

Influencia del suelo y cambio climático estimado para el periodo 2070-2100 en la variedad Tempranillo en Rioja



TESIS DOCTORAL

Urtzi Leibar Palacios

Pamplona-Iruña, 2017

Memoria de
Tesis Doctoral
presentada por
D. Urtzi Leibar Palacios
para optar el grado de
Doctor

Influencia del suelo y cambio climático estimado para el periodo 2070-2100 en la variedad Tempranillo en Rioja

Directoras:

Dra. Olatz Unamunzaga Galarza, NEIKER-TECNALIA

Dra. Ana Aizpurua Insausti, NEIKER-TECNALIA

Tutor:

Dr. Cesar Arrese-Igor Sánchez

Pamplona-Iruña, 2017

MIEMBROS DEL TRIBUNAL

Presidente

Dra. María Concepción Ramos Martín

Departamento de Medio Ambiente y Ciencias del Suelo
Universitat de Lleida

Vocal

Dr. Enrique García-Escudero Domínguez

Servicio de Investigación Vitivinícola
Instituto de Ciencias de la Vid y del Vino (ICVV)

Secretario

Dr. Iñigo Virto Quecedo

Departamento de Ciencias del Medio Natural
Universidad Pública de Navarra

Suplente

Dr. Gerardo Besga Salazar

Director Tecnológico
Neiker-Tecnalia

Revisores externos

Dra. María Asunción Usón Murillo

Departamento de Ciencias Agrarias y del Medio Natural
Universidad de Zaragoza

Dr. Fernando Martínez de Toda

Departamento de Agricultura y Alimentación
Universidad de la Rioja

Suplente

Dra. Eva Pilar Pérez Álvarez

Servicio de Investigación Vitivinícola
Instituto de Ciencias de la Vid y del Vino (ICVV)

Dra. ANA AIZPURUA INSAUSTI,

Dra. OLATZ UNAMUNZAGA GALARZA,

INFORMAN:

que la presente memoria de Tesis Doctoral titulada “**Influencia del suelo y cambio climático estimado para el periodo 2070-2100 en la variedad Tempranillo en Rioja**” elaborada por D. **URTZI LEIBAR PALACIOS** ha sido realizada bajo nuestra dirección, y que cumple las condiciones exigidas por la legislación vigente para optar al grado de Doctor.

Y para que así conste, firman la presente en Pamplona a 6 de Abril de 2017,

Fdo. Dra. Ana Aizpurua Insausti

Fdo. Dra. Olatz Unamunzaga Galarza

La presente Tesis Doctoral está organizada según el modelo sugerido por la Comisión de Doctorado del Departamento de Ciencias del Medio Natural de la Universidad Pública de Navarra. De esta manera, los resultados obtenidos durante la realización de la misma se agrupan en capítulos, que se corresponden con los artículos científicos en los que se han desarrollado los objetivos planteados.

Así, cada capítulo contiene su propio resumen, una introducción específica, la descripción de los materiales y métodos utilizados, los resultados obtenidos, la discusión de los mismos y, por último, la bibliografía que le corresponde. Por lo tanto, cada capítulo agrupa la información necesaria relacionada al tema que en él se desarrolla permitiendo su lectura de manera independiente al resto de los capítulos.

Este documento incluye además distintos apartados con: (i) un resumen en euskara, castellano e inglés; (ii) una introducción general donde se justifica la elaboración de esta Tesis Doctoral, y los objetivos planteados; (iii); un compendio de cuatro artículos; (iv) una discusión general de los resultados obtenidos y posibles medidas de adaptación al cambio climático; y (v) las conclusiones finales obtenidas durante el presente trabajo de investigación.

ARTÍCULOS CIENTÍFICOS

Esta Tesis es un compendio de trabajos publicados o en revisión cuyas referencias se detallan a continuación:

-Leibar U., Unamunzaga O., Fernández M.J., Galindo P., Castro C., Aizpurua A. 2017. Soil type and climatic zone influence on must quality in a winegrower's cooperative of Rioja appellation. Enviado a *Oeno One – Vine and Wine Open Access Journal*.

La información que se detalla a continuación corresponde al nombre antiguo de la revista (Journal international des sciences de la vigne et du vin), porque la revista actual *Oeno One* no dispone aún de datos.

Categoría JCR: Horticulture

Clasificación en la categoría: 16 de 34

Cuartil en la categoría: Q2

Impact Factor 2015: 0.695

-Leibar U., Aizpurua A., Unamunzaga O., Pascual I., Morales F. 2015. How will climate change influence grapevine cv. Tempranillo photosynthesis under different soil textures? *Photosynthesis Research* 124: 199–215.

Categoría JCR: Plant Sciences

Clasificación en la categoría: 19 de 209

Cuartil en la categoría: Q1

Impact Factor 2015: 4.122

-Leibar U., Pascual I., Morales F., Aizpurua A., Unamunzaga O. 2016. Grape yield and quality responses to simulated year 2100 expected climatic conditions under different soil textures. *Journal of the Science of Food and Agriculture* DOI: 10.1002/jsfa.8086

Categoría JCR: Agriculture, Multidisciplinary

Clasif. categoría: 6 de 57

Cuartil en la categoría: Q1

Impact Factor 2015: 2.076

-Leibar U., Pascual I., Aizpurua A., Morales F., Unamunzaga O. 2017. Grapevine nutritional status and K concentration of must under future expected climatic conditions and different soils. Enviado a *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*.

Categoría JCR: Soil Science

Clasificación en la categoría: 18 de 34

Cuartil en la categoría: Q3

Impact Factor 2015: 1.600

COMUNICACIONES PRESENTADAS A CONGRESOS

-Comunicación Oral: 4th International Congress EUROSIL 2012, Bari | Italia | 2-6 Julio 2012.



S10.02 -1

INFLUENCE OF THE SOIL TYPE ON THE MUST QUALITY IN A VINEYARD OF THE D.O.CA RIOJA

Leibar Urtzi^[1], Aizpurua Ana^[1], PÉrez-Parmo Roberto^[1], Castro Cesar^[2], Unamunzaga Olatz^[1]

^[1]NEIKER ~ ENVIRONMENTAL QUALITY ~ Derio ~ Spain ^[2]BODEGAS Y VIÑEDOS LABASTIDA ~ I+D ~ Labastida ~ Spain

The influence of the soil on vine behaviour and wine quality is complex, because the soil properties affect vine mineral nutrition and water uptake conditions, but also rooting depth and temperature in the root zone. The aim of this study was to analyze the quality of the must in different soil groups determined by the winery. The study was carried out in 2009 and 2010 on the vineyards of the winery Bodegas y Viñedos Labastida which covers an area of 525 ha. Prior to this study the winery had classified soils in four groups (based on a soil map of the zone) depending on their yield and quality behaviour of the vineyard over time, which differs mainly in the soil's water holding capacity. In the years 2009 and 2010 at 300 and 270 grape samples respectively the following quality parameters were measured: weight of 100 berries, malic acid, tartaric acid, pH, K, anthocyanins and colour intensity. Statistical analysis was performed using a HJ-Biplot. Different types of soil did not show the same qualitative behaviour of the must. Furthermore, it can be differentiated soils with lower water holding capacities since they presented musts with higher alcohol and tonality and higher anthocyanin content, from soils with higher water holding capacities which presented musts with higher levels of malic acid.

-Comunicación Oral: European Geosciences Union General Assembly 2014, Viena | Austria | 27 Abril–02 Mayo 2014.

Geophysical Research Abstracts
Vol. 16, EGU2014-780, 2014
EGU General Assembly 2014
© Author(s) 2013. CC Attribution 3.0 License.



How will climate change affect vine behaviour in different soils?

URTZI LEIBAR (1), ANA AIZPURUA (1), FERMIN MORALES (2,3), INMACULADA PASCUAL (2), and OLATZ UNAMUNZAGA (1)

(1) Environment Quality Department, Neiker-Tecnalia. Bizkaia Technological Park. 812. Berreaga St.1. E-48160, Derio, Bizkaia, Spain., (2) Plant Stress Physiology Group (Environmental Biology Department), Associated Unit to CSIC, EEAD, Zaragoza and ICVV, Logroño. Faculties of Sciences and Pharmacy, Universidad de Navarra, Irunlarrea 1, E-31008, Pamplona, Navarra, Spain., (3) Plant Nutrition Department, Estación Experimental de Aula Dei (EEAD), Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), Apdo. 13034, E-50080, Zaragoza, Spain.

Various agricultural sectors are sensitive to projected climate change. In this sense, the strong link between climate and grapevine phenology and berry quality suggests a relevant impact. Within the concept of terroir, climate is a factor that influences ripening of a specific variety and resulting wine style. Furthermore, the effect of soil on grape potential is complex, because the soil acts on grapevine water and nutrient supply, and influences root zone temperature.

The aim of this work was to evaluate the effect of climate change (increased CO₂, higher temperature and lower relative humidity), soil texture and irrigation on the physiology, yield and berry quality of grapevine (*Vitis vinifera* L.) cv. Tempranillo.

A greenhouse experiment was carried out with potted, own-rooted fruit-bearing cuttings. Three factors were studied: a) climate change (700 μmol CO₂ mol⁻¹ air, 28/18°C and 45/65% day/night relative humidity) vs. current conditions (375 μmol CO₂ mol⁻¹ air, 24/14°C and 33/53% day/night relative humidity), b) soil texture (9, 18 and 36% soil clay content) and c) irrigation; well-irrigated (20-35% of soil water content) vs. water deficit (60% of the water applied to the irrigated plants). Berries were harvested at ripeness (21-23 °Brix).

-Press Conference: European Geosciences Union General Assembly 2014, Viena | Austria | 27 Abril–02 Mayo 2014.

THE UNUSUAL SUSPECTS – APPLYING GEOSCIENCE TO CROPS, COFFEE, FORENSICS AND WINE
Thursday, 1 May, 10:00

From the sustainable management of Earth's resources to the monitoring of volcanoes and landslides, the geosciences have made important contributions to society. But Earth science applications are far more wide-reaching. In this press conference, researchers will present results highlighting how the study of isotopes in human hair can further investigations of murder cases, and will report on the effects of climate change on grape quality and vine behaviour. Other panelists will explain how biochar made from coffee residues can absorb soil pollutants and how computer games can help map croplands around the globe, essential to improving estimates of future food availability.

Participants:

Jim Ehleringer

Director, Stable Isotope Ratio Facility for Environmental Research, University of Utah, Salt Lake City, US

Urtzi Leibar

Researcher, Environment Quality Department, Neiker-Tecnalia, Derio, Spain

Kalliopi N. Fotopoulou [may be replaced by co-author Hrisi Karapanagioti]

Researcher, Department of Chemistry, University of Patras, Greece

Steffen Fritz

Group Leader, Earth Observation Systems, Ecosystems Services and Management, International Institute for Applied Systems Analysis, Vienna, Austria

Related scientific sessions: [SSS0.3](#), [IG1](#), [SSS9.8](#), [ESS11.8/EOS6](#)

-Comunicación Oral: ClimWine 2016. Sustainable grape and wine production in the context of climate change, Burdeos | Francia | 10–13 Abril 2016.

Session2, oral 12

Grapevine nutritional status under different soils and future expected climate conditions

U. Leibar^{1,4}, I. Pascual², F. Morales^{2,3}, O. Unamunzaga¹ and A. Aizpurua¹

¹Neiker-Tecnalia, Environment Quality Department, Bizkaia Technological Park, 812, Derio, Bizkaia, Spain

²Universidad de Navarra, Plant Stress Physiology Group (Environmental Biology Department), Associated Unit to CSIC, EEAD, Zaragoza and ICVV, Logroño, Faculty of Sciences and Pharmacy, Iruñlarrea 1, Pamplona, Spain

³Department of Plant Nutrition, Aula Dei Experimental Station, CSIC, PO Box 13034, Zaragoza, Spain

Nutrition is a relevant issue for winegrape growers because it influences grapevine growth, berry composition, as well as must and wine quality. In this work, we studied the effect of simulated year 2100 expected climate conditions (CC; 700 ppm CO₂, 28/18°C, day/night and 33/53% relative humidity, day/night) versus current conditions (Curr; 390 ppm CO₂, 24/14°C and 45/65% relative humidity) on the nutritional status of grapevine (*Vitis vinifera* L. cv. Tempranillo) fruit-bearing cuttings, grown under two water availabilities (well-irrigated vs. water deficit) and three soil textures (41, 19 and 8% of soil clay content). Plants grown under CC had lower Ca and N concentration in leaf blades than those grown under Curr at veraison and lower Zn and N at full maturity. Such result was associated with an increased number of leaves, although there was not a dilution effect due to a greater leaf biomass production. Leaf blades from droughted plants had higher Na and Mn concentration at veraison and full maturity, respectively, compared with those well-irrigated, mainly due to a dilution effect in well-irrigated plants. Well-irrigated plants showed lower concentration of Mn and Fe, only under CC. Calcium and Mn showed higher concentrations in more clayey soils at full maturity. Potassium concentration was higher in leaf blades of well-watered-plants in comparison to those of water-stressed plants because of a higher K mobility in moist soils, these differences being only significant at full maturity. Results suggest a moderate influence of climate change, water availability and soil texture on leaf nutrient content of grapevines.

Abbreviations: T – temperature; RH - relative humidity; CC - simulated year 2100 expected climate conditions; Curr - current conditions; WA - water availability; WI - well-irrigated; WD - water deficit; ST - soil texture; CEC - cation exchange capacity.

Acknowledgements: We thank Department of Economic Development and Competitiveness of the Basque Government and Aragón Government (A03 research group) for financial support. Urtzi Leibar was the recipient of a grant from "Fundación Cándido Iruñaga y María Doñabaitia". Authors thank A. Urdain and M. Oyarzun (University of Navarre) for excellent technical assistance and Institute of Sciences of Vine and Wine (Logroño, La Rioja, Spain) for dormant cuttings supply.

-Próxima Comunicación Oral: Ampelos 2017. 4th International Symposium Ampelos. Mediterranean Vineyards and Climate Change, Santorini | Grecia | 12–14 Mayo 2017.

Esiker onak/Agradecimientos

Tras un largo camino lleno de muchos momentos buenos y algunos un poco más difíciles, esta Tesis ha llegado a su fin. Por ello, debo agradecer a todas las personas que han participado en ella, por su apoyo, sacrificio, esfuerzo y comprensión. Eskerrak eman nahi dizkizuet lan honetan lagundu nauzuen guztioi. Zuengatik ez balitz ez bainuke sekula bukatuko!

En primer lugar deseo expresar mi más sincero agradecimiento a mis directoras de Tesis Dra. Olatz Unamunzaga Galarza y Dra. Ana Aizpurua Insausti por haber confiado en mí y aceptar la dirección de este trabajo y por tantas horas de dedicación, por tantos consejos, ayuda y apoyo ofrecido, mostrando una paciencia infinita y en cada momento una inmejorable disposición. Agradezco la posibilidad que me ha dado la Beca Fundación Cándido Iturriaga y María Dañobeitia que ha hecho posible todo este trabajo.

Como no, a todos los compañeros y compañeras de Neiker: Roberto, Fer, Mikel, Gorka, Luis, Oier, Maialen I, Maialen V, Ania, Jon K, Ion U, Berdaitz, Asier, Julen, Enaitz, Iker, Aritz, Cristina, Maite, Lur E, Lur M...por haber hecho de estos años una experiencia muy bonita. Eskerrik asko lantokian, mendian, frontoian, festetan,... hainbat momentu ahaztezinen parte izateagatik!

Ez nuke ahaztu nahi, Haziko lankideek Tesiaren azken tentsio uneetan azaldu duten interes eta alaitasuna!

