C. J., Hutmacher, R. B., Davis, K. R., Schoneman, R. A., Vail, S. S., Mead, R. M. 1999. Subsurface drip irrigation of row crops: a review of 15 years of research at the Water Management Research Laboratory. *Agricultural Water Management*, 42(1), 1–27. doi:[10.1016/S0378-3774\(99\)00025-6](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(99)00025-6)
- Baggiolini, M. 1952. Les stades repères dans le développement de la vigne et leur utilisation pratique, Station Féd. Essais Agric., Lausanne.
- Baillod, M., Baggiolini, M. 1993. Les stades repères de la vigne. *Rev. Suisse Vitic. Arboric. Hortic*, 25(1), 7–9.
- Bainbridge, D. A. 2001. Buried clay pot irrigation: a little known but very efficient traditional method of irrigation. *Agricultural Water Management*, 48(2), 79–88. doi:[https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(00\)00119-0](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(00)00119-0)
- Bainbridge, D. A. 2002. Alternative Irrigation Systems for Arid Land Restoration. *Ecological Restoration*, 20(1), 23–30. de <http://www.jstor.org/stable/43442520>
- Bainbridge, D. A. 2006. Super-efficient irrigation with buried clay pots. San Diego (CA): United States International University, Environmental Studies Program. Canelo Project.
- Bainbridge, D. A. 2015. Gardening with Less Water: Low-Tech, Low-Cost Techniques; Use up to 90% Less Water in Your Garden. Silver Nautilus Book Award Winner for Green Living & Sustainability.
- Bao, Y., Aggarwal, P., Robbins, N. E., Sturrock, C. J., Thompson, M. C., Tan, H. Q., Tham, C., Duan, L., Rodriguez, P. L., Vernoux, T., Mooney, S. J., Bennett, M. J., Dinneny, J. R. 2014. Plant roots use a patterning mechanism to position lateral root branches toward available water. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(25), 9319 LP – 9324.

- Bellvert, J., Marsal, J., Girona, J., Zarco-Tejada, P. J. 2015. Seasonal evolution of crop water stress index in grapevine varieties determined with high-resolution remote sensing thermal imagery. *Irrigation Science*, 33(2), 81–93. doi:10.1007/s00271-014-0456-y
- Bellvert, J., Marsal, J., Mata, M., Girona, J. 2012. Identifying irrigation zones across a 7.5-ha ‘Pinot noir’ vineyard based on the variability of vine water status and multispectral images. *Irrigation Science*, 30(6), 499–509. doi:10.1007/s00271-012-0380-y
- Bellvert, J., Zarco-Tejada, P. J., Girona, J., Fereres, E. 2014. Mapping crop water stress index in a ‘Pinot-noir’ vineyard: comparing ground measurements with thermal remote sensing imagery from an unmanned aerial vehicle. *Precision Agriculture*, 15(4), 361–376. doi:10.1007/s11119-013-9334-5
- Berni, J. A. J., Zarco-Tejada, P. J., Sepulcre-Cantó, G., Fereres, E., Villalobos, F. 2009. Mapping canopy conductance and CWSI in olive orchards using high resolution thermal remote sensing imagery. *Remote Sensing of Environment*, 113(11), 2380–2388. doi:https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.06.018
- Bhatt, N., Kanzariya, B. 2017. Experimental Investigations on Pitcher Irrigation: Yield Optimization and Wetting Front Advancement. *International Journal of Latest Technology in Engineering, Management & Applied Science (IJLTEMAS)*—ISSN-2278-2540, 6(6), 103–108.
- Bloesch, B., Viret, O. 2008. Stades phénologiques repères de la vigne. *Rev Suisse Vitic Arboric Hortic*, 40, 6–10.
- Bongiovanni, R., Lowenberg-Deboer, J. 2004. Precision Agriculture and Sustainability. *Precision Agriculture*, 5(4), 359–387. doi:10.1023/B:PRAG.0000040806.39604.aa
- Bruinsma, J. 2017. *World agriculture: towards 2015/2030: an FAO study*. Routledge.
- Campanhola, C., Faures, J. M., Eriksson, E., Steinfeld, H., Zoveda, F. 2015. Construyendo una visión común para la agricultura y alimentación sostenibles. En FAO, Documento de trabajo.
- Castroviejo, S. 2015. *Flora ibérica: plantas vasculares de la Península Ibérica e Islas Baleares. 9. Rhamnaceae - Polygalaceae (Vol. 9)*. Editorial CSIC-CSIC Press: Madrid.
- Chaerle, L., Van Der Straeten, D. 2000. Imaging techniques and the early detection of plant stress. *Trends in Plant Science*, 5(11), 495–501. doi:10.1016/S1360-1385(00)01781-7
- Chartuni Mantovani, E., Magdalena, C. 2014. *Manual de Agricultura de Precisión. Programa Cooperativo para el Desarrollo Tecnológico Agroalimentario y Agroindustrial del Cono Sur*. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). p. 176.
- CONAGUA. Comisión Nacional del Agua. 2013. El cambio climático impone el reto de proporcionar iguales o mejores servicios, pero sustentablemente. de gob.mx. consultado de: <https://www.gob.mx/conagua/prensa/el-cambio-climatico-impone-el-reto-de-proporcionar-iguales-o-mejores-servicios-pero-sustentablemente>
- CONAGUA. Comisión Nacional del Agua. 2015. *Estadísticas agrícolas de los distritos de riego. Año agrícola 2013-2014*. Comisión Nacional del Agua: México, DF.
- CONAGUA. Comisión Nacional del Agua. 2018. *Infraestructura hidráulica. Sistema Nacional de Información del Agua (SINA) - Estadísticas del Agua en México 2017*. Consultado el 20 de agosto de 2011, de gob.mx website: <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/infraestructura-hidroagricola>