A la Universidad de Navarra por permitirme trabajar en sus instalaciones y especialmente al Departamento de Biología Ambiental por su inestimable ayuda y colaboración. En especial a Fermín e Inma por sus innumerables aportaciones, correcciones, ayudas y apoyo, sin olvidarme del gran equipo que forman junto con

Amadeo, Mónica, Laura, Manuel, Héctor, Marouane, Johann, Juanjo, Carmentxu, Jone, Carmen y Nieves.

A María José Fernández y Purificación Galindo de la Universidad de Salamanca por introducirme en el mundo de los Biplots y análisis multivariantes y por toda su amabilidad y disposición a ayudarme en todo momento.

Me gustaría agradecer también la ayuda prestada por Bodegas y Viñedos Labastida y especialmente a César Castro, ya que, sin su trabajo no hubiese sido posible realizar esta Tesis, por su paciencia y su disponibilidad absoluta cuando necesitaba cualquier dato, idea o información.

A César Arrese-Igor, de la Universidad Pública de Navarra, por sus aportaciones y disponibilidad inmediata en todos los trámites necesarios para la Tesis.

Nire lagunei, hainbestetan, nire kezkak, estualdiak, baita interes handiz entzundako zalantzak argitzeko erakutsi duzuen gogo eta ilusioagatik. Zuek bai pazientzia. Aipamen berezi bat Laurari portada diseinatzeagatik. Moltes gràcies!! Eta Beñat eta Iboni hizkuntzarekin laguntzeagatik!

Nire gurasoei, anaiari eta Aitziberri, eskainitako laguntza eta animo bukaezinengatik! Lan honen unerik zail eta itsusienak jasan izanagatik. Ezin pasa aipatu gabe aita, egindako hamaika irakurketa eta hainbestetan nire txapak jarrerarik onenarekin entzun izanagatik, eginiko ekarpen baliagarriengatik eta ikuspuntu berri bat emateagatik. Baina azkenean hemen dugu, hainbeste esfortzu eta denboraren ondoren, emaitza.

¡Y como no a Angélica! Que me ha ayudado en este viaje largo lleno de altibajos; por entenderme, escucharme, soportarme, apoyarme y ayudarme en todo momento con una sonrisa. Zuk bai meritua! Tesi hau zurea ere bada. También a Loli y Ángel por mostrar siempre verdadero interés y animarme durante todo este tiempo. Y a ti Eva por ayudarme y comprender mejor que nadie todo el esfuerzo que supone llegar a esta meta.

Guztiori, mila mila esker!!

Laburpena

Errioxa jatorri-deiturak, beste eskualde ardogileek bezala, klima aldaketaren erronkari aurre egin behar dio, mahatsondoari eta horrenbestez ardoaren kalitateari eragiten baitio. Bestalde, lurzoruak nabarmenki eragiten du mahatsondoaren fisiologian; hori dela eta, gaur egun, lurzoruak eta klimak duten garrantzia ezagutzea beharrezkoa da, klima aldaketak mahastian nola eragingo duen hobeto ulertzeko.

Aurrekoa kontutan hartuta, Tesi honen helburuak honako hauek izan dira: alde batetik, Arabar Errioxako upategi kooperatiba bateko mahastietan sailkatutako eremu klimatikoen (1971-2007 bitarte) eta lurzoruaren eragina ebaluatzea mahatsaren kalitatearen gain 2009-2011 urteetan eta, bestetik, Errioxa jatorri-deiturarako 2070-2100 garairako aldaketa klimatikoak (700 milioiko parte: ppm CO₂, +4 °C, % -12 hezetasun erlatiboa: HE, estres hidrikoa) izango duen eragina aztertzea maila fisiologikoan, mahats kalitatean eta nutrizio-egoeran Tempranillo barietatean testura ezberdineko lurzoruetan.

Lehen helburua gauzatzeko, Bodegas y Viñedos Labastida kooperatiba upategiak 2009-2011 urteetan zehar era ohikoan bildutako datuak erabili ziren 525 hektareatan, 50 km² hedatuta eta 200 m-ko garaiera diferentziarekin. Lurzoruak lau taldetan sailkatu ziren ura atxikitze gaitasunaren arabera, 1:50.000 eskalako eskuragarri dagoen lurzoru mapa kontutan hartuta. 1971-2007 garairako 1km x 1km-ko datu klimatikoekin bi eremu bereizi ziren eta Huglin indizea kalkulatu zen. Cluster fuzzy k-means metodoa erabili zen bi eremuak bereizteko. Honela, HJ-Biplot analisi estatistikoa erabiliz lurzoruaren eta klimaren eragina ebaluatu zen Tempranillo barietatearen mahatsaren kalitatearen gain. Bigarren helburua betetzeko *Vitis vinifera* cv. Tempranillo aldaxkak bildu eta fruitu-emaile izateko landatu ziren. Landareak fruitu hartetik bildu arte berotegi giro kontrolatuan hazi ziren. Hiru tratamendu ezarri zitzaizkien: (1) 700 ppm CO₂, 28/18 °C, % 33/53 HE, egun/gau versus 390 ppm CO₂, 24/14 °C, % 45/65 HE; (2) 2070-2100 bitarte esperotako estres hidrikoa versus erabilgarritasun hidriko handiagoa gaur egungo

egoera simulatuz, eta (3) hiru testura ezberdineko lurzoruetan buztin edukiaren arabera (%41, %19 y %8). Aldi honetan zehar gas-trukea, klorofilaren fluoreszentzia, potentzial hidrikoa, klorofila kontzentrazioa eta landareen nutrizio-egoera neurtu ziren. Mahatsek 21-23 Brix lortu zutenean bildu ziren landareak eta lortutako laginak mahatsaren kalitatea eta landarearen ekoizpena neurtzeko jaso ziren.

Lortutako emaitzen artean ikusi zen ura atxikitzeko gaitasunaren arabera sailkatutako lurzoru motak mahatsaren kalitatean diferentziak eragin zituztela upategiko mahastietan. Ura atxikitzeko gaitasun handiagoa duten lurzoruek mahastiari indar handiagoa eman zioten eta landare horiek produzitutako muztioek azidotasun total handiago zuten, azido malikoaren kontzentrazio altuagoagatik nagusiki. Ura atxikitzeko gaitasun txikiagoa duten lurzoruak izan ziren, aldiz, antoziano kontzentrazioa handiagoa eta kolore intentsitatea handiagoa sortzeko gai izan ziren lurzoru bakarrak. Ura atxikitzeko gaitasun ertaineko, harea gehiago eta azaleko horizontean K gutxiago zuten lurzoruetan hazitako landareek, K kontzentrazio gutxiagoko muztioak produzitu zituzten. Bestalde, upategiaren mahastietan bereizitako bi eremu klimatikoen arteko tenperatura eta prezipitazio diferentzia ez zen nahikoa izan mahatsaren kalitatean diferentzia handiak sumatzeko.

Emaitzek erakutsi dute CO₂ altuak, tenperatura altuak eta hezetasun erlatibo baxuak landareen aktibitate fotosintesikoa handiagotzen dutela erabilgarritasun hidriko handiago duten landareetan. Hots, hidrikoki estresatutako landareetan fotosintesian sortutako eragin hau baliogabetu egiten da. Esposizio luze baten ondoren, fotosintesiaren aklimatazio fenomenoak ere ikus zitekeen, egoera honetan hazitako landareek tasa fotosintesi baxuagoa aurkeztu baitzuten, eta gainera hostoetan N kontzentrazio baxuagoa eta C/N ratio altuagoa aurkeztu zuten. Azukre metaketa azeleratu egin zen aldaketa klimatikoko egoeran hazitako landare guztietan, kolore aldaketa 7 egunetan eta mahats bilketa (21-23 Brix bezala definituta) 10 egunetan aurreratuz fruituen hartzetik hurrenez hurren.

Landare horiek produzitutako muztioak azido maliko eta tartariko kontzentrazio baxuagoa, antoziano kontzentrazio baxuagoa, kolore intentsitate baxuagoa, pH altuagoa eta tonalitate altuagoa izatea eragin zuen. Hori dela eta, desakoplamendua ikusi zen azukre sintesiaren eta antoziano metaketaren artean.

Aldaketa klimatiko zein gaur egungo egoera klimatikoko negutegietan estres hidrikopean hazitako landareek aktibitate fotosintesiko baxuagoa azaldu zuten, eta itxiera estomatikoaren indukzioarekin batera, uraren erabileraren efizientzia handiagotu zuten. Horrek, landareen hazkunde begetatiboa txikiagotu zuen, azukre metaketa motelduz eta hortaz mahats-bilketa 9 egun atzeratuz. Estres hidrikopean hazitako landareek azido maliko kontzentrazio baxuagoa zuten muztioak produzitu zituzten, baina buztin gutxiago zuten lurzoruetan soilik hazitako landareek. Halaber, mahatsondoaren nutrizio-egoera era adierazgarrian aldatu zen. Ur erabilgarritasun handiago zuten landareek biomasa gehiago sortzeagatik diluzio efektu bat ikusi zen, nutriente kontzentrazio baxuagoa ageri zen landare horien hostoetan. Potasioa izan zen salbuespena, ur erabilgarritasun handiagoa zuten landareetan K kontzentrazio altuago baitzuten hostoek, uraren bidez erakutsitako mobilizazio handiagoagatik ziur asko.

Aurreko faktoreekin alderatuta lurzoruaren testuraren eragina dezente txikiagoa izan zen negutegiko esperimentuan. Aktibitate fotosintesikoa ez zuen ia aldatu. Lurzoruaren testuraren eta erabilgarritasun hidrikoaren artean interakzio bat nabarmendu zen, non konduktantzia estomatiko eta garraio elektronikoko fotosintesikoa txikiagotu zen harea gehiago zuten lurzoru eta ur erabilgarritasun handiago zuten landareetan. Buztin gehiago zuten lurzoruetan hazitako landareek sustrai gutxiago zeuzkaten, Ca eta Mn kontzentrazio altuagoa zuten hostoetan mahats-bilketa garaian eta produzitutako muztioek antoziano kontzentrazio baxuago eta K kontzentrazio altuago bat zuten. Nahiz eta landareek atera behar zuten baino K gehiago bota fertirrigazio bidez, buztin gehiago zuten lurzoruetako K erabilgarritasun handiagoak honakoa eragin zuen: hostoetan zein muztioan K kontzentrazio altuagoa izatea.

Hau guztiagatik, Tesi honek argi uzten du upategiek dauzkaten datuak oso informazio baliagarria direla mahats kalitatearen arabera sailkapenak ebaluatzeko. Informazio mota horrek beste helburu batzuk ere izan ditzake, besteak beste urteko baldintza klimatikoaren eragina ebaluatzea, eta beste modu bat izan daiteke temperatura handiagotzeak edota euri-urriagotzeak izango duen eragina aztertzeko. Beste lan ildo bat honakoa izan liteke: identifikatzea zein elementutan oinarritu behar diren etorkizuneko ikerketa ildoak, sektoreak klima-aldaketaren eraginei aurre egitea helburu dutenak. Gainera, ondoriozta daiteke klima aldaketaren eragina Tempranillo bariatatean, hots, azukre metaketaren azelerazioa, azidotasanaren jaitea edo polifenolen metaketaren desakoplamentua, aski garrantzitsuak izango direla egokitzapen-neurriak planteatzeko. Zentzu honetan, mahastientzako kokapen berriak aukeratzekoan, honako hauek kontuan hartu beharko dira; i) lurzoruek duten ura atxikitze gaitasuna, euri gutxiago egitea espero denez etorkizunean eta ii) lurzoruaren K erabilgarritasuna, are gehiago aldaketa klimatikoaren ondorio bezala azidotasan galera datorrela jakinda.

Resumen

La DOCa Rioja, al igual que otras regiones vitivinícolas, tiene que hacer frente al reto que supone el cambio climático, ya que afecta a la vid y consecuentemente a la calidad del vino. Por otra parte, el suelo influye de forma clara en el desarrollo de la planta, por tanto es necesario conocer la importancia que tienen el suelo y el clima a día de hoy para entender mejor cómo se verá afectado el viñedo en un futuro escenario de cambio climático.

Debido a lo anteriormente expuesto, los objetivos de esta Tesis han sido, por un lado, evaluar la influencia del suelo y de las zonas climáticas establecidas entre 1971 y 2007 en los viñedos de una bodega cooperativa de Rioja Alavesa sobre la calidad de la uva durante los años 2009-2011 y, por otro lado, estudiar la influencia que tendrá el cambio climático esperado para el periodo 2070-2100 en la DOCa Rioja (700 ppm CO₂, +4 °C, -12% humedad relativa: HR, estrés hídrico) a nivel fisiológico, de calidad de uva y de estado nutricional de la vid cv. Tempranillo en suelos con diferentes texturas.

Para llevar a cabo el primer objetivo, durante los años 2009-2011 se utilizaron datos recogidos de forma rutinaria por una bodega cooperativa (Bodegas y Viñedos Labastida) con una superficie de viñedos de 525 ha repartidos en unos 50 km² y con 200 metros de diferencia en altitud. Los suelos se clasificaron en cuatro grupos según las diferentes capacidades de retención hídrica de acuerdo a un mapa de suelos disponible a escala 1:50.000. Se diferenciaron dos zonas a partir de los datos climáticos (1km x 1km) del periodo de 1971-2007 calculándose el índice climático Huglin y el método de análisis cluster fuzzy k-means para diferenciar dichas zonas climáticas. De esta forma, se evaluó el efecto del suelo y el clima sobre la calidad de la uva de la variedad Tempranillo mediante el análisis estadístico HJ-Biplot. Para cumplir con el segundo objetivo se recolectaron esquejes de *Vitis vinifera* cv. Tempranillo y se cultivaron para obtener esquejes fructíferos. Las plantas se cultivaron en ambientes controlados de invernadero desde el cuajado hasta la vendimia. Se aplicaron tres factores: (1) 700 ppm CO₂,

28/18 °C, 33/53 % HR, día/noche versus 390 ppm CO₂, 24/14 °C, 45/65 % HR; (2) estrés hídrico esperado para el periodo 2070-2100 versus mayor disponibilidad hídrica que simula las condiciones actuales y (3) tres suelos con diferentes texturas según su contenido de arcilla (41%, 19% y 8%). Durante este periodo se realizaron medidas de intercambio gaseoso, fluorescencia de clorofila, potencial hídrico, concentración de clorofilas y se evaluó el estado nutricional de las plantas. Las plantas se vendimiaron cuando las bayas alcanzaron su maduración definida en 21-23 Brix y las muestras obtenidas se utilizaron para el análisis de calidad de la baya y la producción de la planta.

Entre los resultados obtenidos se observó que los distintos tipos de suelo en función de la capacidad de retención hídrica provocaron diferencias en la calidad de los mostos en una bodega cooperativa. Así, los suelos con una mayor capacidad de retención hídrica confirieron un mayor vigor al viñedo y las plantas cultivadas en éstos, produjeron mostos con una mayor acidez total, debido principalmente a una mayor concentración de ácido málico. Los suelos con una menor capacidad de retención hídrica fueron los únicos capaces de producir mostos con una mayor concentración de antocianos y mayor intensidad de color. Las plantas cultivadas en los suelos con una capacidad de retención de agua media, que tenían una textura más arenosa y un menor contenido de K en el horizonte superficial del suelo produjeron mostos con una menor concentración de K. Por otro lado, las diferencias de temperatura y precipitación entre las dos zonas climáticas diferenciadas en los viñedos de la cooperativa no fueron lo suficientemente intensas para causar diferencias reseñables en la calidad de la uva.