- CONAGUA. 2015. Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Guadalupe (0207). Estado de Baja California. Diario Oficial de la Federación. p. 34.
- Council, N. R. 1997. Precision agriculture in the 21st century: Geospatial and information technologies in crop management. *Natl Academy Pr.* 76(3), 267-275.
- Dai, A. 2013. Increasing drought under global warming in observations and models. *Nature Climate Change*, 3, 52. de <https://doi.org/10.1038/nclimate1633>
- Daka, A. E. 1991. *Conservative Irrigation using Ceramic Pitchers as Ancillary Media for Water Conservation.* Greece Belkema Press.
- Eichhorn, K. W., Lorenz, D. H. 1977. Phanologische Entwicklungsstadien der Rebe. *Nachrichtenblatt des deutschen Pflanzenschutzdienstes.*
- FAO. 2017. Water in Agriculture. Consultado el 31 de julio de 2018, de 12 Julio website: <https://www.worldbank.org/en/topic/water-in-agriculture#1>
- FAO. 2018. Grape|Land & Water. Consultado el 19 de noviembre de 2018, de www.fao.org website: <http://www.fao.org/land-water/databases-and-software/crop-information/grape/en/>
- Fong, L. F. 2019. Efectos de factores topográficos sobre la profundidad de suelos y la estructura vertical de su textura, capacidad de campo y almacenes de carbono en el noroeste de Baja California. CICESE. Tesis de maestría. 65 pp.
- Gago, J., Douthe, C., Coopman, R. E., Gallego, P. P., Ribas-Carbo, M., Flexas, J., Escalona, J., Medrano, H. 2015. UAVs challenge to assess water stress for sustainable agriculture. *Agricultural Water Management*, 153, 9–19. doi:<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.01.020>
- Gebbers, R., Adamchuk, V. I. 2010. Precision Agriculture and Food Security. *Science*, 327(5967), 828 LP – 831. doi:[10.1126/science.1183899](https://doi.org/10.1126/science.1183899)
- Girona, J., Marsal, J., Mata, M., Del Campo, J., Basile, B. 2009. Phenological sensitivity of berry growth and composition of Tempranillo grapevines (*Vitis vinifera* L.) to water stress. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 15(3), 268–277. doi:[10.1111/j.1755-0238.2009.00059.x](https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2009.00059.x)
- Gonzalez-Dugo, V., Zarco-Tejada, P., Berni, J. A. J., Suárez, L., Goldhamer, D., Fereres, E. 2012. Almond tree canopy temperature reveals intra-crown variability that is water stress-dependent. *Agricultural and Forest Meteorology*, 154–155, 156–165. doi:<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.11.004>
- González Andrade, S. 2015. Cadena de valor económico del vino de Baja California, México . *Estudios fronterizos* , Vol. 16. scielomx . pp. 163–193.
- Goyal, M. R., Panigrahi, P. 2016. *Sustainable Micro Irrigation Design Systems for Agricultural Crops: Methods and Practices* (CRC Press, Apple Academic Press Inc, Taylor & Francis Group, Eds.). CRC Press: Oakville, Canada.
- Greenpeace. 2012. *La agricultura mexicana y el cambio climático.* Greenpeace pp. 31.
- Hidalgo, L. 2002. *Tratado de viticultura general.* Mundi-Prensa. Madrid. de <https://books.google.com.mx/books?id=FX-LE8Fri24C>
- Hitachi High-Technologies Corporation. 2001. Scanning Electron Microscope SU3500. Consultado el 10 de enero de 2019, de <https://www.hitachi->

hightech.com/global/science/products/microscopes/electron-microscope/sem/su3500.html

- INECC & SAGARPA. 2018. Atlas Nacional de Vulnerabilidad al Cambio Climático (ANVCC). Consultado el 18 de noviembre de 2018, de Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático website: <https://atlasvulnerabilidad.inecc.gob.mx/page/index.html#zoom=undefined&lat=23.5000&lon=-101.9000&layers=1>
- INEGI. 2017. Anuario estadístico y geográfico de Baja California 2017. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. p. 423.
- INEGI. 2018. Clima. Baja California. Consultado el 18 de noviembre de 2018, de gob.mx website: <http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/bc/territorio/clima.aspx?tema=me&e=02>
- Jacquemoud, S., Verhoef, W., Baret, F., Bacour, C., Zarco-Tejada, P. J., Asner, G. P., François, C. 2009. PROSPECT + SAIL models: A review of use for vegetation characterization. *Remote Sensing of Environment*, 113, S56–S66. doi:10.1016/J.RSE.2008.01.026
- Jagadeesan, P. 2011. Factors affecting food security and contribution of modern technologies in food sustainability. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 91(15), 2707–2714. doi:10.1002/jsfa.4666
- Jones, H. G. 2004. Irrigation scheduling: advantages and pitfalls of plant-based methods. *Journal of Experimental Botany*, 55(407), 2427–2436. de <http://dx.doi.org/10.1093/jxb/erh213>
- Jones, H. G., Vaughan, R. A. 2010. Remote sensing of vegetation: principles, techniques, and applications (First Edit). Oxford university press: NY.
- Lamm, F. R., Trooien, T. P. 2003. Subsurface drip irrigation for corn production: a review of 10 years of research in Kansas. *Irrigation Science*, 22(3), 195–200. doi:10.1007/s00271-003-0085-3
- Levidow, L., Zaccaria, D., Maia, R., Vivas, E., Todorovic, M., Scardigno, A. 2014. Improving water-efficient irrigation: Prospects and difficulties of innovative practices. *Agricultural Water Management*, 146, 84–94. doi:10.1016/J.AGWAT.2014.07.012
- Lorenz, D. H., Eichhorn, K. W., Bleiholder, H., Klose, R., Meier, U., Weber, E. 1995. Phenological growth stages of the grapevine, *Vitis vinifera* L. ssp. *vinifera*. Codes and descriptions according to the extended BBCH scale. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 1(2), 100–103.
- Lucero-Vega, G., Troyo-Diéguez, E., Murillo-Amador, B., Nieto-Garibay, A., Ruíz-Espinoza, F. H., Beltrán-Morañes, F. A., Zamora-Salgado, S. 2017. Diseño de un sistema de riego subterráneo para abatir la evaporación en suelo desnudo comparado con dos métodos convencionales. *Agrociencia*, Vol. 51. scielomx. pp. 487–505.
- Marino, S., Coccozza, C., Tognetti, R., Alvino, A. 2015. Use of proximal sensing and vegetation indexes to detect the inefficient spatial allocation of drip irrigation in a spot area of tomato field crop. *Precision Agriculture*, 16(6), 613–629. doi:10.1007/s11119-015-9396-7
- Martínez de Toda Fernández, F. 1991. *Biología de la vid: fundamentos biológicos de la viticultura*.
- Martínez, J., Reza, J. 2014. Water Use Efficiency of Surface Drip Irrigation versus an Alternative Subsurface Drip Irrigation Method. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 140(10), 4014030. doi:10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000745
- Matese, A., Di Gennaro, S. F. 2015. Technology in precision viticulture: A state of the art review.

International Journal of Wine Research, 7, 69–81.

- McBratney, A., Whelan, B., Ancev, T., Bouma, J. 2005. Future directions of precision agriculture. *Precision Agriculture*, 6(1), 7–23. doi:10.1007/s11119-005-0681-8
- McCarthy, M. G., Loveys, B. R., Dry, P. R., Stoll, M. 2002. Regulated deficit irrigation and partial rootzone drying as irrigation management techniques for grapevines. En *Deficit irrigation practices*.
- METER Group. 2019. SC-1 Leaf Porometer. de USA website: <https://www.metergroup.com/environment/products/sc-1-leaf-porometer/>
- Missouri Botanical Garden. 2018. *Vitis vinifera* - Plant Finder. Consultado el 12 de diciembre de 2018, de [Missouribotanicalgarden.org](http://www.missouribotanicalgarden.org) website: <http://www.missouribotanicalgarden.org/PlantFinder/PlantFinderDetails.aspx?taxonid=287551&isprofile=0&>
- Mondal, R. C. 1984. Pitcher farming techniques for use of saline waters. *Annual Report Central Soil and Salinity Research Institute (CSRRI)*, 1983, 18–19.
- Mullins, M. G., Bouquet, A., Williams, L. E. 1992. *Biology of the grapevine*. Cambridge University Press.
- Muñoz, A. R. B., Sánchez, M. D. V. 2018. Productividad en la Industria de la Uva y la eficiencia de los recursos disponibles en el Valle de Guadalupe, Baja California. *Semestre Económico*, 5(2).
- Nwogwu, N. A., Okereke, N. A. A., Ohanyere, S. O., Chikwue, M. I. 2018. A concise review of various soil moisture measurement techniques. En *The 3rd NIAE-SE Regional Conference, Nsukka, Nigeria, 2018*, pp. 613–624. Nsukka, Nigeria. pp. 613–624.
- Ojeda, M., Pire, R. 1996. Densidad de raíces en vid sometidas a diferentes láminas de riego por goteo. En *Proc. Interam. Soc. Trop. Hort*, 1996, 40, pp. 219–223. pp. 219–223.
- Ondrašek, G. 2019. Irrigation in Agroecosystems. *ItechOpen*. doi: 10.5772/intechopen.73607
- PECC. 2014. Programa especial de cambio climático 2014-2018. de http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5342492&fecha=28/04/2014
- Pereira, L. S., Oweis, T., Zairi, A. 2002. Irrigation management under water scarcity. *Agricultural Water Management*, 57(3), 175–206. doi:10.1016/S0378-3774(02)00075-6
- Peretz, J., Evans, R. G., Proebsting, E. L. 1984. Leaf water potentials for management of high frequency irrigation on apples. *Transactions of the ASAE*, 27(2), 437–442.
- Pérez-Harguindeguy, N., Díaz, S., Garnier, E., Lavorel, S., Poorter, H., Jaureguiberry, P., Bret-Harte, M. S., Cornwell, W. K., Craine, J. M., Gurvich, D. E., Urcelay, C., Veneklaas, E. J., Reich, P. B., Poorter, L., Wright, I. J., Ray, P., Enrico, L., Pausas, J. G., ... Cornelissen, J. H. C. 2016. *Corrigendum to: New handbook for standardised measurement of plant functional traits worldwide*. *Australian Journal of Botany*, 64(8), 715–716. de https://doi.org/10.1071/BT12225_CO
- Petrie, P. R., Cooley, N. M., Clingeleffer, P. R. 2004. The effect of post-veraison water deficit on yield components and maturation of irrigated Shiraz (*Vitis vinifera* L.) in the current and following season. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 10(3), 203–215. doi:10.1111/j.1755-0238.2004.tb00024.x
- Pierce, F. J., Nowak, P. 1999. Aspects of precision agriculture. En *Advances in agronomy* (Vol. 67). Elsevier.

pp. 1–85.

- PMS Instrument Company. 2019. Model 1505D Pressure Chamber Instrument. de Albany, OR, USA website: <https://www.pmsinstrument.com/products/model-1505d-pressure-chamber-instrument>
- Poblete-Echeverría, C., Ahumada-Orellana, L., Zuñiga, M., Sepulveda-Reyes, D., Ortega-Farias, S. 2019. Comparing water potential variables under different water stress levels: a case study on Carménère grapevines. En *Acta Horticulturae*, el 15 de octubre de 2019, International Society for Horticultural Science (ISHS), Leuven, Belgium, (1253), pp. 101–108. doi:10.17660/ActaHortic.2019.1253.14
- Pradhan, S. N., Anjum, M., Jena, P. 2018. Estimation of soil moisture content by remote sensing methods: A review. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 7(1S), 1786–1792.
- Robbins, N. E., Dinneny, J. R. 2015. The divining root: moisture-driven responses of roots at the micro- and macro-scale. *Journal of Scientific and Industrial Research (JSIR)*, 66(8), 2145–2154. de <http://dx.doi.org/10.1093/jxb/eru496>
- Robbins, N. E., Dinneny, J. R. 2017. Growth is required for perception of water availability to pattern root branches in plants. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 115(4), E822-E831.
- RStudio versión 3.4.4. 2015. RStudio. RStudio, Inc.,: Boston, MA.
- SAGARPA. 2017. Uva Mexicana. Planeación Agrícola Nacional 2017-2030. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA): Ciudad de México. p. 16.
- SAGARPA. 2018. Fomento a la Industria Vitivinícola, impulso y desarrollo del vino mexicano. de gob.mx website: <https://www.gob.mx/sagarpa/articulos/fomento-a-la-industria-vitivinicola-impulso-y-desarrollo-del-vino-mexicano?idiom=es>
- Santos, R., Méndez-Alonzo, R. 2018. Determinación de los ritmos circadianos del potencial hídrico y conductancia estomática en especies del chaparral y en *Vitis vinifera* Vitaceae. CICESE. Tesis de maestría. pp. 117.
- Scholander, P. F., Bradstreet, E. D., Hemmingsen, E. A., Hammel, H. T. 1965. Sap pressure in vascular Plants. *Science*, 148(3668), 339 LP – 346. doi:10.1126/science.148.3668.339
- Serra-Stepke, I. M., Carey, V. A. 2010. Sistema radical de la vid: importancia y principales factores que lo afectan. *Ciencia Ahora*.
- Shackel, K. A., Ahmadi, H., Biasi, W., Buchner, R., Goldhamer, D., Gurusinghe, S., Hasey, J., Kester, D., Krueger, B., Lampinen, B., McGourty, G., Micke, W., Mitcham, E., Olson, B., Pelletrau, K., Philips, H., Ramos, D., Schwankl, L., ... Yeager, J. 1997. Plant Water Status as an Index of Irrigation Need in Deciduous Fruit Trees. *HortTechnology*, 7(1), 23–29.
- Siyal, Altaf A., Van Genuchten, M. T., Kaggs, T. H. S. 2009. Performance of Pitcher Irrigation System. *Soil Science*, 174(6).
- Siyal, Altaf Ali, Siyal, A. G., Siyal, P., Solangi, M., Khatri, I. 2016. Pitcher Irrigation: Effect of pitcher wall properties on the size of soil wetting front. *Science International*, 28(2).
- SPA. 2016. Programa ambiental estratégico de la región vitivinícola de Valle de Guadalupe, Municipio de Ensenada, Baja California, México. Secretaría de Protección al Ambiente, Gobierno del Estado de Baja California. p. 326.