Los resultados mostraron que un elevado CO₂, una elevada temperatura y una reducida humedad relativa aumentaron la actividad fotosintética en plantas con una mayor disponibilidad hídrica, aunque este efecto en la fotosíntesis, se vio anulado cuando las plantas fueron sometidas a estrés hídrico. También se evidenció una aclimatación de la fotosíntesis después de un largo periodo de exposición, puesto que las plantas crecidas en estas condiciones regularon a la

baja la tasa fotosintética, presentando además, un menor contenido de N en las hojas y un mayor ratio C/N. La acumulación de azúcar se vio acelerada en todas las plantas sometidas a dichas condiciones de cambio climático adelantando el envero en 7 días y la vendimia, medida como 21-23 Brix de azúcar, en 10 días respecto al cuajado. Además, los mostos de estas plantas presentaron una menor concentración de ácido málico y tartárico, menor concentración de antocianos totales, menor intensidad de color, un mayor pH y una mayor tonalidad. Por tanto, se observó un desacoplamiento entre la síntesis de azúcar y la acumulación de antocianos.

Las plantas sometidas a estrés hídrico tanto en el escenario de cambio climático como en el escenario de clima actual mostraron una menor actividad fotosintética que junto con la inducción del cierre estomático, aumentaron la eficiencia en el uso del agua. Esto redujo el crecimiento vegetativo y retrasó la acumulación de azúcar y, por tanto, la vendimia en 9 días. Las plantas crecidas bajo estrés hídrico produjeron mostos con una menor concentración de ácido málico únicamente en los suelos con menor contenido de arcilla. Asimismo, se alteró de forma significativa el estado nutricional de la vid. La menor concentración de nutrientes obtenida en las plantas con una mayor disponibilidad hídrica pudo ser debida a una mayor producción de biomasa aérea lo que causó un efecto dilución de los nutrientes. La excepción fue el K, que presentó mayores concentraciones en hoja y también en uva en las plantas con una mejor disponibilidad hídrica debido a una mayor movilización del K con el agua.

El efecto de la textura del suelo en el estudio de invernadero no implicó cambios tan significativos como los factores anteriores. En este sentido, no modificó de forma significativa la actividad fotosintética. Se evidenció una interacción entre el factor textura de suelo y el aporte de agua; así, en plantas del tratamiento de mayor disponibilidad hídrica crecidas en los suelos con mayor contenido de arena disminuyó la conductancia estomática y de forma ligera el transporte electrónico fotosintético. Las plantas crecidas en los suelos con un

mayor contenido de arcilla mostraron un menor peso fresco de raíces, obtuvieron mayores concentraciones foliares de Ca y Mn en vendimia y produjeron mostos con una menor concentración de antocianos totales y mayor concentración de K. A pesar de que el aporte de K por fertirrigación excedió por mucho el K extraído por la planta y fue el mismo en los tres tipos de suelo, una mayor disponibilidad de K en los suelos de mayor contenido de arcilla aumentó la concentración de K en los tejidos vegetales y el mosto.

Por todo ello, esta Tesis pone de relieve que los datos de los que disponen las bodegas suponen una información muy valiosa para la evaluación de la clasificación en calidades. Igualmente este tipo de información puede servir para otros fines como evaluar la influencia de las condiciones climáticas anuales, representando otro modo de estudiar la incidencia del aumento de temperatura o de la reducción de precipitaciones. Otra posible línea de trabajo podría ser la identificación de puntos sobre los que deben basarse las futuras líneas de investigación que tengan como objetivo anticipar al sector frente a los efectos del cambio climático. Además, se puede concluir que los efectos del cambio climático como pueden ser la aceleración en la acumulación de azúcar, la disminución de la acidez o el desacoplamiento con el proceso de acumulación de los polifenoles en la variedad Tempranillo van a ser lo suficientemente importantes como para plantear medidas de adaptación. En este sentido, a la hora de seleccionar nuevos emplazamientos para viñedo, será necesario considerar; i) la capacidad de retención hídrica de los suelos, ya que, se espera que las precipitaciones descendan en un futuro y ii) la disponibilidad de K del suelo, y más sabiendo que la pérdida de acidez es una de las consecuencias negativas relacionada con el cambio climático.

Summary

Rioja wine appellation, like other wine regions, has to face the climate change challenge, since it affects the grapevine and consequently the wine quality. Soil clearly influences grapevine development; hence it is necessary to know the importance of soil and climate nowadays to better understand how future climate change scenario will affect the vineyard.

Therefore, the objectives of this Thesis have been, on the one hand, to evaluate the influence of soil and climatic zones established between 1971 and 2007 in a winegrower's cooperative vineyards in Rioja Alavesa, on grape quality during the years 2009-2011 and, on the other hand, to study the influence of the expected climate change for the period 2070-2100 in Rioja wine appellation (700 ppm CO₂, + 4 °C, -12% relative humidity: RH, water stress) at physiological level, grape quality level and nutritional status of grapevine cv. Tempranillo in soils with different textures.

To achieve the first objective, during the years 2009-2011 data were collected routinely by a cooperative winery (Bodegas and Vineyards Labastida) with a total vineyard surface area of 525 ha distributed in about 50 km² and with 200 meters of difference in height. Soils were classified into four groups according to different water retention capacities based on an available soil map at 1: 50.000 scale. Two zones were differentiated from the climatic data (1km x 1km) of the period 1971-2007, calculating the Huglin climate index and the cluster analysis method fuzzy k-means to differentiate these climatic zones. This way, the effect of soil and climate on grape quality for the Tempranillo variety was evaluated using the HJ-Biplot statistical analysis. In order to fulfil the second objective, *Vitis vinifera* cv. Tempranillo cuttings were selected and grown to obtain fruit-bearing cuttings. Plants were grown under controlled greenhouse environment from berry set to harvest. Three factors were applied: (1) 700 ppm CO₂, 28/18 °C, 33/53% RH, day/night versus 390 ppm CO₂, 24/14 °C, 45/65% RH; (2) water stress expected for the period 2070-2100 versus higher water availability simulating

current conditions and (3) three soils with different textures according to their clay content (41%, 19% and 8%). During the study period, gas exchange, chlorophyll fluorescence, water potential, chlorophyll concentration and nutritional status were evaluated. Plants were harvested when berries reached maturity defined as 21-23 Brix and berry quality and yield was analysed.

Among the results, it was observed that different soil types according to water retention capacity caused differences in must quality in a winegrower's cooperative. Therefore, soils with a greater water retention capacity conferred greater vigour on the grapevine and produced musts with higher total acidity, mainly due to higher malic acid concentration. Soils with lower water retention capacity were the only ones able to produce musts with higher anthocyanins concentration and higher colour intensity. Soils with medium water retention capacity, the sandiest texture and lower soil K content in the superficial horizon produced musts with lower K concentration. On the other hand, temperature and precipitation differences between the two climatic zones distinguished at the cooperatives vineyards were not enough to produce noteworthy differences on grape quality.

The results showed that a high CO₂, a high temperature and a reduced relative humidity increased photosynthetic activity in plants with greater water availability, although this effect in the photosynthesis was annulled when the plants were submitted to water stress. After a long period of exposure, photosynthesis down-regulation was also observed, since plants grown under these conditions decreased the photosynthetic rate, presenting, in addition, lower leaf N content and higher leaf C/N ratio. Sugar accumulation was accelerated in all plants subjected to these climatic change conditions, shortening the time between fruit set and veraison and between fruit set and harvest, measured as 21-23 Brix, by up to 7 and 10 days, respectively. These plants produced musts with lower malic and tartaric acid concentration, lower total anthocyanins concentration, lower colour intensity, higher pH and higher tonality. Therefore, a

decoupling between the sugar synthesis and the anthocyanin accumulation was observed.

Plants subjected to water stress in both the climate change scenario and in the current climate scenario showed lower photosynthetic activity that, together with the induction of stomatal closure, increased the efficiency of water use. This reduced the vegetative growth, delayed the sugar accumulation and therefore the harvest in 9 days. Plants under water stress produced musts with lower malic acid concentration only in soils with lower clay content. Likewise, the grapevine nutritional status was significantly altered. Lower nutrient concentration obtained in plants with greater water availability may be due to a higher production of aerial biomass, which caused nutrient dilution effect. The exception was K, which presented higher K leaf and K grape concentration in plants with better water availability due to a greater mobilization of K with water.

Soil texture in the greenhouse study did not involve changes as significant as the previous factors. It did not significantly modify the photosynthetic activity.

An interaction between soil texture and water supply factors was evidenced, hence a decrease of the stomatal conductance was observed in well-irrigated plants grown in the sandiest soils as well as a slight decrease in the electronic transport rate. Plants grown in soils with higher clay content produced lower fresh root weight, higher leaf Ca and Mn concentrations at harvest and musts with lower total anthocyanin concentration and higher K concentration. Although K input by fertigation exceeded by far the K extracted by the plant and it was the same in the three soils, higher soil K availability with higher clay content increased K concentration in plant tissues and must.

Therefore, this Thesis emphasizes that the data of the wineries represents very valuable information when evaluating grape quality classification. Likewise, this type of information can be used for other purposes, such as evaluating the influence of annual climatic conditions, representing another way of studying the incidence of temperature increase or precipitation decrease. Another possible line

Summary

of work could be the identification of points at which future lines of research should aim to anticipate the sector to face the effects of climate change. In addition, it can be concluded that climate change effects, such as sugar accumulation acceleration, acidity decrease or decoupling with the process of polyphenols accumulation in the Tempranillo variety will be important enough to propose adaptation measures. In this sense, when selecting new vineyard sites, it will be necessary to consider; i) soil water retention capacity, since precipitation is expected to decrease in the future and ii) soil K availability, knowing that acidity loss will be one of the negative consequences related to climate change.

Lo que no se define, no se puede medir. Lo que no se mide, no se puede mejorar.

Lo que no se mejora, se degrada siempre.

Lord Kelvin (físico y matemático británico)

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO 1: <i>Introducción</i>	1
Aspectos generales del cultivo de la vid y la producción del vino. DOCa Rioja.....	3
Retos de la viticultura.....	8
Terroir. Influencia del Clima y del Suelo sobre la calidad de la uva	10
Clima.....	11
Suelo	17
Futuros escenarios del cambio climático en el sector vitivinícola	21
Justificación de la Tesis	27
Objetivos de la Tesis	32
Generales y específicos.....	32
Bibliografía	34
CAPÍTULO 2: <i>Soil type and climatic zone influence on must quality in a cooperative of Rioja appellation using HJ-Biplot</i>	45
Abstract	47
Introduction	48
Materials and Methods	50
Study area	50
Environmental variables	51
Target variables	57
Statistical analysis.....	58
Results	59
Discussion	68
Conclusion	71
References.....	72
CAPÍTULO 3: <i>How will climate change influence grapevine cv. Tempranillo photosynthesis under different soil textures?</i>	77
Abstract	79
Introduction.....	81
Materials and methods	84

Índice

Plant material and growth conditions	84
Experimental design	85
Stem water potential measurements	90
Gas-exchange and chlorophyll fluorescence measurements.....	90
Leaf N and C/N ratio measurements.....	92
Photosynthetic pigment measurements.....	92
Statistical analysis.....	93
Results	93
Changes in stem water potential with climate change simulation, water availability, and soil textures.....	93
Changes in gas-exchange traits with climate-change simulation, water availability, and soil textures.....	94
Changes in chlorophyll fluorescence parameters in response to climate-change simulation, water availability, and soil textures	98
Changes in photosynthetic pigments with climate change simulation, water availability, and soil textures.....	101
Correlations between gas-exchange traits.....	103
Discussion	105
Response of grapevine photosynthesis to climate change conditions (elevated CO ₂ , elevated temperature, and low relative humidity)	105
Effect of water deficit on grapevine photosynthetic activity	109
Influence of soil texture on photosynthetic performance	110
Interaction among climate change, water availability, and soil texture on grapevine photosynthetic activity	111
Conclusion	112
References.....	113
CAPÍTULO 4: <i>Grape yield and quality responses to simulated year 2100 expected climatic conditions under different soil textures</i>	121
Abstract	123
Introduction.....	124
Material and methods.....	126

Establishment of potted plants.....	126
Experimental design	126
Measurements	129
Statistical analysis.....	131
Results	131
Plant growth, phenology and yield parameters.....	131
Grape quality parameters	134
Discussion	136
Plant phenology and growth	136
Berry composition	138
Conclusions	141
References.....	143
CAPÍTULO 5: <i>Grapevine nutritional status and K concentration of must under future expected climatic conditions and different soils</i>	147
Abstract	149
Introduction.....	150
Materials and methods	153
Potted plant establishment	153
Experimental design	154
Measurements	157
Statistical analysis.....	158
Results	158
Discussion	163
Conclusions	166
References.....	168
CAPÍTULO 6: <i>Discusión general</i>	173
Bibliografía	191
CAPÍTULO 7: <i>Conclusiones finales</i>	197

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Situación geográfica de las Denominaciones de origen vitícolas en España (DO).....	5
Figura 1.2. Mapa de la DOCa Rioja y sus subzonas de producción.....	6
Figura 1.3. Crecimiento de la baya (B) desde la floración (F) al estado de madurez (M), y crecimiento de la inflorescencia (I) crecimiento diario (b) y fases del crecimiento de las bayas (I, II y III) (Fuente: Reynier, 2002).....	15
Figura 1.4. Escenarios del AR5.....	25
Figura 1.5. Emisiones de CO ₂ en las diferentes RCPs.	26
Figura 1.6. Cambio estimado de la temperatura anual media en el sur de Europa y la Región Mediterránea para distintos escenarios de emisión.....	26
Figure 2.1. Huglin Heliothermal Index climatic zoning for the period 1971-2007 using k-means clustering in the Bodegas y Viñedos Labastida cooperative winery vineyard of Rioja appellation.	52
Figure 2.2. Average, minimum and maximum temperature and monthly precipitation at Hueta (North Zone) and Espirbel (South Zone) weather stations from January 2009 to December 2011.	53
Figure 2.3. (A) HJ-biplot representation of quantitative must parameters (pH, malic acid, tartaric acid, total acidity, K, PTI) and NDVI in 2009 for plane 1-2 and (B) probable alcoholic degree in 2009 for plane 1-3.....	65
Figure 2.4. (A) HJ-biplot representation of quantitative must parameters (degree, pH, malic acid, total acidity, K, PTI, CI, anthocyanins) in 2010 for plane 1-2 and (B) NDVI and tartaric acid in 2010 for plane 2-3.	66
Figure 2.5. (A) HJ-biplot representation of quantitative must parameters (degree, pH, malic acid, total acidity, K, PTI) in 2011 for plane 1-2 and (B) CI, anthocyanins and tartaric acid in 2011 for plane 1-3.	67
Figure 3.1. Water retention curves for the three soil textures (STs): 41, 19, and 8 % clay	89
Figure 3.2. Stem water potential (Ψ) at veraison (a) and maturity (b) in <i>Vitis vinifera</i> (cv. Tempranillo) plants	94

Figure 3.3. Photosynthetic rate (A_N , a, b), stomatal conductance (g_s , c, d), substomatal CO_2 concentration (C_i , e, f), photorespiration (R_L , g, h) and intrinsic water use efficiency (WUE, i, j), at veraison (a, c, e, g, i) and maturity (b, d, f, h, j), in *Vitis vinifera* (cv. Tempranillo) plants..... 96

Figure 3.4. Stomatal conductance (g_s) at maturity in *Vitis vinifera* (cv. Tempranillo) plants 97

Figure 3.5. Actual photosystem II (PSII) efficiency (ϕ_{PSII} , a, b) and photochemical quenching (q_p , c, d) at veraison (a, c) and maturity (b, d), in *Vitis vinifera* (cv. Tempranillo) plants 99

Figure 3.6. Actual photosystem II (PSII) efficiency (ϕ_{PSII}) at veraison (a) and photochemical quenching (q_p) at maturity (b) in *Vitis vinifera* (cv. Tempranillo) plants 100