- Steduto, P., Hsiao, T. C., Fereres, E., Raes, D. 2012. Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua. Estudio FAO: Riego y Drenaje (FAO) spa no. 66.
- Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P. M. 2013. Climate Change 2013: the Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change 2013. <https://www.google.com/books>.
- Taiz, L., Zeiger, E. 1991. Water balance of the plant. *Plant Physiology*, 97–98.
- Taiz, L., Zeiger, E. 2002. Photosynthesis: the light reactions. *Plant physiology*. Sinauer Associates, 134–135.
- Tesfaye, T., Tesfaye, K., Woldetsadik, K. 2012. Clay pot irrigation for tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill) production in the north east semiarid region of Ethiopia. *Journal of Agriculture and Rural Development in the Tropics and Subtropics (JARTS)*, 112(1), 11–18.
- Trewavas, A. 2008. The cult of the amateur in agriculture threatens food security. *Trends in Biotechnology*, 26(9), 475–478. doi:10.1016/J.TIBTECH.2008.06.002
- Tripathi, S. K., Sharma, B., Meena, S. K. 2017. Pitcher Irrigation System: A Water Saving Approach. *Indian Farmer*, 4(8), 696–699.
- Williams, L E, Baeza, P., Vaughn, P. 2012. Midday measurements of leaf water potential and stomatal conductance are highly correlated with daily water use of Thompson Seedless grapevines. *Irrigation Science*, 30(3), 201–212. doi:10.1007/s00271-011-0276-2
- Williams, L E, Matthews, M. A. 1990. Grapevine. In *Irrigation of agricultural crops*. Agronomy monographs no. 30.(Eds BJ Stewart and DR Nielsen) pp. 1019–1055. ASA-CSSA-SSSA: Madison, WI.
- Williams, Larry E. 2000. Grapevine water relations. *Raisin production manual*.(Ed. LP Christensen) pp, 121–126.
- Williams, Larry E. 2002. Irrigation of grapevines in California. *Prog. Agric. Viticole*, 119, 37–46.
- Zarco-Tejada, P. J., González-Dugo, V., Berni, J. A. J. 2012. Fluorescence, temperature and narrow-band indices acquired from a UAV platform for water stress detection using a micro-hyperspectral imager and a thermal camera. *Remote Sensing of Environment*, 117, 322–337. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.10.007>
- Zhang, C., Kovacs, J. M. 2012. The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: a review. *Precision Agriculture*, 13(6), 693–712. doi:10.1007/s11119-012-9274-5
- Zúñiga, C. E., Khot, L. R., Jacoby, P., Sankaran, S. 2016. Remote sensing based water-use efficiency evaluation in sub-surface irrigated wine grape vines. 2016, 9866, pp. 986600-9866–9867. de <https://doi.org/10.1117/12.2228791>

ANEXOS

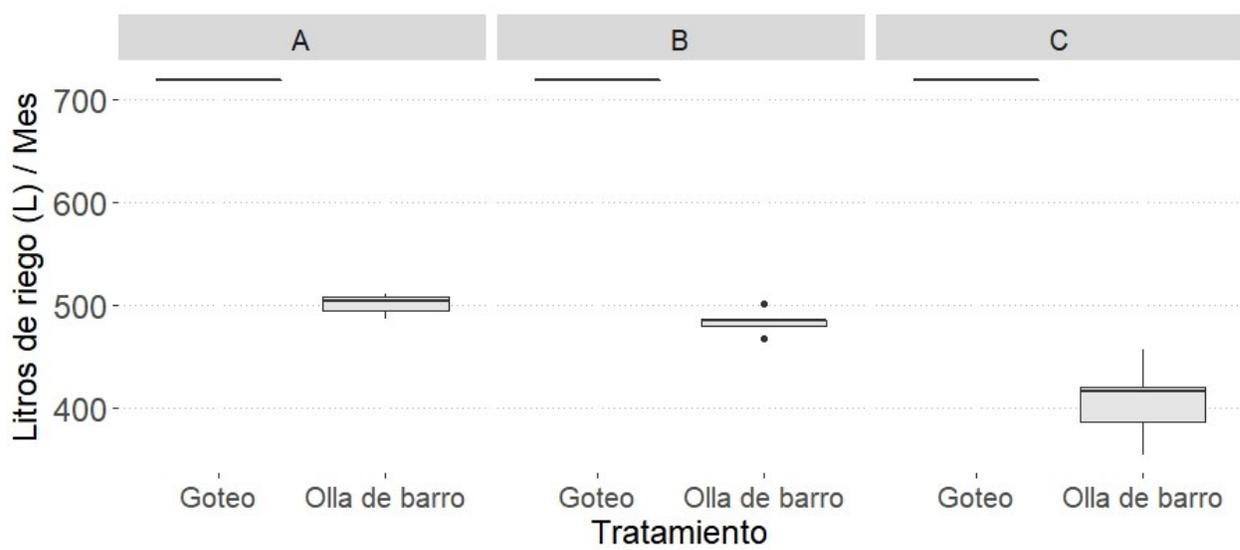


Figura 21. Diagrama de cajas y bigotes del riego por bloques en Monte Xanic. Cada letra representa un bloque.

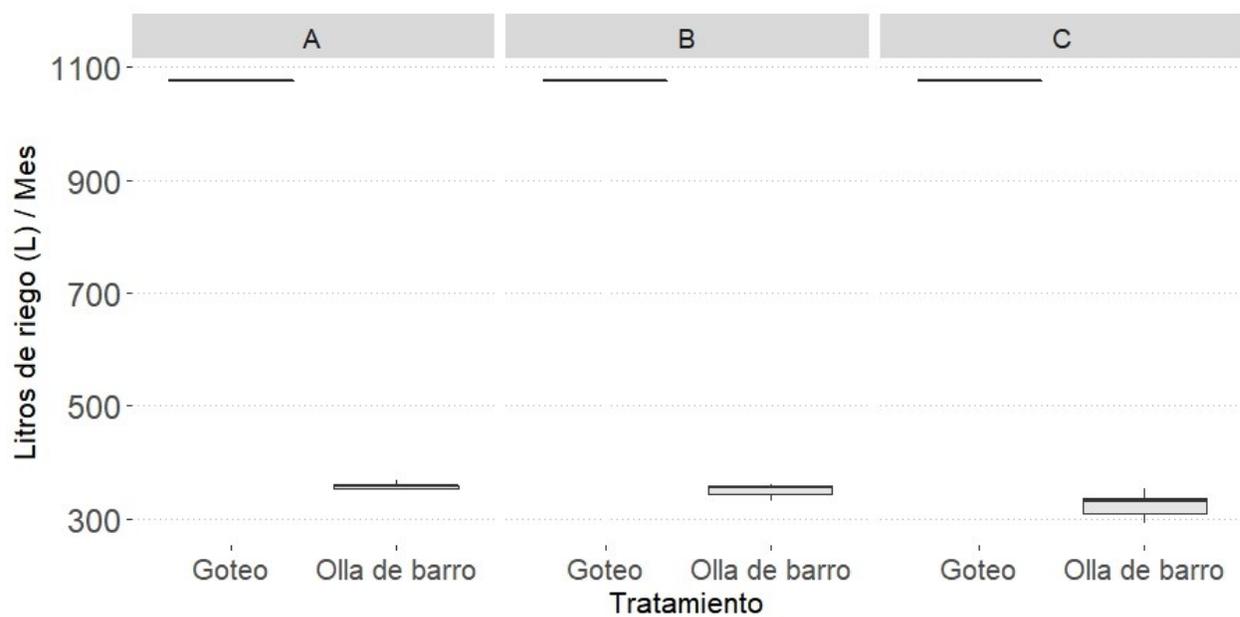


Figura 22. Diagrama de cajas y bigotes del riego por bloques en Santo Tomás. Cada letra representa un bloque.