Figure 3.7. Intrinsic photosystem II (PSII) efficiency ($\phi_{exc.}$) at veraison (a) and maturity (b) in *Vitis vinifera* (cv. Tempranillo) plants 100

Figure 3.8. Chlorophyll a (a), chlorophyll b (b) and chlorophyll a/b ratio (c) at maturity in *Vitis vinifera* (cv. Tempranillo) plants 102

Figure 3.9. Carotenoids at maturity in *Vitis vinifera* (cv. Tempranillo) plants..... 103

Figure 3.10. Correlations between transpiration (E) and stomatal conductance (g_s) at veraison (a) and maturity (b), between photosynthetic rate (A_N) and transpiration (E) at veraison (c) and maturity (d), and between photosynthetic rate (A_N) and stomatal conductance (g_s) at veraison (e) and maturity (f) in *Vitis vinifera* (cv. Tempranillo) plants 104

Figure 4.1. Interaction analysis of malic acid in grapevine (cv. Tempranillo) plants grown under two water availabilities (WA) (Well-irrigated: WI and Expected future water deficit: WD) and three soil textures (ST) (41, 19 and 8% clay) 135

ÍNDICE DE TABLAS

Table 2.1. Most relevant phenological dates.	53
Table 2.2. Physical and chemical soil properties (mean and standard error) of the four soil groups classified from the winery vineyards.	56
Table 2.3. Number of samples for each climatic zone, soil type and grape quality parameters and NDVI mean and standard error in 2009.	63
Table 2.4. Number of samples for each climatic zone, soil type and grape quality parameters and NDVI mean and standard error in 2010.	63
Table 2.5. Number of samples for each climatic zone, soil type and grape quality parameters and NDVI mean and standard error in 2011.	63
Table 2.6. Results of the variance for each axis for the 2009, 2010 and 2011 years.	64
Table 3.1. Treatments applied to <i>Vitis vinifera</i> (cv. Tempranillo) plants from fruit set to maturity	86
Table 3.2. Physico-chemical properties; particle size fractions, texture, bulk density, maximum retention of water in 6 kg soil pots, container capacity, field capacity (-10 and -33 kPa), permanent wilting point (-1500 kPa), pH, organic matter, carbonates, limestone, N, P, Mg K, Na and Ca content and cation-exchange capacity (CEC) of the 3 soils used in the experiment	88
Table 3.3. Photosynthetic rates (AN; $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) in current (Curr) and climate change (CC) <i>Vitis vinifera</i> (cv. Tempranillo) plants measured at CC conditions, and N concentration (% of dry weight) and C/N ratio in Curr and CC plants at veraison and maturity	98
Table 4.1. Treatments applied to <i>Vitis vinifera</i> (cv. Tempranillo) plants from fruit set to maturity at the greenhouse experiment	127
Table 4.2. Mean and standard error values of elapsed time from fruit set to veraison and from fruit set to maturity, number of leaves, total leaf area, total dry weight, root fresh weight and skin/pulp ratio in grapevine (cv. Tempranillo) plants	133
Table 4.3. Mean and standard error values of malic acid and tartaric acid concentrations and pH in grapevine (cv. Tempranillo) plants	134

Table 4.4. Mean and standard error values of total anthocyanin concentration, colour intensity and tonality, in grapevine (cv. Tempranillo) plants.....	136
Table 5.1. Physico-chemical properties, particle size fractions, texture, bulk density, pH, organic matter, carbonates, active lime N, P, Mg K, Na and Ca content and cation-exchange capacity (CEC) of the three soils used in the experiment.	156
Table 5.2. Average concentration of macronutrients and micronutrients in grapevine cv. Tempranillo leaf blades and standard errors at veraison	160
Table 5.3. Average concentration of macronutrients and micronutrients in grapevine cv. Tempranillo leaf blades and standard errors at full maturity.....	161
Table 5.4. Mean and standard error values of the K concentration in the must of cv. Tempranillo grapevines.....	162
Table 5.5. Average total leaf dry weight and total weight in cv. Tempranillo grapevines and standard error at full maturity.....	163

CAPÍTULO 1: *Introducción*





Aspectos generales del cultivo de la vid y la producción del vino. DOCa Rioja

La vid (*Vitis*), con casi 800 especies descritas, es un género con alrededor de 60 especies aceptadas, perteneciente a la familia *Vitaceae* que se distribuye predominantemente por el hemisferio norte. Se considera una especie originaria del suroeste de Asia y del Mediterráneo oriental, desde donde se ha ido implantado como cultivo en los países mediterráneos. La elaboración de vino data aproximadamente de 5.000 años (McGovern *et al.*, 1996). La especie (*Vitis vinífera* L.) es uno de los cultivos más extendidos en todo el mundo, y alcanza una superficie total cultivada de 7,55 millones de hectáreas según los datos de la Organización Internacional de la Viña y el Vino (OIV, 2015). Con más de 10.000 variedades referenciadas en el *Vitis International Variety Catalogue* (<http://www.vivc.de>, Diciembre 2016 obtenido de Duchêne, 2016), tiene gran variabilidad genética y se adapta a una amplia serie de condiciones climáticas, desde climas templados hasta semiáridos y tropicales (Kliewer y Gates, 1987; Mullins *et al.*, 1992; Tomás *et al.*, 2014). Sin embargo, la mayor parte de estos recursos genéticos se encuentran en colecciones y bancos de germoplasma (This *et al.*, 2006), explotándose sólo un reducido número de variedades a nivel comercial. De hecho, tan sólo cinco variedades de vid (Tempranillo, Airén, Bobal, Garnacha y Monastrell) representan más del 60% del total del viñedo de España (MAGRAMA, 2009).

Europa es el continente que presenta la mayor superficie de viñedo en el mundo (alrededor del 38%), encontrándose la mayoría en zonas del Mediterráneo (Mullins *et al.*, 1992; Fraga *et al.*, 2013; Tomás *et al.*, 2014), seguido por Asia. España se mantiene como primer viñedo mundial, con 1,02 millones de hectáreas, y China con 799.000 hectáreas, se aúpa al segundo lugar desplazando a Francia. En lo que hace referencia a la cantidad de vino producido, Europa -a pesar del

descenso de la superficie de cultivo que se ha producido en los últimos años sigue siendo el principal productor (62%), seguido de América (20%) y Asia (8%) (OIV, 2012). Italia (49,5 millones de hectolitros), Francia (47,6 millones) y España (37,2 millones) destacan como los países más productores, con más del doble de producción anual que el resto. Europa exporta más del 65% del total del vino en el mundo, seguido de América (25%) (OIV, 2012). A nivel de países, Francia es el principal país exportador en valor con alrededor de un 29% del total de las exportaciones mundiales, seguido de Italia (19%) y España (9%), mientras que si se considera en volumen España es el país que más exporta (24,0 millones de hectolitros), seguido de Italia (20,0 millones) y Francia (14,3 millones) (OIV, 2015).

El vino forma parte integral de la cultura alimentaria en la Europa mediterránea, desde donde se ha difundido su consumo hacia otras muchas regiones del mundo (Unwin, 2001). Cabe destacar que entre los años 2001 y 2011 el consumo de vino se incrementó en un 8% a nivel mundial (OIV, 2012), aunque en el año 2014 se produjo un ligero descenso al situarse en 240 millones de hectolitros (OIV, 2015). No obstante, la dinámica de consumo ha sido distinta en función de la zona del mundo considerada: los países tradicionalmente consumidores, como Italia y España, prosiguen su retroceso o estancamiento, en beneficio de nuevos países en Europa y en otras regiones donde no existía una tradición consolidada de consumo. Como ejemplo, en el período 2001-2011 China aumentó el consumo de vino en un 60%. Estados Unidos se mantiene como primer consumidor mundial, al sumar 30,7 millones de hectolitros. Todo ello ha llevado a un aumento muy relevante en las exportaciones mundiales, que han crecido más de un 20% entre los años 2001 y 2011 (OIV, 2012).

De las 69 denominaciones de origen que existen en España (Figura 1.1) únicamente dos obtienen la distinción de calidad; la DOCa Rioja y la DOCa

márgenes del río Ebro. Ya desde 1102 hay referencia documental relacionada con los vinos de Rioja, y en 1787 se creó la Real Sociedad Económica de Cosecheros de Rioja, cuyo objetivo era el fomento del cultivo de la vid, la elaboración de vino y el desarrollo de su comercio. En 1926 se decretó la creación del Consejo Regulador cuya finalidad era delimitar la zona de Rioja, controlar la expedición de la "precinta de garantía" y recomendar las medidas legales que se tomarían contra los usurpadores y falsificadores del nombre "Rioja". Sin embargo, no es hasta 1945 cuando este organismo se estructura legalmente. El Consejo Regulador quedó constituido en 1953, y en 1970, se aprueba el Reglamento de la Denominación de Origen y de su Consejo Regulador que adquirió así su estructura y funciones (DOCa Rioja www.riojawine.com).



Figura 1.2. Mapa de la DOCa Rioja y sus subzonas de producción.

Administrativamente las 63.593 ha de viñedo protegidas por la denominación se distribuyen en el territorio de las tres provincias ribereñas del curso alto del Ebro (Figura 1.2): La Rioja (43.885 ha), Álava (12.934 ha) y Navarra (6.774 ha). Está enclavada en el Valle del Ebro, limitando al norte con la Sierra de Cantabria y al sur con la Sierra de la Demanda y Cameros. La producción media actual de la

Denominación se sitúa entre 280 y 300 millones de litros, de los que el 90% corresponde a vino tinto y el resto a blanco y rosado. Toda la zona se beneficia de la confluencia de dos climas distintos como son el atlántico y el mediterráneo, que proporcionan temperaturas suaves (temperaturas medias anuales entre 12 y 17 °C) y precipitaciones anuales situadas entre 400 y 600 mm, y distribuidas con una notable irregularidad (intraanual e interanual). Esta irregularidad es una de las características de las zonas de transición climática (Moreno *et al.*, 2005).

La variedad más importante dentro de la DOCa Rioja es Tempranillo, una variedad muy segura en el cuajado, muy sensible a plagas y enfermedades, poco resistente a la sequía y a temperaturas altas. Es potasófila ya que su raíz absorbe potasio con facilidad. Cuando una cepa absorbe mucho potasio, éste salifica al tartárico disminuyendo la acidez y dando lugar a pH altos, y además retarda la desaparición en uva del ácido málico. Las bayas son de tamaño medio a grande y su mosto suele tener una acidez bastante baja. Se trata de una variedad de ciclo corto con brotación en época media tirando a tardía y, como su nombre indica, maduración temprana (Ibáñez *et al.*, 2012).

Retos de la viticultura

A finales del siglo XIX el objetivo principal de la vitivinicultura española era producir vinos de calidad y características constantes. Hasta entonces, los esmeros de los viticultores se habían dirigido hacia el aumento de la producción. En los últimos años, el mercado mundial del vino ha experimentado diversos cambios relacionados con el libre mercado y el comportamiento e influencia del consumidor. Los cambios en el patrón de consumo (descenso del volumen medio consumido y aumento de la calidad) que se habían iniciado en Francia en los años cincuenta, no se produjeron en España hasta finales del siglo XX. El cambio se inició con un descenso del consumo per cápita (de 69 litros anuales por persona en 1975-1979 a 46 en 1985-1989), pero la preferencia por la calidad avanzó muy lentamente. A finales de los años ochenta, solamente el 16% de los vinos que se consumían en España eran con referencia de origen, un porcentaje mucho menor que en Francia, donde era un 40% en 1990. El vino Rioja suponía el 40% del consumo de vinos con denominación hacia mediados de los noventa en España, mientras que el Valdepeñas era el segundo vino más consumido, con un 10% (Angulo *et al.*, 2000; Castillo-Valero y Compés-López, 2014). En general, en España, este cambio ha traído como consecuencia que se haya favorecido la producción de uvas de alta calidad potencial, acompañado de un progreso cualitativo importante en el procesado de las uvas.

La correlación inversa existente entre la producción y la calidad de la uva ha sido ampliamente discutida (Williams y Matthews 1990; Romero *et al.*, 2013; Medrano *et al.*, 2015) y plantea que a mayor vigor, se produce un mayor número de brotes, además de mayor producción pero peor calidad de las uvas. Cortell *et al.* (2005) indican que las cepas con exceso de vigor, pueden presentar una menor fertilidad de sus yemas y/o un peor cuajado del fruto (corrimiento). Sin embargo, dicha premisa no siempre se cumple, ya que suelos con una capacidad de

retención de agua alta que pueden producir vigores elevados en la vid también son capaces de dar vinos de alta calidad (Smart y Robinson, 1991).

Teniendo en cuenta lo anterior, controlar el crecimiento de la vegetación, y por tanto el vigor, es fundamental para poder tener un viñedo equilibrado respecto a producción y calidad. van Leeuwen y Seguin (2006) constatan que para obtener uvas de alta calidad hace falta potenciar los factores que reduzcan el vigor y el tamaño de las bayas para que así incrementen los compuestos fenólicos de la piel. Uno de los factores limitantes más conocidos del vigor es el déficit hídrico moderado en determinados periodos del crecimiento, ya sea porque el clima es seco, porque la capacidad de retención de agua de los suelos es baja, o por ambos. Muchas publicaciones científicas han discutido ampliamente los efectos del déficit hídrico sobre la acumulación de varios metabolitos en la uva. La mayoría de estos estudios se refieren a ensayos de riego (Esteban *et al.*, 1999; Kennedy *et al.*, 2002; Petrie *et al.*, 2004; Salon *et al.*, 2005; Koundouras *et al.*, 2006), mientras que muy pocos investigan el impacto de las condiciones hídricas en situaciones de secano, en relación con factores ambientales como el suelo y el clima (van Leeuwen y Seguin, 1994; Choné *et al.*, 2001). La influencia del estado hídrico sobre los componentes de la uva origina a menudo resultados distintos, principalmente debido al momento en el que se suministran los riegos y a las dosis aplicadas, que conducen a distintos niveles de estrés hídrico. Por otra parte, la respuesta de la uva al riego moderado es también dependiente de la variedad, ya que como es sabido (Schultz, 1996) las distintas variedades de *Vitis Vinifera* responden de forma diferente al estrés hídrico (Koundouras *et al.*, 2006).

De ahí que entre los mayores retos agronómicos para los viticultores se encuentre el conseguir un adecuado control del crecimiento vegetativo, para lograr un equilibrio entre el vigor y la producción, que dé lugar a calidades óptimas de uva. El Reglamento de la DOCa Rioja fijó un límite productivo, en función de la

climatología del año, del stock, etc. que, por ejemplo, se fijó alrededor de 6.955 kg ha⁻¹ en variedades tintas y 9.630 kg ha⁻¹ en variedades blancas para la vendimia de 2016, lo cual implica un control del viñedo exhaustivo para no superar el límite fijado. Dicho equilibrio está estrechamente relacionado con las condiciones específicas de suelo, clima, prácticas culturales y sistemas de conducción, que a su vez están relacionadas con la variedad y el patrón, lo que se conoce con el concepto francés “*Terroir*” (Seguin, 1986 y 1988; van Leeuwen *et al.*, 2004).

Terroir. Influencia del Clima y del Suelo sobre la calidad de la uva

Tal y como se comenta en el apartado anterior, el *terroir* es un concepto importante en viticultura porque relaciona los atributos sensoriales del vino con las condiciones medioambientales en las que la uva es cultivada. La calidad de la uva y el estilo de vino pueden ser explicadas en gran medida por el *terroir*. Sin embargo, es difícil estudiar el *terroir* con criterios científicos porque engloba muchos factores como clima, suelo, variedad, clon, patrón, y prácticas humanas, así como la interacción entre ellos (van Leeuwen *et al.*, 2007). Frecuentemente se utiliza la palabra *terroir* en relación a vinos de alta calidad y estilo, particularmente en la viticultura europea (Falcetti, 1994), siendo una buena alternativa de marketing ya que por ejemplo, el consumidor, a la hora de elegir un vino francés, está comprando un producto con una connotación local que hace que tenga un valor añadido (Wilson, 1998).