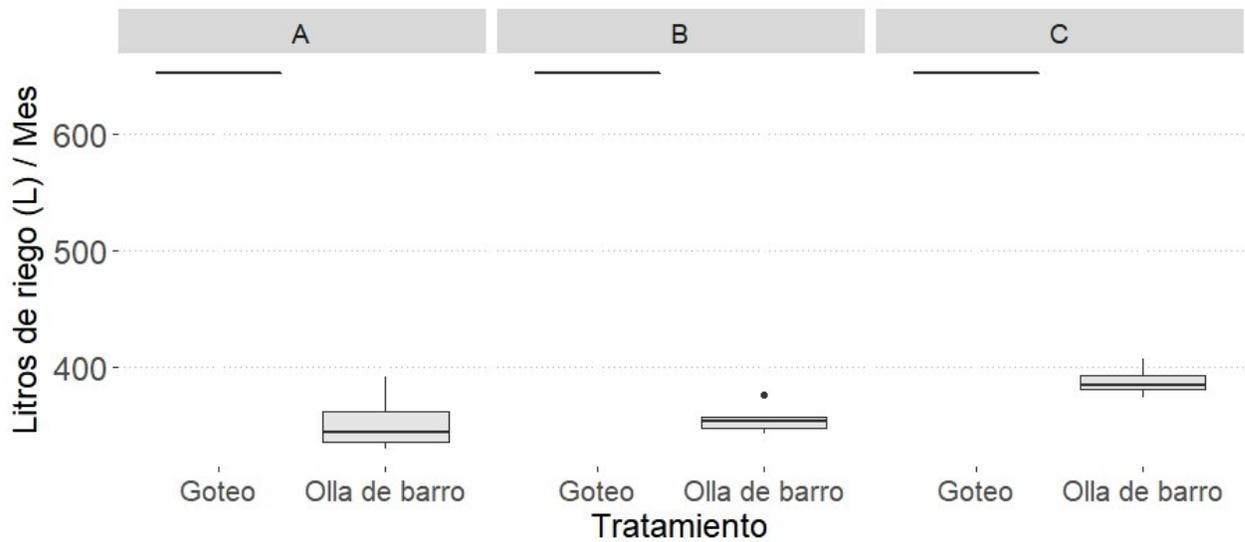


Figura 23. Diagrama de cajas y bigotes del riego por bloques en Mogor-Badán. Cada letra representa un bloque.

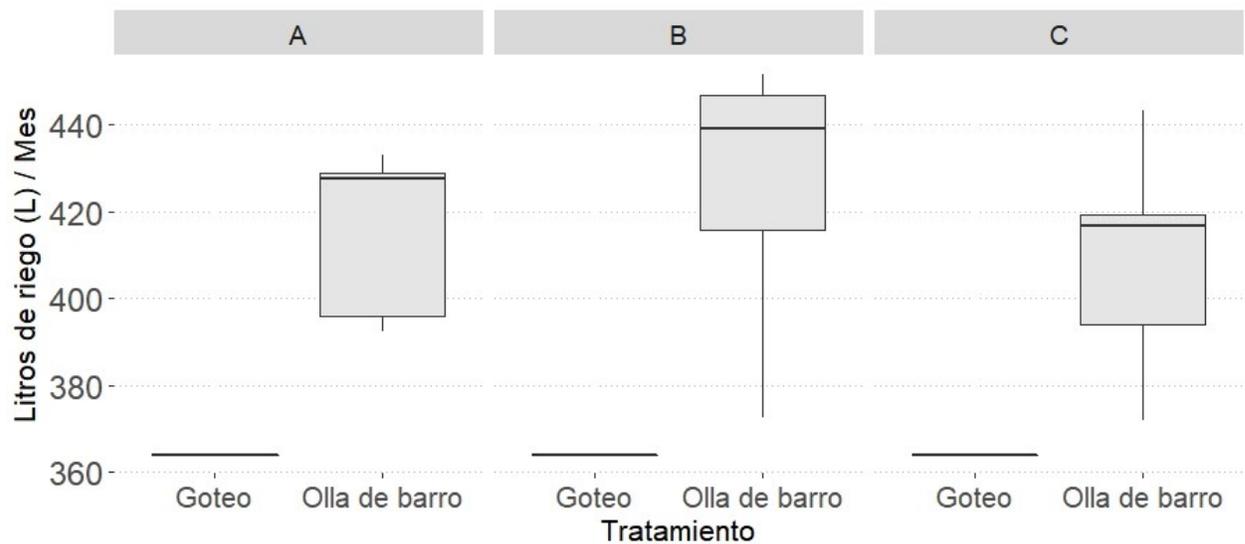


Figura 24. Diagrama de cajas y bigotes del riego por bloques en Tres Mujeres. Cada letra representa un bloque.

Tabla 7. Volumen de riego por planta por mes cuantificado en cuatro viñedos del Valle de Guadalupe, Baja California, México. Litros por mes corresponden a la lectura del medidor de cada sitio dividido entre el total de plantas por mes, litros totales es la sumatoria de las lecturas por los meses de estudio (abril a septiembre 2019). A = Viñedo Tres Mujeres, B = Viñedo Mogor-Badán, C = Rancho San Gabriel (Viñedos Santo Tomás), D = Viñedos Monte Xanic.

Sitio	N	Litros por mes	Litros totales
A	15	60.7	364
B	15	108.7	652
C	15	179.3	1075
D	10	120	720

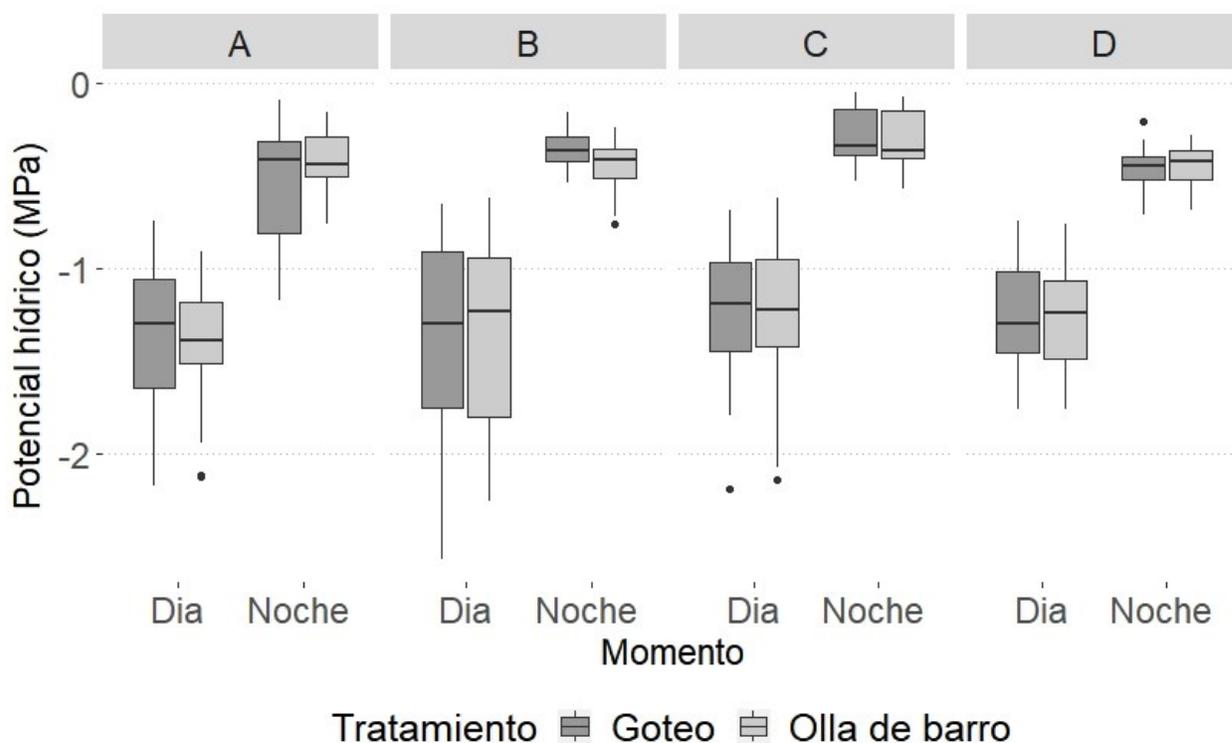


Figura 25. Diagrama de cajas y bigotes del potencial hídrico en el día y en la noche para cada viñedo. A = Viñedo Tres Mujeres, B = Viñedo Mogor-Badán, C = Rancho San Gabriel (Viñedos Santo Tomás), D = Viñedos Monte Xanic.

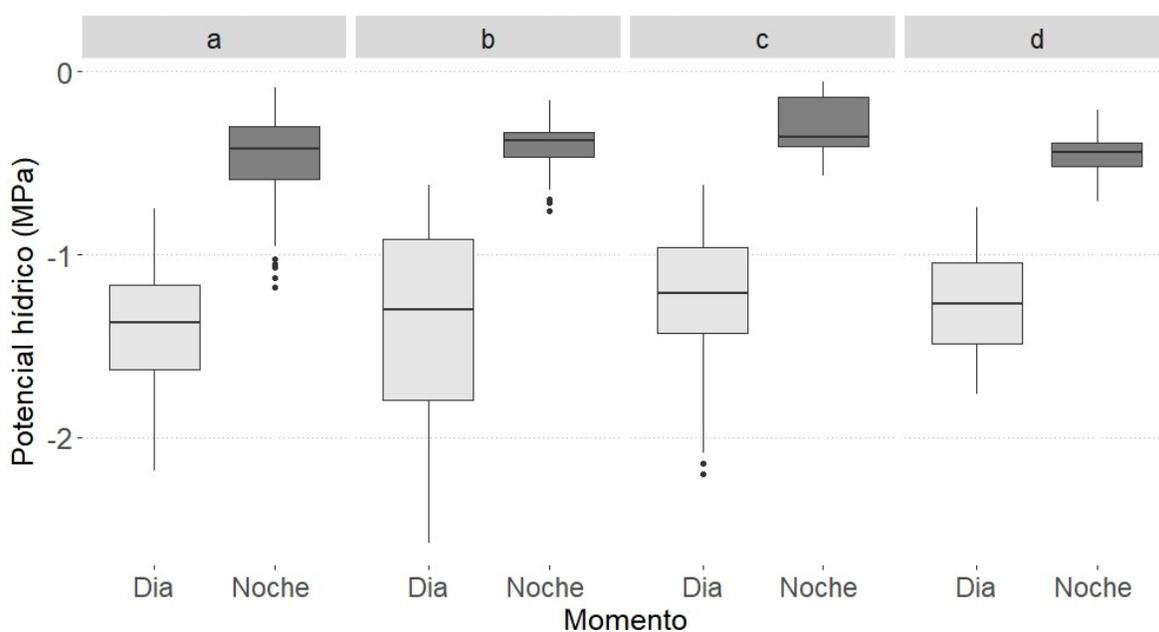


Figura 26. Diagrama de cajas y bigotes del potencial hídrico en el día y en la noche para todos los viñedos con olla de barro y con goteo juntos. A = Viñedo Tres Mujeres, B = Viñedo Mogor-Badán, C = Rancho San Gabriel (Viñedos Santo Tomás), D = Viñedos Monte Xanic.

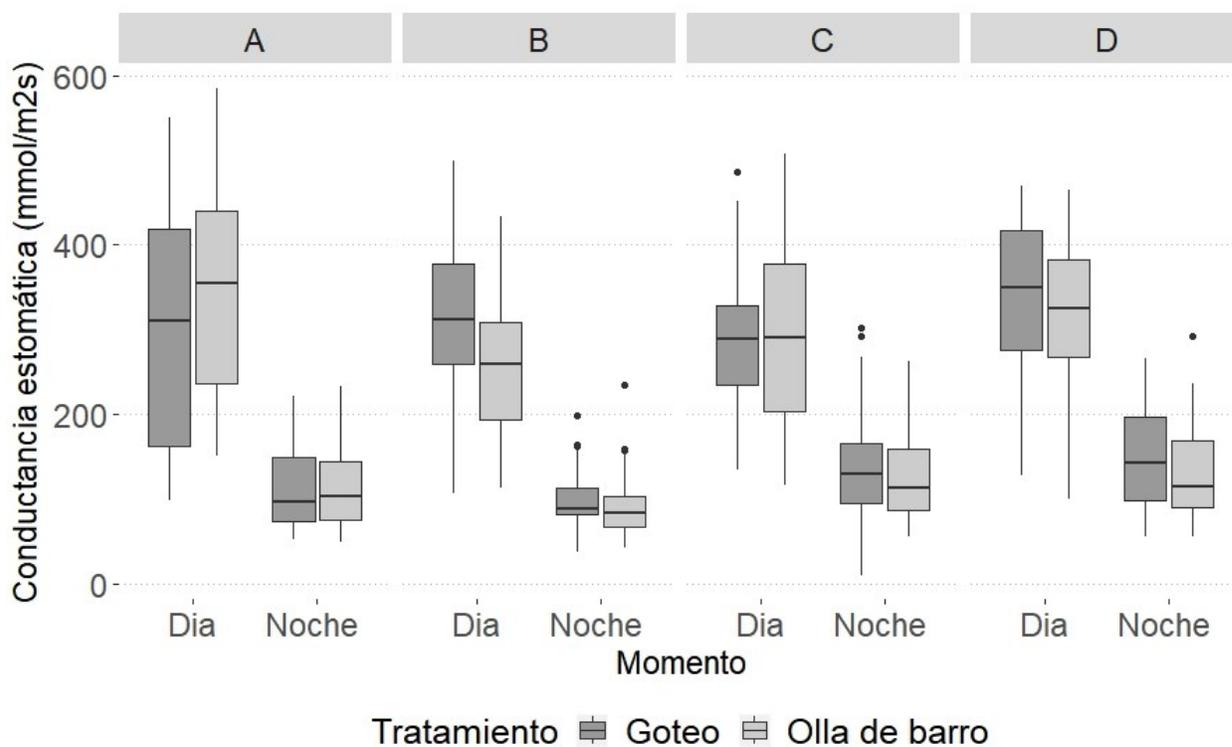


Figura 27. Boxplot de la conductancia estomática obtenida para cada viñedo. A = Viñedo Tres Mujeres, B = Viñedo Mogor-Badán, C = Rancho San Gabriel (Viñedos Santo Tomás), D = Viñedos Monte Xanic.