Por tanto, el *terroir* debe ser visto como un sistema complejo con múltiples variables que son muy difíciles de estudiar todas a la vez en un único ensayo (Choné *et al.*, 2001). Sin embargo, se puede afirmar que dos de los factores principales que conforman el *terroir* son el clima y el suelo junto con la variedad

(van Leeuwen *et al.*, 2004), y seguidamente trataremos de analizar la influencia que ambos tienen sobre el desarrollo de la viña y la calidad del vino.

Clima

El clima es ampliamente reconocido como uno de los factores más importantes que afectan al desarrollo de la vid y a su crecimiento (Jackson y Lombard, 1993; Keller, 2010; Malheiro *et al.*, 2010; Fraga *et al.*, 2014 a, b). Durante el periodo de crecimiento, las condiciones climáticas locales ejercen una influencia significativa en los procesos fisiológicos de la vid afectando al proceso de maduración de la uva y a la tipicidad y estilo de los vinos (Jones, 2003). Por ello, los cambios producidos en el clima, en lo que respecta a la tendencia climática general y a la variabilidad climática interanual inherente a la campaña, afectan de una forma significativa al desarrollo de la vid. Si bien el clima ha cambiado drásticamente a lo largo de la historia del cultivo de la viña, los cambios en el pasado reciente y los proyectados en un futuro próximo han recibido una gran atención por sus posibles impactos en la industria vitivinícola actual.

Tal y como se ha comentado anteriormente, la vid es una de las plantas cultivadas más antiguas e históricamente se ha asociado con climas mediterráneos. Por ello, está especialmente adaptada al calor y tiene una gran resistencia a las condiciones de sequía, aunque también es capaz de vegetar en otras zonas (Hidalgo, 2006). Así, la vid se cultiva en muchos tipos de clima a lo largo de latitudes medias que presentan climas más fríos y húmedos de influencia marítima o atlántica, climas más continentales semiáridos (costa Este de EEUU) o húmedos subtropicales (Este de Australia). Dado que las variedades tienen diferentes ritmos de ciclos vegetativos, a escala mundial el promedio de las condiciones climáticas de una región vinícola son las que determinan en gran medida qué variedades plantar en cada región (Jones, 2003).

En España se encuentran viñedos tanto en zonas muy próximas a la línea costera, como en los valles interiores o en las laderas de montañas. Se suelen plantar las variedades más precoces en los terrenos menos soleados y las tardías en las localidades, pagos y predios mejor orientados, más térmicos y soleados (Jones y Davis, 2000). Según las características climáticas generales se distinguen distintos tipos de viñedos y de vinos. Así en España distinguiríamos los de transición mediterránea-continental (Rioja y Ribera del Duero), los continentales (Toro, Cariñena, Valdepeñas, La Mancha); los atlánticos húmedos (Albariños, Txakolis, vinos de riberas frescas como los de la Ribera Sacra); y los mediterráneos típicos, como los del Penedés.

Aunque los aspectos que tienen que ver con el clima están relacionados con varios factores desde la macroescala a la microescala climática, en general, la duración y las temperaturas en el periodo de crecimiento de la vid son aspectos críticos debido a su importante influencia en la maduración de la uva y en su calidad, y por lo tanto en la adaptación varietal al *terroir* específico. A lo largo de las diferentes etapas de desarrollo, las demandas de la vid en cuanto a luz solar, calor y agua varían. De hecho, se ha demostrado que el inicio, duración y desarrollo de las etapas fenológicas de la vid están profundamente ligados a las condiciones atmosféricas imperantes (Jones y Davis, 2000; Malheiro *et al.*, 2013), que también contribuyen a la variabilidad en el rendimiento de la vid (Bindi *et al.*, 1996; Santos *et al.*, 2011), la producción de vino (Camps y Ramos 2012; Santos *et al.*, 2013; Fraga *et al.*, 2014a) y la calidad (Jones *et al.*, 2004; Jones y Goodrich, 2008; Fraga *et al.*, 2014b).

La fenología del ciclo vegetativo de la vid es muy variable según las distintas comarcas, pagos, variedades, meteorología del año y tratamientos del cultivo. Dentro de una misma comarca, o de una misma zona de Denominación de Origen, existen variaciones significativas. Por ejemplo, en Castilla y León, el ciclo puede

oscilar desde 180 días, en las comarcas más frías y continentales, hasta 230 en las zonas más secas y soleadas; lo que da lugar a distintos tipos de vinos, más ácidos y afrutados en el primer caso y con mayor graduación de alcohol en el segundo (de Cara García, 2010). No obstante, hay zonas donde el ciclo ronda los 170 días (Michigan) o es superior a los 230 días como es el caso de Fresno (California) (Howell, 2001).

La temperatura media óptima durante la época de crecimiento es distinta para cada variedad, así por ejemplo es de unos 15 °C para Pinot Noir, 17,5 °C para Tempranillo, 18 °C para Cabernet Sauvignon y 18,2 °C para Garnacha (van Leeuwen y Seguin, 2006). Una de las limitaciones climáticas más conocidas de la vid es la temperatura base de 10 °C, necesaria para el inicio del ciclo anual (Winkler *et al.*, 1974). El número de grados día acumulados sobre el umbral de 10 °C desde la fase de yema hinchada hasta que se alcanza el 100% de la maduración del fruto, así como el número de días en los que se debe de acumular calor, es variable según las distintas variedades. Así, el índice de Winkler y Amerine (Winkler *et al.*, 1974) es uno de los más utilizados en la bibliografía hasta ahora. Este índice heliotérmico se basa en la acumulación de las “temperaturas medias diarias menos 10 °C, ($t_m - 10\text{ °C}$)” desde el día uno de abril hasta el día 30 de octubre. Por ejemplo, los vinos del Duero presentan índice de Winkler y Amerine de aproximadamente 1220°, en el Alto Ebro es de 1470°, en Cataluña de 1850° y en Andalucía 2600° (de Cara García, 2010). Además, para la caracterización climática de la vid se utilizan otros índices (Deloire *et al.*, 2005) como son el heliotérmico de Huglin Index (Huglin, 1978), el Cool Night Index (Tonietto y Carbonneau, 2004), los que se basan en las precipitaciones como el Dryness Index (Riou *et al.*, 1994) o los índices bioclimáticos (Fraga *et al.*, 2014c).

Numerosos estudios coinciden en la influencia positiva de la luz y la temperatura en la composición fenológica de la uva. La síntesis de antocianos

parece responder de forma positiva a la exposición de los racimos, pero de manera que mientras haya un umbral mínimo de insolación, la luz no parece ser un factor limitante (Bergqvist *et al.*, 2001). Sin embargo no ocurre así con la temperatura. La acumulación de antocianos en la uva se ve favorecida en un rango de temperaturas de entre 17 y 26 °C (Iland y Gago, 2002; Sadras *et al.*, 2007). A partir de esta temperatura, la síntesis de antocianos después de envero disminuye (Tarara *et al.*, 2008), incluso llegando a paralizarse a altas temperaturas (30-35 °C) (Spayd *et al.*, 2002; Mori *et al.*, 2007).

Otro factor fundamental es la precipitación y, por consiguiente, el estado hídrico de la vid. Los viñedos crecen en regiones donde la precipitación puede oscilar desde los 150 mm hasta los más de 1500 mm. De todas formas, el reparto de las lluvias durante el ciclo vegetativo es tanto o más importante que la pluviometría total de la zona. La vid, además, es resistente a la sequía por poseer raíces profundas por lo que, la capacidad de adaptación de la vid a condiciones pluviométricas diversas es muy alta. Dada la relevancia del agua en el desarrollo y crecimiento del cultivo así como en la calidad final de la uva, los efectos del riego sobre la calidad del fruto en la vid han sido estudiados ampliamente en diferentes zonas (Smart y Coombe, 1983; Williams y Matthews, 1990; Jackson y Lombard, 1993). En España, a finales del siglo XX e inicios del siglo XXI, se realizaron estudios en las principales comarcas vitícolas, como Rioja (García-Escudero *et al.*, 1991, 1996), Navarra (Santesteban y Royo, 2006) Ribera del Duero y Madrid (Sotés y Lissarrague, 1994; Bartolomé *et al.*, 1995), Priorato (Nadal y Arola, 1995), Mallorca (Escalona *et al.*, 1999), entre otros. Muchos de los resultados de estas investigaciones, coinciden en señalar como efectos del riego los incrementos de rendimiento significativos aunque dependientes de la variedad y de las condiciones edafo-climáticas del ensayo. La diversidad de los resultados es mucho más amplia y de signo contrapuesto según la variedad (Medrano *et al.*, 2003) y también en función de las condiciones del cultivo, las dosis y momento de riego

(García-Escudero, 1991; García-Escudero *et al.*, 1994; Delgado *et al.*, 1995 a, b; Escalona *et al.*, 1999; Chaves *et al.*, 2010).

Dada la importancia que tiene la disponibilidad hídrica durante la maduración de la baya (Figura 1.3) se han hecho varios estudios para evaluar su efecto.

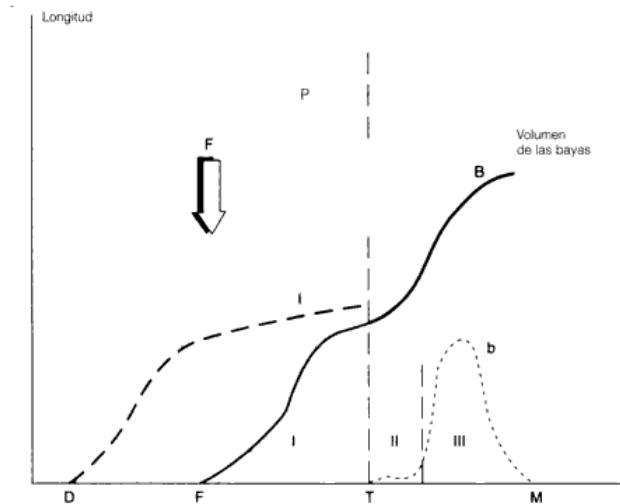


Figura 1.3. Crecimiento de la baya (B) desde la floración (F) al estado de madurez (M), y crecimiento de la inflorescencia (I) crecimiento diario (b) y fases del crecimiento de las bayas (I, II y III) (Fuente: Reynier, 2002).

El crecimiento de las bayas sigue una doble curva sigmoideal (Figura 1.3) como la mayoría de los frutos (Coombe, 1992). La Fase I o Fase herbácea se da después de la floración y está caracterizada por un rápido crecimiento por división y elongación. El pico de división celular se da aproximadamente 8 días después de floración y termina unos 30-40 días después de ésta (Jona y Botta, 1988). La Fase II o Fase de ralentización del crecimiento comienza cuando finaliza la Fase I y finaliza con el principio del envero. Se puede considerar como una Fase de transición entre la Fase I y la Fase III. Y por último la Fase III o Fase de

maduración se caracteriza por una segunda fase de crecimiento activo y este crecimiento se da únicamente por elongación (Ojeda *et al.*, 1999).

Muchos autores afirman (Matthews y Anderson, 1988; van Leeuwen y Seguin, 1994; Choné *et al.*, 2001; van Leeuwen *et al.*, 2004; van Leeuwen y Seguin, 2006; Castellarin *et al.*, 2007; Deluc *et al.*, 2009 y 2011; Kuhn *et al.*, 2014) que el estrés hídrico, en general, si es leve, puede acentuar la maduración temprana, lo que causaría efectos positivos como la reducción de la producción, del peso de la baya y del ácido málico debido a una mayor exposición del racimo a la radiación solar (por una menor superficie foliar) que provoca una combustión de estos ácidos, y un aumento de los azúcares y antocianos totales, lo que conlleva a una mejora de la calidad de la uva. Por otro lado, Matthews y Anderson (1989) observaron que el estrés en post envero con potenciales hídricos bajos (próximos a $-1,5\text{MPa}$), cuando tiene lugar la síntesis de los aromas, y en el caso de las uvas tintas también de los antocianos, puede tener una influencia negativa sobre la composición de las uvas y sobre la calidad de los vinos. Se podría concluir que, de forma general, un estrés hídrico moderado puede acelerar la acumulación de azúcar mientras que si éste es severo, la maduración puede verse perjudicada.

Jackson y Lombard (1993) sugirieron que una alta precipitación y un riego excesivo después de envero disminuyen la calidad de la uva, bien por una mayor incidencia de *Botrytis* y otras enfermedades fúngicas en las uvas o bien porque puede ralentizar y retrasar el proceso de la maduración, aumentando la producción en parte por el aumento de la baya (Smart y Coombe, 1983), disminuyendo así el potencial cualitativo de la uva. Así, el momento en el que la planta esté sometida a estrés hídrico, así como el grado de estrés, puede ser tan importante o más que la intensidad de dicho estrés.

Suelo

Como se ha mencionado anteriormente, dentro del *terroir*, el suelo es uno de los factores más importantes por su influencia sobre producción y calidad de uva; junto con el clima, la variedad y el manejo de la vegetación (van Leeuwen *et al.*, 2004). Es difícil separar el efecto del suelo del de otros factores como, por ejemplo, el clima (Conradie, 1998), de ahí la complejidad de entender el papel que juega el suelo sobre la calidad. Otro condicionante que puede dificultar conocer con exactitud la relación de este factor y la calidad del vino es el gran esfuerzo que supone realizar un buen estudio de suelos que permita estimar la variabilidad edáfica del viñedo. Una vez caracterizado el suelo, es necesario realizar trabajo de campo para ver cómo los distintos tipos de suelo afectan al rendimiento, calidad, etc. Para ello, lo ideal sería hacer ensayos con repeticiones en distintos suelos y varios años.

La viña puede crecer adecuadamente en un rango amplio de tipos de suelo, desde muy ácidos (pH por debajo de 6) como los que encontramos en el caso de Txakoli (DO Bizkaiko Txakolina, DO Getariako Txakolina y DO Arabako Txakolina) hasta básicos de la DOCa Rioja (pH=8-9). La vid ha solido implantarse en suelos pobres y con poca capacidad de retención hídrica, aunque hoy en día la podemos encontrar en suelos profundos, ricos en nutrientes y con alta capacidad hídrica.

Algunos autores defienden que las propiedades del suelo que tienen una mayor influencia en el crecimiento de la vid son aquellas que controlan el contenido de agua del suelo, propiedades físicas como la profundidad y la textura (Seguin, 1986; Choné *et al.*, 2001; Fraga *et al.*, 2014b). Así, éstas tienen un efecto directo en el equilibrio entre el vigor y la producción de uva (van Leeuwen y Seguin,

1994), y en consecuencia, también en la calidad de la uva y del vino (Esteban *et al.*, 2001; Gurovich y Páez, 2004; Ubalde *et al.*, 2010).

Además de las propiedades comentadas del suelo relacionadas con la capacidad hídrica, la disponibilidad de nutrientes en los suelos y su penetrabilidad son factores a tener en cuenta, ya que, influyen sobre el crecimiento de las raíces (Jackson y Lombard, 1993) y de la parte aérea. El suelo soporta el sistema radicular, que acumula carbohidratos, absorbe el agua y otros nutrientes, siendo a su vez, crucial para el crecimiento de la vid, la fisiología y las características productivas (Winkler *et al.*, 1974; Morlat y Jacquet, 2003). En este sentido, otra de las propiedades del suelo de especial relevancia es el contenido de materia orgánica, porque además de aportar nutrientes, afecta a la estructura, estabilidad y la retención de agua del suelo y, por tanto, a la infiltración y percolación del agua (Sarah, 2006; Unamunzaga *et al.*, 2014). A su vez, la densidad aparente es un buen indicador de la calidad del suelo, pues muestra el grado de compactación del mismo (Jones *et al.*, 2012).