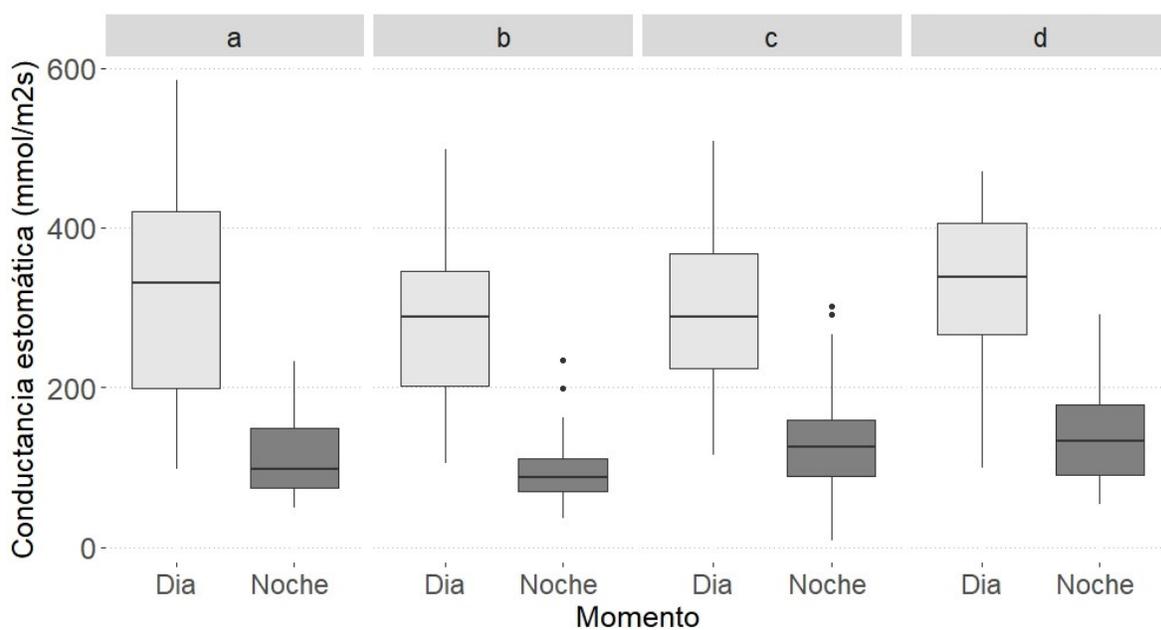


Figura 28. Boxplot de la conductancia estomática obtenida para todos los viñedos con olla de barro y con goteo juntos. A = Viñedo Tres Mujeres, B = Viñedo Mogor-Badán, C = Rancho San Gabriel (Viñedos Santo Tomás), D = Viñedos Monte Xanic.

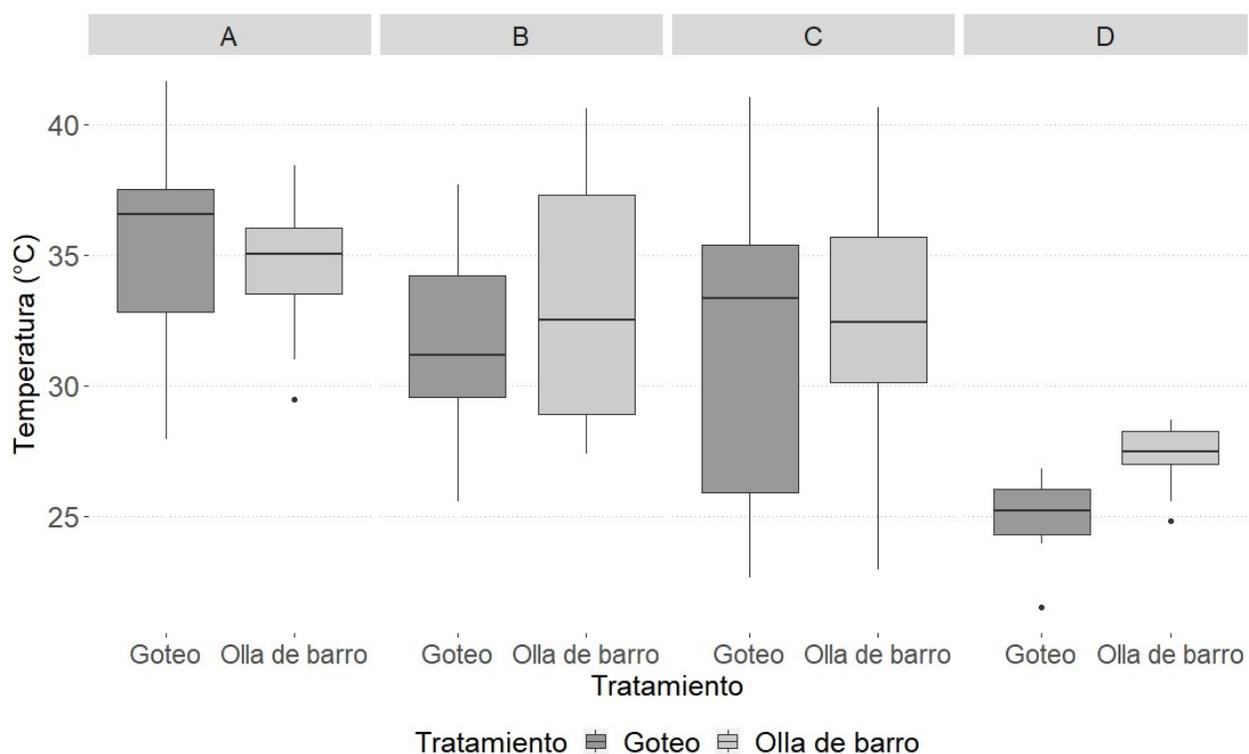


Figura 29. Boxplot de la temperatura obtenida a partir de percepción remotapara todos los viñedos con olla de barro y con goteo juntos. A = Viñedo Tres Mujeres, B = Viñedo Mogor-Badán, C = Rancho San Gabriel (Viñedos Santo Tomás), D = Viñedos Monte Xanic