Las características químicas del suelo y, por tanto, el estado nutricional del viñedo, pueden influir en la composición de la uva y, en consecuencia, en la calidad del vino (Mackenzie y Christy, 2005). Entre los nutrientes de más importancia para la vid se encuentran los macronutrientes como el nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K) y magnesio (Mg), ya que son aquellos que más extraen las plantas de vid. No obstante, es difícil establecer una relación directa entre un mineral concreto del suelo y la calidad del vino (Seguin, 1986), a menos que se produzcan deficiencias graves que puedan afectar a la vid (van Leeuwen *et al.*, 2004). Esto es debido a que influyen el resto de factores, tales como la climatología, las prácticas culturales (Champagnol, 1994; Failla *et al.*, 1995) y lo difícil que es tener en cuenta el volumen explorado por las raíces (Bould, 1966). Sin embargo, existen estudios que confirman, por ejemplo, un aumento del

contenido de K en hoja a medida que aumenta el nivel de K en suelo en viña (Bogoni *et al.*, 1995; Rupp, 1995). En algunas ocasiones también la concentración de K en fruto puede verse afectada positivamente por el contenido de K en suelo (Weibel, 1997; Dris y Niskanen, 1998). Existen pocos estudios bibliográficos que definan rangos óptimos de nutrientes en suelo en viñedo, puesto que la mayoría de los estudios de fertilización se basan en fijar valores de referencia en los tejidos de la planta, y en el momento adecuado del muestreo (Christensen *et al.*, 1978; Lalatta, 1988; Delas, 2000). El análisis foliar es un método ampliamente utilizado y fiable para evaluar el estado nutricional de la vid (Christensen, 1984; Lucena, 1997; Robinson, 2005; García-Escudero *et al.*, 2013) y complementa de forma muy útil la información aportada por el análisis del suelo. Ambos análisis son herramientas útiles para el diagnóstico nutricional. La concentración de nutrientes en la vid varía según el tejido analizado (Christensen, 1984; Champagnol, 1990; García-Escudero *et al.*, 2002; Robinson, 2005), la posición de la hoja (Walworth and Sumner, 1987; Delas, 2000; Romero *et al.*, 2010) y el momento de muestreo (Christensen, 1984; Delas, 2000; García-Escudero *et al.*, 2002; Robinson, 2005; Peuke, 2009). El potasio es el catión principal en el mosto (Mpelasoka *et al.*, 2003), y en concentraciones altas puede afectar negativamente a la calidad del vino. El aumento del K eleva el pH afectando negativamente a la estabilidad del vino, ya que es más susceptible a la oxidación (Somers, 1977), y provocando también una pérdida de color, ya que el grado de ionización de los antocianos desciende al aumentar el pH (Rühl, 2000). Un componente mineral que se puede correlacionar con la uva y la calidad del vino es el nitrógeno, puesto que en exceso confiere demasiado vigor a la planta y puede afectar el contenido en azúcar y compuestos fenólicos de las uvas (Choné *et al.*, 2001; Hilbert *et al.*, 2003; Ubalde *et al.*, 2010) retrasando la maduración (Keller *et al.*, 1999). Delgado *et al.* (2004) observaron que unas dosis elevadas de nitrógeno (200g N por viña) causaron un retraso significativo en la acumulación de azúcares durante la maduración en comparación con otros tratamientos con menor dosis (0 y 50g N

por viña). Además, el tratamiento en el que no se añadió nitrógeno acumuló mayor contenido de polifenoles totales en la piel que los tratamientos en los que se aplicó nitrógeno. Por tanto, un aumento del nitrógeno provocó una dilución de los polifenoles posiblemente por un aumento del tamaño de las bayas (Kliewer, 1977; Spayd *et al.*, 1994). Un exceso de nitrógeno también interfiere con las rutas metabólicas que conducen a la síntesis de los compuestos responsables del aroma y sabor de la baya (Bravdo y Hepner, 1987).

Una de las características más importantes de las propiedades físicas y químicas del suelo es la alta variabilidad espacial de las mismas. Esta variabilidad influye directamente sobre la calidad de la uva, ya que es un factor clave en el rendimiento y calidad del viñedo (Bramley y Lamb, 2003; Unamunzaga *et al.*, 2014), y por tanto, es imprescindible tenerla en cuenta a la hora de planear el manejo del cultivo, diseñar la plantación, el riego, elegir la variedad y el patrón, etc. Esta variabilidad espacial de los suelos es un hecho que todo agricultor conoce (Tardáguila y Diago, 2008), aunque tal vez no en su totalidad, puesto que en general desconoce hasta donde llegan las raíces, si el suelo tiene piedras o no, la profundidad del mismo, la existencia de horizontes impermeables, el contenido en nutrientes en profundidad, etc. Sin embargo, en muchos casos las prácticas vitícolas han sido uniformes y no han considerado la variabilidad espacial del viñedo. Estas prácticas uniformes han provocado una disminución de la eficacia productiva (por ejemplo al regar con la misma dosis zonas profundas y someras de un viñedo, o vendimiar a la vez toda la parcela, o fertilizar con la misma dosis zonas pobres y zonas fértiles), de la calidad de la uva, y de los beneficios económicos de la empresa. Es decir, si la variabilidad edáfica no se considera ni se gestiona de forma adecuada, la producción será heterogénea tanto desde el punto de vista productivo como cualitativo de la uva. Este resultado es limitante en la producción de vinos de calidad (Tardáguila y Diago, 2008).

La dificultad para medir esta variabilidad así como la ausencia de información y tecnología adecuada para detectar y registrar la variabilidad, han obstaculizado el desarrollo de la viticultura moderna. No obstante, en los últimos años, la viticultura de precisión y las técnicas geoestadísticas han permitido detectar y gestionar esta variabilidad espacial para así tener una mejor comprensión de la variabilidad del viñedo. Esto contribuye a una mayor eficacia desde el punto de vista productivo y de reducir costes e incrementar la cantidad y la calidad de la uva y del vino.

Futuros escenarios del cambio climático en el sector vitivinícola

Es importante adelantarse a las futuras condiciones climáticas para poder desarrollar estrategias de adaptación. Para ello es necesario conocer los escenarios del cambio climático esperados y cómo modificarán los parámetros más relevantes (CO₂, temperatura, etc.) y estudiar el posible impacto que puedan tener sus alteraciones en los viñedos.

La Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), en 1988, establecieron el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC) con la finalidad de analizar la información científica, técnica y socioeconómica relevante para comprender el cambio climático, sus causas, sus repercusiones y las estrategias de respuesta y adaptación. Actualmente, más de 190 países son miembros del IPCC, junto con las organizaciones observadoras (cuerpos y organizaciones de Naciones Unidas, Organismos Internacionales y ONGs).

El IPCC define el cambio climático como la variación del estado del clima, identificable (por ejemplo, mediante pruebas estadísticas) en las variaciones del valor medio o en la variabilidad de sus propiedades, que persiste durante largos períodos de tiempo, generalmente decenios o períodos más largos. El cambio climático puede deberse a procesos internos naturales o a forzamientos externos tales como modulaciones de los ciclos solares, erupciones volcánicas o cambios antropogénicos persistentes de la composición de la atmósfera o del uso del suelo (IPCC, 2013).

La concentración de CO₂ en la atmósfera ha aumentado por la actividad humana, fundamentalmente por el uso de combustibles fósiles y la deforestación. Las concentraciones actuales de CO₂, CH₄ (metano) y N₂O (óxido nitroso) exceden sustancialmente el rango de concentraciones registradas en los testigos de hielo durante los últimos 800.000 años, ya que, el ritmo de incremento de las concentraciones en la atmósfera de estos gases en el siglo pasado no tiene precedente en los últimos 22.000 años. La temperatura media global muestra un incremento de 0,85 °C (entre 0,65 °C y 1,06 °C) en el periodo 1880-2012 (IPCC, 2013). En el hemisferio norte, posiblemente 1983-2012 fuera el periodo de 30 años más cálido de los últimos 800 años. El número de días y noches frías ha disminuido y el número de días y noches cálidas ha aumentado a nivel global. Es probable que para finales del siglo XXI, la temperatura global en superficie sea superior en 1,5-2 °C a la del período entre 1850 y 1900, mostrando una variabilidad entre interanual y decenal que no será uniforme entre las regiones. La precipitación ha aumentado en las zonas terrestres de latitudes medias del hemisferio norte desde 1950. Además, se han observado cambios en los episodios extremos desde 1950. Durante el siglo XXI, se espera que se acentúe el contraste en las precipitaciones entre las regiones húmedas y secas, pudiendo haber excepciones regionales (IPCC, 2013).

En el año 2007, se le concedió al IPCC el Premio Nobel de la Paz y se aprobó el Cuarto Informe de Evaluación (AR4), proceso que culminó en la reunión celebrada en noviembre de ese año en Valencia (España). Hoy en día, el Quinto Informe de Evaluación (AR5), del año 2013, proporciona la más actualizada valoración y síntesis de los conocimientos sobre los aspectos científicos, técnicos y socioeconómicos del cambio climático. Según dicho informe, el calentamiento en el sistema climático es inequívoco. Las emisiones de CO₂ acumuladas determinarán en gran medida el calentamiento medio global en superficie a finales del siglo XXI y posteriormente. La mayoría de los aspectos del cambio climático perdurarán durante muchos siglos, incluso aunque pararan las emisiones de CO₂, lo que supone una notable inexorabilidad del cambio climático, debido a las emisiones de CO₂ pasadas, presentes y futuras.

Las emisiones futuras de gases de efecto invernadero (GEI) son el producto de muy complejos sistemas dinámicos, determinados por fuerzas tales como el crecimiento demográfico, el desarrollo socioeconómico o el cambio tecnológico. Por todo ello, su evolución futura es muy incierta. En 2007, el IPCC generó unos escenarios de cambio climático recogidos en el AR4. Los escenarios son imágenes alternativas de lo que podría acontecer en el futuro, y constituyen un instrumento apropiado para analizar de qué manera influirán las fuerzas determinantes en las emisiones futuras, y para evaluar el margen de incertidumbre de dicho análisis. Los escenarios son de utilidad para el análisis del cambio climático, y en particular para la creación de modelos del clima, para la evaluación de los impactos y para las iniciativas de adaptación y de mitigación.

Los escenarios de emisión utilizados en el AR4, no contemplaban los efectos de las posibles políticas o acuerdos internacionales que restringieran las emisiones. Estos escenarios del AR4 estaban agrupados en cuatro familias (A1, A2, B1 y B2) que incorporaban toda una serie de fuerzas causantes demográficas,

económicas y tecnológicas, junto con las emisiones de GEI resultantes. Así resultaron en 6 escenarios conocidos como B1, A1T, B2, A1B, A2 y A1FI ordenados del escenario más favorable al menos favorable.

La línea argumental A1 presupone un crecimiento económico mundial muy rápido, un máximo de la población mundial hacia mediados de siglo, y una rápida introducción de tecnologías nuevas y más eficientes. Se divide en tres grupos, que reflejan tres direcciones alternativas de cambio tecnológico: intensiva en combustibles fósiles (A1FI), energías de origen no fósil (A1T), y equilibrio entre las distintas fuentes (A1B). A2 describe un mundo muy heterogéneo con crecimiento de población fuerte, desarrollo económico y cambios tecnológicos lentos. B1 describe un mundo convergente, con la misma población mundial que A1, pero con una evolución más rápida de las estructuras económicas hacia una economía de servicios y de información. B2 describe un planeta con una población y un crecimiento económico intermedios, más orientada a las soluciones locales para alcanzar la sostenibilidad económica, social y medioambiental (IPCC, 2007).

En esta Tesis se ha trabajado con los escenarios del AR4 (IPCC, 2007), puesto que eran los vigentes durante el desarrollo de la misma. Además, se disponía de una red de datos climáticos de 25km x 25km de estos mismos escenarios, de los que se dedujeron las condiciones climáticas previstas para el periodo de 2070-2100 según el IPCC. Estas condiciones climáticas serían una concentración de CO₂ de hasta 700 ppm y un aumento de la temperatura de 4 °C en la época estival para las cuadrículas de estudio (País Vasco, Navarra y La Rioja).

Actualmente, se han implantado unos nuevos escenarios comprendidos en el AR5, que contemplan los efectos de las políticas orientadas a limitar el cambio climático del siglo XXI. Los cuatro nuevos escenarios de emisión (Figura 1.4) son

las denominadas Sendas Representativas de Concentración (RCP, de sus siglas en inglés, Representative Concentration Pathways). Éstas se identifican por su forzamiento radiativo (FR) total para el año 2100 que varía desde 2,6 a 8,5 W m⁻². Como concepto general, el forzamiento radiativo en clima significa cualquier cambio en la radiación (calor) entrante o saliente de un sistema climático desde el año 1750 y se expresa como el cambio en la irradiación neta vertical (expresado en W m⁻²). Este FR puede ser debido a un cambio interno o un cambio en el forzamiento externo del sistema climático como por ejemplo, un cambio en la concentración de dióxido de carbono o la potencia del sol respectivamente. Por lo que sí es positivo conduce a un calentamiento mientras que si es negativo se traduce a un enfriamiento.

	FR	Tendencia del FR	[CO ₂] en 2100
RCP2.6	2,6 W/m ²	decreciente en 2100	421 ppm
RCP4.5	4,5 W/m ²	estable en 2100	538 ppm
RCP6.0	6,0 W/m ²	creciente	670 ppm
RCP8.5	8,5 W/m ²	creciente	936 ppm

Figura 1.4. Escenarios del AR5

Estos cuatro RCPs incluyen un escenario de mitigación con un nivel bajo de forzamiento radiativo (RCP2.6), dos escenarios de estabilización (RCP4.5 y RCP6.0), y un escenario con las emisiones de gases de efecto invernadero muy altas (RCP8.5), que representan una serie de diferentes políticas climáticas para el siglo XXI. Cada RCP proporciona datos con resolución espacial de cambios de uso del suelo y las emisiones de contaminantes atmosféricos, y especifica las concentraciones de gases de efecto invernadero y las emisiones antropogénicas anuales hasta el año 2100 (Figura 1.5).

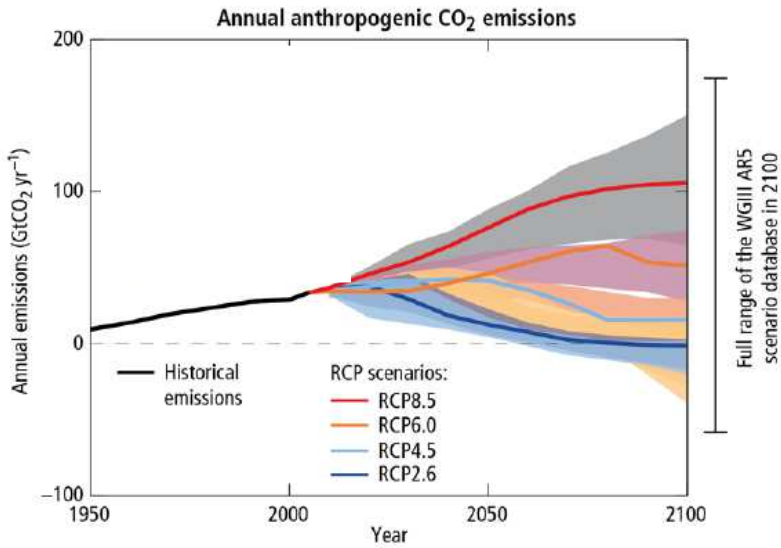


Figura 1.5. Emisiones de CO₂ en las diferentes RCPs.

En cuanto a las proyecciones futuras de cambio climático a nivel regional, en la Región Mediterránea (Figura 1.6) tendrá lugar un incremento de temperatura superior a la media global, más pronunciado en los meses estivales que en los invernales. Por ejemplo, para el escenario RCP8.5 y para finales del siglo XXI, la Región Mediterránea experimentará incrementos medios de temperatura de 3,8 °C y de 6,0 °C en los meses invernales y estivales, respectivamente.

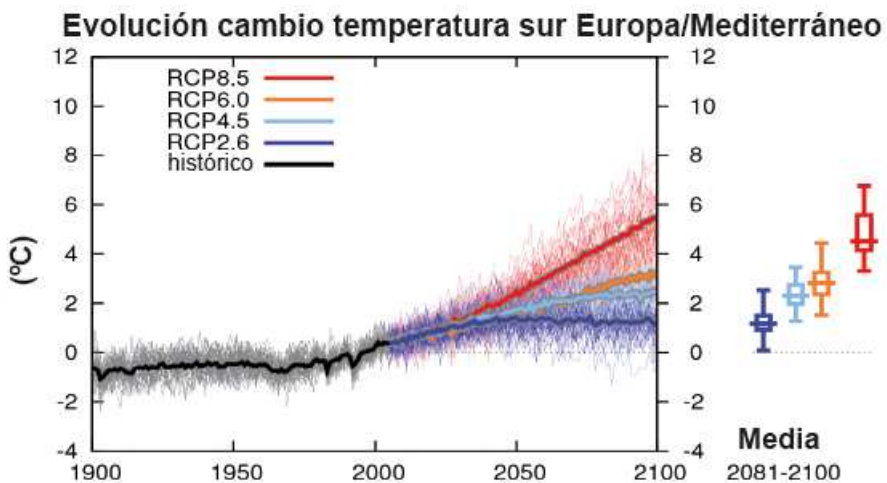


Figura 1.6. Cambio estimado de la temperatura anual media en el sur de Europa y la Región Mediterránea para distintos escenarios de emisión.

Además, habrá una reducción de la precipitación anual sobre la península Ibérica, que será más acusada cuanto más al sur, y las precipitaciones se reducirán fuertemente en los meses estivales. Para el escenario RCP8.5 y para finales del siglo XXI, la Región Mediterránea experimentará reducciones medias de precipitación del 12% y del 24% en los meses invernales y estivales, respectivamente y un aumento de los extremos relacionados con las precipitaciones de origen tormentoso.

Justificación de la Tesis

El sector vitivinícola en España tiene una gran relevancia tanto por el valor económico que genera como por la población que ocupa, y también por el importante papel que desempeña en la conservación del medio ambiente. Como ejemplo de la importancia económica, en Rioja Alavesa el 15% del producto interior bruto (PIB) de la comarca comprende a ese sector, llegando a un 50% según ciertos estudios si incluimos la industria auxiliar (Gobierno Vasco, 2011-2012). Además, el 95% de la Producción Final Agraria (PFA) en esta comarca lo aportan la uva y el vino, con una superficie agraria útil de más del 80% dedicada a la viticultura. Rioja Alavesa se caracteriza porque prevalecen parcelas pequeñas (94% < 1ha) y la variedad predominante es Tempranillo, con un porcentaje de representatividad del 90% entre las variedades tintas (DOCa Rioja www.riojawine.com). En esta comarca existen 385 bodegas elaboradoras, de las cuales 264 comercializan directamente su producción embotellada, y dentro de ellas 148 son de crianza.

El cultivo de la vid como cualquier otra actividad, conlleva un impacto ambiental, pero con un manejo más sostenible, dicho impacto puede verse reducido de forma notoria. La erosión y degradación del suelo destacan entre las consecuencias negativas del cultivo (García-Ruiz, 2010), seguido por las

emisiones de gases de efecto invernadero derivados de las operaciones de cultivo, la ecotoxicidad debida al uso de fitosanitarios y por último, por el impacto ambiental relacionado con los residuos generados.

El viñedo y su producto final que es el vino, están condicionados por varios factores y algunos de ellos relacionados, entre los que destacarían la economía actual (globalización), el clima y el suelo. En cuanto al factor socioeconómico, el proceso de globalización imperante y el contexto económico actual de crisis implican una mayor competencia en el mercado. La caída del consumo tanto en España como en los países tradicionalmente productores y consumidores del sur de Europa, junto con la eliminación de algunas medidas de regulación de los mercados, así como el nuevo Real Decreto 288/2015 del 17 de abril del potencial vitícola, han hecho y harán que, cada vez más, un mayor volumen de vinos en nuestro país se dediquen a la exportación (MEC, 2012). Existe también una sobreoferta en el mercado, tanto en volumen de vino ofrecido, como en número de bodegas y marcas. Por todo ello, los vinos tendrán que competir en calidad y precio, y adaptarse a otros mercados para atraer a nuevos tipos de consumidores. Esta situación es incluso más acentuada en Rioja Alavesa, donde se sitúan el 45% de las bodegas de la DOCa Rioja frente a un 20% de la superficie. La estructura del sector vitivinícola en esta comarca, como ya se ha comentado, es particular debido a la atomización y porque la amplia mayoría de las bodegas son de pequeño tamaño (con menos de 10 trabajadores). Por otra parte, debido al periodo de crisis vivida y del que se está recuperando muy lentamente este sector, han ido desapareciendo bodegas familiares que ahora venden sus uvas a bodegas más grandes, ya que no han podido competir en precio con éstas. El liderazgo de la DOCa Rioja ha sido determinante en toda la geografía española, líder tanto en los establecimientos de venta para el consumo de vino en casa como en el canal de la hostelería, restauración y catering (Nielsen, 2010). Su persistencia en esta posición a lo largo de los años ha hecho que los consumidores vinculen la palabra

calidad a los vinos que provienen de esta denominación (Castillo-Valero y Compés-López, 2014). No obstante, los movimientos en el interior de la denominación en busca de una mejor identidad y los nuevos cambios e incertidumbres descritos anteriormente abren nuevos retos para mantenerse a la vanguardia de la innovación vitivinícola con una gran diversidad de vinos con personalidad diferenciada para poder tener así éxito en los mercados. La atención constante hacia la mejora en la calidad de los vinos, en un creciente contexto de comparación y competición en los mercados internacionales, ha determinado en el último decenio una fuerte integración de la actividad entre el campo y la bodega, enfatizando la calidad de la uva. Es conocido que el enólogo, con una cuidadosa vinificación, puede valorizar la materia prima siempre dentro del límite ligado a la calidad de la uva. Sin embargo, partiendo de regulares o malas uvas, nunca se puede lograr un excelente vino, por mucho que el enólogo y la tecnología disponible se apliquen en su elaboración (Hidalgo, 2006).

Además de los factores socio-económicos, cabe destacar factores vitícolas como el clima y el suelo. En relación al clima y el suelo, es muy importante tener en cuenta las oportunidades y riesgos que puede originar el cambio climático. En el caso de España se ha constatado que particularmente desde la década de los 70 del siglo XX, las temperaturas han aumentado de forma general con una magnitud algo superior a la media global del planeta, mientras que las precipitaciones durante este periodo han tendido a la baja, sobre todo en la parte meridional (Moreno *et al.*, 2005). Actualmente, preocupan las estimaciones de los modelos de predicción que prevén un mayor calentamiento, y muy probablemente una mayor intensidad de fenómenos climáticos adversos en el sistema climático mundial durante el siglo XXI con respecto a los observados durante el siglo XX (Meehl *et al.*, 2007). En este sentido, en los últimos años se vienen observando ciertos cambios en el proceso de maduración que pueden estar relacionados con el

cambio climático y a su vez afectan de una forma relevante a la calidad de las uvas y como consecuencia, a la del vino.

Obviamente, en las actuales zonas de producción estos cambios podrían tener importantes consecuencias tanto en la calidad de la uva como en el potencial productivo de la misma, influyendo de forma determinante en el rendimiento económico de la explotación y en la capacidad del sector vinícola de competir en el mercado. Sin embargo, estos cambios también podrían ocasionar la plantación de viñedos y elaboración de vinos donde antes no era posible por causas climáticas, incluso en países con escasa tradición, lo que daría más complejidad al mercado actual del vino. Como ya se ha comentado, para hacer frente a las futuras situaciones es imprescindible que la enología y la viticultura vayan de la mano. El conocimiento del viñedo empieza por el conocimiento del ciclo vegetativo y los factores que influyen en cada una de las fases del desarrollo de la vid, siendo clave conseguir un equilibrio entre el desarrollo vegetativo y la producción para obtener una uva de calidad. El desarrollo de cada una de las fases del ciclo vegetativo viene determinado por la temperatura y la precipitación, por eso es importante disponer de escenarios lo más precisos posible del futuro clima, y conocer su influencia sobre el comportamiento del viñedo. Hoy en día, aún se desconoce si los cambios serán tan significativos como para que el sector vitícola tenga que asumir estrategias de adaptación. Para ello, es muy importante primero evaluar todos los escenarios posibles de forma que el sector y las administraciones cuenten con información que pueda servir para tomar decisiones en los próximos años. Prueba de la importancia que despierta el citado cambio climático es la existencia de un grupo de trabajo estable denominado sostenibilidad ambiental y cambio climático en la Plataforma Tecnológica del Vino (PTV), cuyo objetivo es aportar soluciones tecnológicas estratégicas para el sector. Esta plataforma cuenta con un total de 256 entidades inscritas (bodegas, consejos reguladores, universidades, fundaciones, centros tecnológicos, asociaciones empresariales,

empresas y profesionales) y con el apoyo de los Ministerios de Ciencia e Innovación y de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino de España.

Como se ha comentado anteriormente, además del clima, el suelo es otro de los factores del medio vitícola que afecta al viñedo. Así, la vid puede crecer en un amplio abanico de tipos de suelo y posee un comportamiento muy distinto en cada uno de ellos. El efecto del suelo en el comportamiento de la viña y en la composición de la uva es complejo, ya que, el suelo influye sobre las condiciones de absorción de agua y minerales por parte de la vid, así como sobre la profundidad de sus raíces y sobre la temperatura en la zona radicular (van Leeuwen y Seguin, 2006). En este sentido, el vino es sin duda uno de los productos agrícolas que mejor refleja las condiciones ambientales, sociales y económicas bajo las cuales se cultivan la materia prima de la cual procede el producto (Dougherty, 2012). Por ello puede convertirse en un excelente medio de transmisión de la importancia que el suelo tiene en nuestra sociedad. Así, el vino es uno de los pocos productos agroalimentarios en el que se transmite información del medio a través de la etiqueta, donde no es raro ver detallados algunas propiedades del suelo en la botella. La Estrategia Temática sobre el Suelo de la Unión Europea hace hincapié en la falta de concienciación pública sobre la importancia del suelo y la necesidad de proteger este importante recurso (Jones *et al.*, 2012). En este sentido, el sector del vino puede ser un vehículo importante de visibilidad para los suelos. Como ejemplo del interés que suscita conocer el suelo en el sector vitivinícola destaca el mapa de suelos de Rioja Alavesa donde se describen las 21 unidades cartográficas más representativas de la región. Además de la necesidad de profundizar en el conocimiento sobre cómo influye el suelo en la calidad, actualmente el siguiente desafío será conocer cómo va a afectar el cambio climático al viñedo en dichos suelos. Para ello es fundamental conocer la situación actual para afrontar la adaptación ante los cambios venideros.

Objetivos de la Tesis

Generales y específicos

Los objetivos generales y específicos de esta Tesis han sido evaluar:

-La influencia de la variabilidad edáfica y climática existente en una bodega cooperativa de Rioja Alavesa sobre la calidad de uva de la variedad Tempranillo.

-Determinar la influencia de los distintos tipos de suelo establecidos en una bodega cooperativa según el mapa de suelos de Rioja Alavesa 1:50.000 sobre la calidad de la uva en el período 2009-2011.

-Determinar la influencia de dos zonas climáticas diferenciadas en los viñedos de una cooperativa (1971-2007) que abarcan un territorio de 50km² y 200m de diferencia en altitud entre la cota más baja y más alta sobre la calidad de la uva en el período 2009-2011.

-La influencia del cambio climático previsto para final de siglo XXI (CO₂ elevado, temperatura elevada y humedad relativa reducida) sobre la vid (*Vitis vinífera* L.) cv. Tempranillo cultivado bajo dos escenarios diferentes de precipitación y suelos con distinta composición textural en condiciones controladas de invernadero.

-Evaluar la influencia del aumento de la temperatura y CO₂ y bajada de la humedad relativa previstas para el periodo 2070-2100 sobre la fisiología, rendimiento, calidad y situación nutricional de la vid variedad Tempranillo en Rioja.

-Evaluar la influencia del aumento del estrés hídrico estimado para el periodo 2070-2100 en Rioja sobre la fisiología, rendimiento, calidad y situación nutricional de la vid variedad Tempranillo.

-Evaluar la influencia de la composición textural de los suelos sobre la fisiología, rendimiento, calidad y situación nutricional de la vid variedad Tempranillo.

-Evaluar la interacción de los tres factores estudiados sobre la fisiología, fenología, calidad y situación nutricional de la vid variedad Tempranillo.

Bibliografía

- Angulo, A.M., Gil, J.M., Gracia, A., Sánchez, M. 2000. "Hedonic prices for Spanish red quality wine", *British Food Journal* 102(7): 481–493.
- Bartolomé, M.C., Sotés, V., Baeza, P., Ruiz, C., Lissarrague, J.R. 1995. Efectos del déficit hídrico sobre el desarrollo vegetativo y fructífero del cultivar "Tempranillo" de vid (*Vitis vinifera* L.). *Investigación Agraria: Producción y Protección Vegetales* 10(2): 245–261.
- Bergqvist, J., Dokoozlian, N., Ebisuda, N. 2001. Sunlight exposure and temperature effects on berry growth and composition of Cabernet Sauvignon and Grenache in the central San Joaquin Valley of California. *American Journal of Enology and Viticulture* 52(1): 1–7.
- Bindi, M., Fibbi, L., Gozzini, B., Orlandini, S., Miglietta, F. 1996. Modelling the impact of future climate scenarios on yield and yield variability of grapevine. *Climate Research* 7: 213–224.
- Bogoni, M., Panont, A., Valenti, L., Scienza, A. 1995. Effects of soil physical and chemical conditions on grapevine nutritional status. *Acta Horticulturae* 383: 299–311.
- Bould, C. 1966. Leaf analysis of deciduous fruits. En: *Temperate to tropical fruit nutrition*. pp. 651–684. Ed. N.F. Childers, Horticultural Publications. Rutgers University, New Brunswick, New Jersey, USA.
- Bramley, R.G.V., Lamb, D.W. 2003. Making sense of vineyard variability in Australia. In: *Precision viticulture* (eds R. Ortega & A. Esser), pp. 33–54. Proceedings of an international symposium held as part of the IX Congreso Latinoamericano de Viticultura y Enología, Chile. Centro de Agricultura de Precisión, Pontificia Universidad Católica de Chile, Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal, Chile.
- Bravdo, B., Hepner, Y. 1987. Irrigation management and fertigation to optimise grape composition and vine performance (Review). *Acta Horticulturae* 206: 49–67.
- Camps, J.O., Ramos, M.C. 2012. Grape harvest and yield responses to inter-annual changes in temperature and precipitation in an area of north-east Spain with a Mediterranean climate. *International Journal of Biometeorology* 56: 853–864.
- Castellarin, S., Matthews, M., Gaspero, G., Gambetta, G. 2007. Water deficits accelerate ripening and induce changes in gene expression regulating flavonoid biosynthesis in grape berries. *Planta* 227: 101–112.
- Castillo-Valero, J.S., Compés López, R. 2014. La economía del vino en España y en el mundo. *Cajamar*, pp. 737. *Caja Rural* (ed.), Serie economía, 23.
- Champagnol, F. 1990. Rajeunir le diagnostic foliaire. *Progrés Agricole et viticole* 107: 343–351.