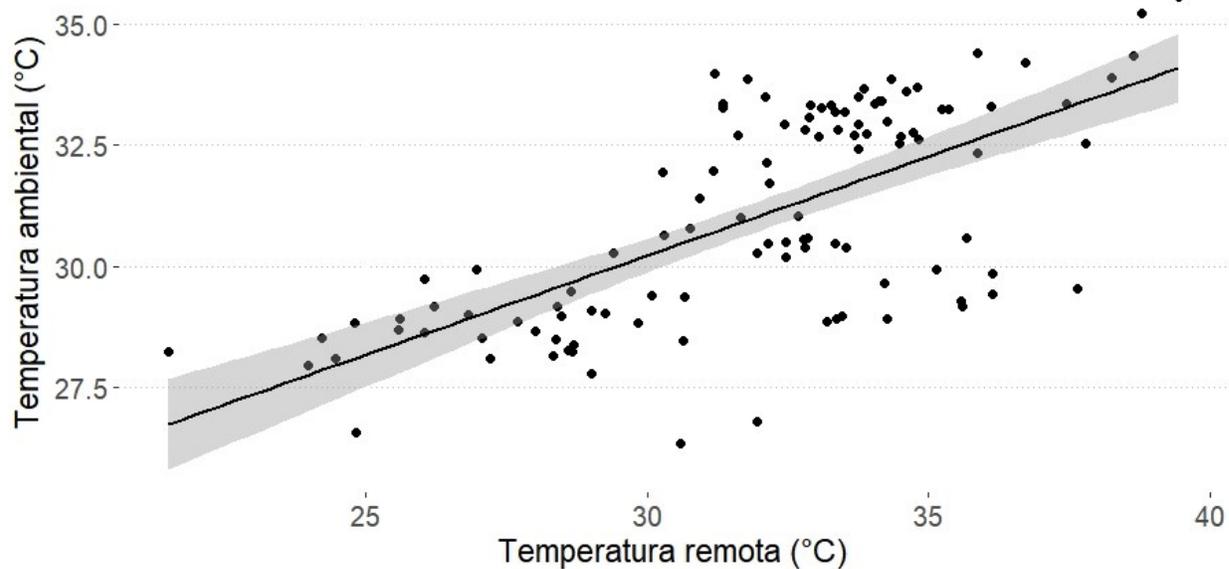


Figura 30. Correlación de las temperaturas ambientales obtenidas en campo y de las temperaturas obtenidas por cámara térmica en cada planta individualmente.

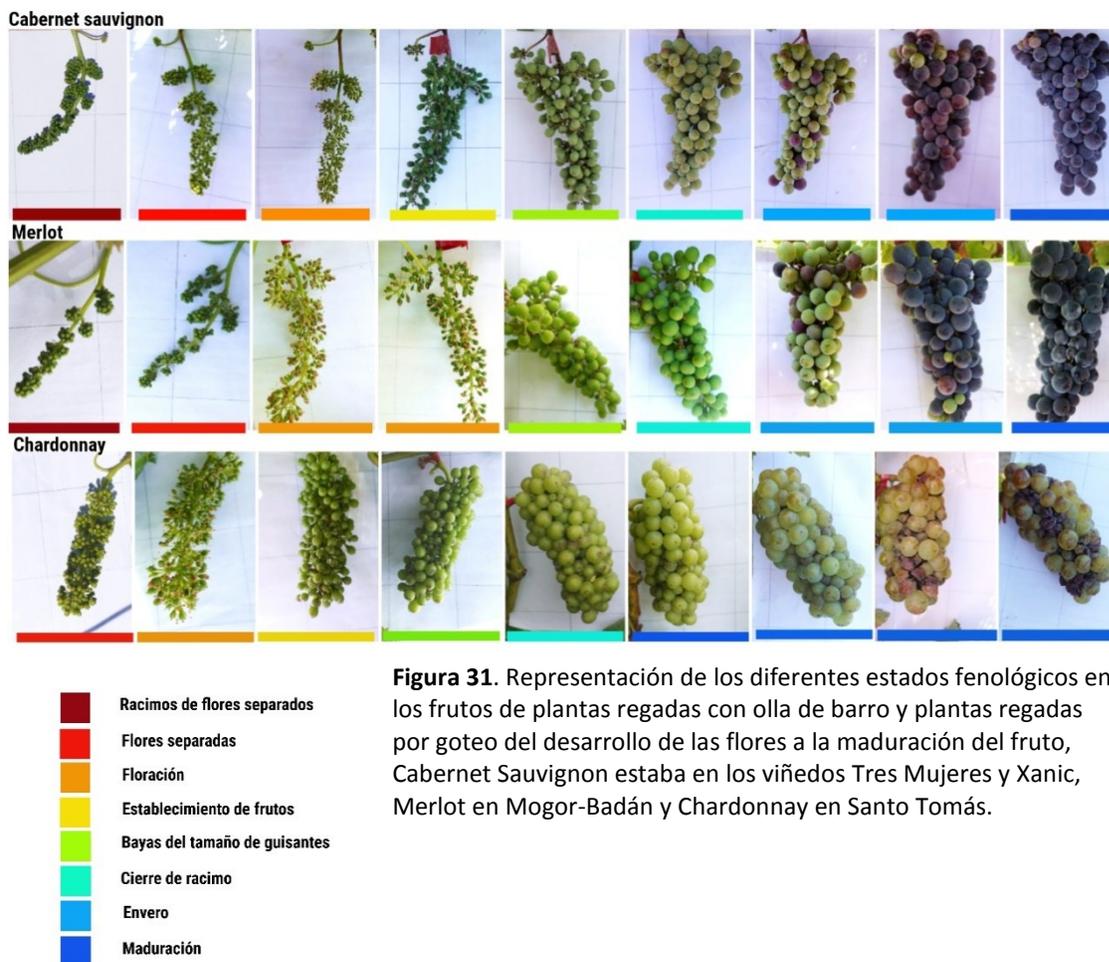


Figura 31. Representación de los diferentes estados fenológicos en los frutos de plantas regadas con olla de barro y plantas regadas por goteo del desarrollo de las flores a la maduración del fruto, Cabernet Sauvignon estaba en los viñedos Tres Mujeres y Xanic, Merlot en Mogor-Badán y Chardonnay en Santo Tomás.

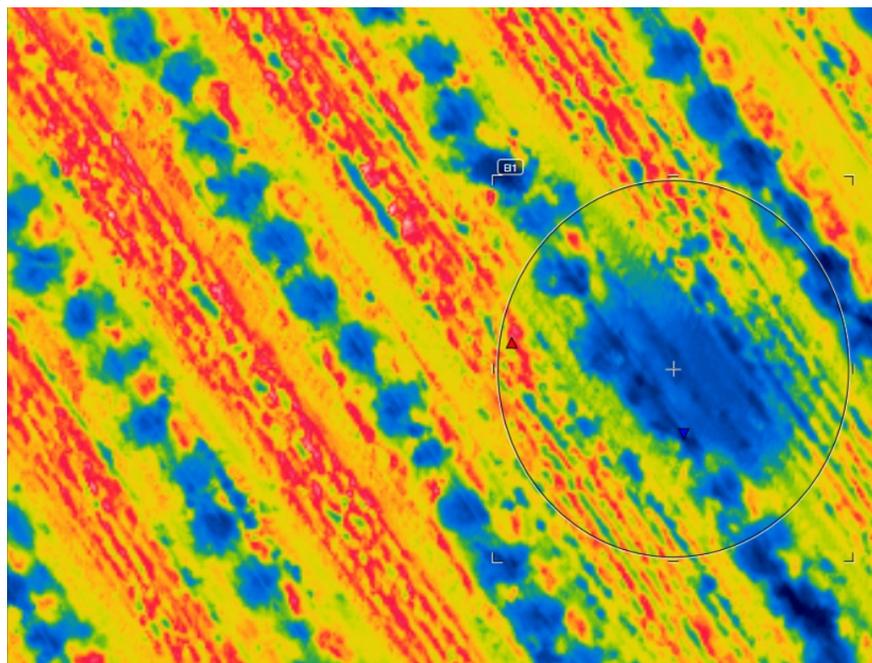


Figura 32. Fotografía térmica obtenida con percepción remota (Mayo de 2019). En el círculo se muestra una fuga de agua.