- Champagnol, F. 1994. Facteurs agronomiques de l'acidité des moûts et des vins. *Progrés Agricole et Viticole* 111(21): 469–481.
- Chaves, M.M., Zarrouk, O., Francisco, R., Costa, J.M., Santos, T., Regalado, A.P., Rodrigues, M.L., Lopes, C.M. 2010. Grapevine under deficit irrigation: hints from physiological and molecular data. *Annals of Botany* 105: 661–676.
- Choné, X., Van Leeuwen, C., Chery, P.H., Ribéreau-Gayon, P. 2001. Terroir influence on water status and nitrogen stratus on non irrigated Cabernet-Sauvignon (*Vitis Vinifera*): vegetative development, must and wine composition. *South African Journal for Enology and Viticulture* 22: 8–15.
- Christensen, L.P., Kasimatis, A.N., Jensen, F.L. 1978. Grapevine nutrition and fertilization in the San Joaquin Valley Agricultural Sciences Publications 4087. University of California. Berkeley. USA.
- Christensen, L.P. 1984. Nutrient level comparison of leaf petioles and blades in twenty-six grape cultivars over three years (1979 through 1981). *American Journal of Enology and Viticulture* 35: 124–133.
- Conradie, W.J. 1998. The effect of soil and climate on the character of Sauvignon blanc wine. En: *Proceedings. SASEV Congress. Noviembre 1998. Cape Town, South Africa.*
- Coombe, B.G. 1992. Research on the development and ripening of the grape berry. *American Journal of Enology and Viticulture* 43(1): 101–110.
- Cortell, J.M., Sivertsen, H.K., Kennedy, J.A., Heymann, H. 2005. Influence of vine vigor on Pinot noir fruit composition, wine chemical analysis, and wine sensory attributes. *American Journal of Enology and Viticulture* 59: 1–10.
- de Cara García, J.A. 2010. AEMET Características agroclimáticas de la vid (*Vitis vinifera* L. subsp. *vinifera*). Servicio de Aplicaciones Agrícolas e Hidrológicas. AEMet. <http://www.divulgameteo.es/uploads/Caracter%C3%ADsticas-vid.pdf> accedido 15/09/2015.
- Delas, J. 2000. La fertilisation de la vigne. *Collection des Usuels Féret de la Vigne et du Vin*. Pp. 159. Editions Féret. Bordeaux, France.
- Delgado, E., Aguiló, F., Alorda, M., Diez, C. 1995a. Water stress and fruit quality in two cultivars of *Vitis vinifera* L. En: *Current trends in fruit and vegetables phytochemistry*, pp. 99–104. Ed. San Miguel, España.
- Delgado, E., Vadell, J., Aguiló, F., Escalona, J.M., Medrano, H. 1995b. Irrigation and grapevine photosynthesis. In: *Photosynthesis: from Light to Biosphere vol. IV* P. Mathis (ed.), pp. 693–696. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.

- Delgado, R., Martín, P., del Álamo, M., González, M.R. 2004. Changes in the phenolic composition of grape berries during ripening in relation to vineyard nitrogen and potassium fertilisation rates. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 84: 623–630.
- Deloire, A., Vaudour, E., Carey, V., Bonnardot, V., Van Leeuwen, C. 2005. Grapevine responses to terroir: a global approach. *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin* 39(4): 149–162.
- Deluc, L., Quilici, D., Decendit, A., Grimplet, J., Wheatley, M., Schlauch, K., Merillon, J., Cushman, J., Cramer, G. 2009. Water deficit alters differentially metabolic pathways affecting important flavor and quality traits in grape berries of Cabernet Sauvignon and Chardonnay. *BMC Genomics* 10: 212.
- Deluc, L., Decendit, A., Papastamoulis, Y., Merillon, J., Cushman, J., Cramer, G. 2011. Water deficit increases stilbene metabolism in Cabernet Sauvignon berries. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 59: 289–297.
- DOCa Rioja. Consejo Regulador de la DOCa Rioja. 2015. www.riojawine.com accedido 15/19/2015.
- Dougherty, P. H. 2012. *The Geography of Wine: Regions, Terroir and Techniques*. Springer, (ed) Netherlands. 255 pp.
- Dris, R., Niskanen, R. 1998. Nutritional status of commercial apple orchards in the Aland Islands. *Acta Agriculturae Scandinavica* 48: 100–106.
- Duchêne, E. 2016. How can grapevine genetics contribute to the adaptation to climate change? *OENO One* 50(3): 113–124.
- Escalona, J.M, Flexas, J., Schultz, H.R., Medrano, H. 1999. Effect of moderate irrigation on aroma potential and other markers of grape quality. *Acta Horticulturae* 493: 261–267.
- Esteban, M. A., Villanueva, M. J., Lissarrague, J. R. 1999. Effect of irrigation on changes in berry composition of Tempranillo during maturation. Sugars, organic acids and mineral elements. *American Journal of Enology and Viticulture* 50: 418–434.
- Esteban, M., Villanueva, M.J., Lissarrague, J.R. 2001. Effect of irrigation on changes in the anthocyanin composition of the skin of cv. Tempranillo (*Vitis vinifera* L.) grape berries during ripening, *Journal of the Science of Food and Agriculture* 81(4): 409–420.
- Failla, O., Scienza, A., Stringari, G., Porro, D., Tarducci, D., Dionosio, A. 1995. Indagine sullo statu nutrizionale dei vigneti in alcune zone toscane a denominazione d'origine per una proposta d'interpretazione delle analisi flogiari e del terreno. *Vigne Vini. Supplement. 12*: 15–25.

- Falcetti, M. 1994. Le Terroir. Qu'est-ce qu'un terroir? Pourquoi l'étudier? Pourquoi l'enseigner? Bull. O.I.V. 67: 246–275.
- Fraga, H., Malheiro, A.C., Moutinho-Pereira, J., Santos, J.A. 2013. An overview of climate change impacts on European viticulture. Food Energy Security 1: 94–110.
- Fraga, H., Malheiro, A.C., Moutinho-Pereira, J., Santos, J.A. 2014a. Climate factors driving wine production in the Portuguese Minho region. Agricultural and Forest Meteorology 185: 26–36.
- Fraga, H., Malheiro, A.C., Moutinho-Pereira, J., Cardoso, R.M., Soares, P.M.M., Cancela, J.J., Pinto, J.G., Santos, J.A. 2014b. Integrated analysis of climate, soil, topography and vegetative growth in Iberian viticultural regions. PLoS ONE 9(9): e108078. doi:10.1371/journal.pone.0108078.
- Fraga, H., Malheiro, A.C., Moutinho-Pereira, J., Jones, G.V., Alves, F., Pinto, J.G., Santos, J.A. 2014c. Very high resolution bioclimatic zoning of Portuguese wine regions: present and future scenarios. Regional Environmental Change 14: 295–306.
- García-Escudero, E., Santamaría, P., López, R., Palacios, I. 1991. Aplicación de dosis moderadas de agua en el proceso de maduración del cv. Tempranillo en Rioja. Vitivinicultura 2(1): 30–34.
- García-Escudero, E. 1991. Influencia de la dosis y del momento de aplicación del riego sobre la producción, desarrollo vegetativo, calidad del mosto y nutrición mineral de la vid. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid.
- García-Escudero, E., Martínez, F., Lissarrague, J.R., Sotés, V. 1994. Influencia del momento de aplicación del riego sobre la producción y calidad del mosto. Vitivinicultura 1-2: 49–54.
- García-Escudero, E., López, R., Santamaría, P., Zaballa, O., Arroyo, M.C. 1996. Experiencias de riego de apoyo en invierno sobre cv Tempranillo. Vitic./Enol. Profesional 44: 16–23.
- García-Escudero, E., Zaballa, O., González, G., Villar, M.T., Arroyo, M.C. 2002. Variación de la composición mineral de las hojas de cv. Tempranillo según el órgano analizado y la época de muestreo. III Foro Mundial del Vino. Rioja III Milenio, Albelda, 23-25 de mayo.
- García-Escudero, E., Romero, I., Benito, A., Dominguez, N., Martín, I. 2013. Reference levels for leaf nutrient diagnosis of cv. 'Tempranillo' grapevine (*Vitis vinifera* L.) in the Rioja Appellation. Communications in Soil Science and Plant Analysis 44: 645–654.
- García-Ruiz, J. M. 2010. The effects of land uses on soil erosion in Spain: A review. Catena 81: 1–11.
- Gobierno Vasco. 2011-2012. Plan Estratégico del sector Vitivinícola de la Comunidad Autónoma del País Vasco, 2011-2012.

- Gurovich, L.A., Páez, C.I. 2004. Influencia del riego deficitario controlado sobre el desarrollo de las bayas y la composición química de los mostos y vinos. *Ciencia e investigación agraria* 31(3): 175–186.
- Hidalgo, J. 2006. La calidad del vino desde el viñedo. pp. 390. Ed. Mundi-Prensa, Madrid, España.
- Hilbert, G., Soyer, J.P., Molot, C., Giradoun, J., Milin, S., Gaudillere, J.P. 2003. Effects of nitrogen supply on must quality and anthocyanin accumulation in berries of cv. Merlot. *Vitis* 42(2): 69–76.
- Howell, G.S. 2001. Sustainable grape productivity and the growth-yield relationship: A review. *American Journal of Enology and Viticulture* 52(3): 165–174.
- Huglin, P. 1978. Nouveau mode d'évaluation des possibilités héliothermiques d'un milieu viticole. *Comptes Rendus de l'Académie d'Agriculture. Académie d'agriculture de France* 64(13): 1117–1126.
- Ibáñez, J., Muñoz-Organero, G., Zinelabidine, L.H., de Andrés, M.T., Cabello, F., Martínez-Zapater, J.M. 2012. Genetic Origin of the Grapevine Cultivar Tempranillo. *American Journal of Enology and Viticulture* 63(4): 549–553.
- Iland, P., Gago, P. 2002. Australian Wine: Styles and Tastes. Ed. Patrick Iland Wine Promotions, Campbelltown.
- IPCC. 2007. Climate change and its impacts in the near and long term under different scenarios. In: Pachauri RK, Reisinger A (eds) *Climate change 2007: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Core Writing Team*. IPCC, Geneva.
- IPCC. 2013. *Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge. 1535pp.
- Jackson, D.I., Lombard, P.B. 1993. Environmental and management-practices affecting grape composition and wine quality - A review. *American Journal of Enology and Viticulture*. 44: 409–430.
- Jona, R., Botta, R. 1988. Fruit set and early berry development in two grapevine cultivars. *Israel Journal of Botany* 37(2–4): 203–216.
- Jones, G.V., Davis, R.E. 2000. Climate influences on grapevine phenology, grape composition, and wine production and quality for Bordeaux, France. *American Journal of Enology and Viticulture* 51: 249–261.

- Jones, G.V. 2003. Paper 4 from the “Terroir, geology and wine: A tribute to Simon J. Haynes” Session Held at the Geological Society of American Annual Meeting Seattle, Washington, November 2: 1–14.
- Jones, G.V., White, M.A., Cooper, O. 2004. Climate change and global wine quality. *Bulletin of the American Meteorological Society* 85: 504–504.
- Jones, G.V., Goodrich, G.B. 2008. Influence of climate variability on wine regions in the western USA and on wine quality in the Napa Valley. *Climate Research* 35: 241–254.
- Jones, A., Panagos, P., Barcelo, S., Bouraoui, F., Bosco, C., Dewitte, O., et al. 2012. The state of soil in Europe. JRC Reference Reports. 80pp.
- Keller, M., Pool, R.M., Henick-Kling, T. 1999. Excessive nitrogen supply and shoot trimming can impair colour development in Pinot noir grapes and wine. *Australian Journal of Grape and Wine Research* 5: 45–55.
- Keller, M. 2010. Managing grapevines to optimise fruit development in a challenging environment: a climate change primer for viticulturists. *Australian Journal of Grape and Wine Research* 16: 56–69.
- Kennedy, J. A., Matthews, M. A., Waterhouse, A. L. 2002. Effect of maturity and vine water status on grape skin and wine flavonoids. *American Journal of Enology and Viticulture* 53: 268–274.
- Kliwer, W.M. 1977. Influence of temperature, solar radiation and nitrogen on coloration and composition of Emperor grapes. *American Journal of Enology and Viticulture* 28: 96–103.
- Kliwer, M., Gates, D. 1987. Influence of wind on microclimate, growth, productivity, and stomatal response of grapevines. *Hortscience* 22: 1152–1153.
- Koundouras, S., Marinos, V., Gkoulioti, A., Kotseridis, Y., van Leeuwen, C. 2006. Influence of vineyard location and vine water status on fruit maturation of nonirrigated cv. Agiorgitiko (*Vitis vinifera* L.). Effects on wine phenolic and aroma components. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 54: 5077–5086.
- Kuhn, N., Guan L., Dai, Z.W., Ben Wu, BH, Lauvergeat, V., Gomès, E., Li, S.H., Godoy, F., Arce-Johnson, P., Delrot, S. 2014. Berry ripening: recently heard through the grapevine. *Journal of Experimental Botany* 65(16): 4543–4559.
- Lalatta, F. 1988. Fertilización de árboles frutales. Ediciones CEAC. Barcelona, España.
- Lucena, J.J. 1997. Methods of diagnosis of mineral nutrition of plants. A critical review. *Acta Horticulturae* 448: 179–192.
- Mackenzie, D.E., Christy, A.G. 2005. The role of soil chemistry in wine grape quality and sustainable soil management in vineyards. *Water Science and Technology* 51: 27–37.

- MAGRAMA. 2009. Encuesta base de viñedo 2009. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. <http://www.magrama.gob.es/es/estadistica/temas/estadisticas-agrarias/agricultura/encuestas-de-vinedo/> accedido 28/12/2106.
- Malheiro, A.C., Santos, J.A., Fraga, H., Pinto, J.G. 2010. Climate change scenarios applied to viticultural zoning in Europe. *Climate Research* 43: 163–177.
- Malheiro, A.C., Campos, R., Fraga, H., Eiras-Dias, J., Silvestre, J., Santos, J. 2013. Winegrape phenology and temperature relationships in the Lisbon Wine Region, Portugal. *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin* 47: 287–299.
- Matthews, M.A., Anderson, M.M. 1988. Fruit ripening in *Vitis vinifera* L.: responses to seasonal water deficits. *American Journal of Enology and Viticulture* 39: 313–20.
- Matthews, M. A., Anderson, M.M. 1989. Reproductive development in grape (*Vitis vinifera* L.): responses to seasonal water deficits. *American Journal of Enology and Viticulture* 40: 52–60.
- McGovern, P.E., Glusker, D.L., Exner, L.J., Voigt, M.M. 1996. Neolithic resinated wine. *Nature* 381: 480–481.
- MEC, Ministerio de Economía y Competitividad. Datacomex. 2012. Estadísticas de Comercio Exterior. <http://datacomex.comercio.es/> accedido 10/10/2014.
- Medrano, H., Escalona, J.M., Cifre, J., Bota, J., Flexas, J. 2003. A ten year study on the physiology of two Spanish grapevine cultivars under field conditions: effects of water availability from leaf photosynthesis to grape yield and quality. *Functional Plant Biology* 30: 607–619.
- Medrano, H., Tomás, M., Martorell, S., Escalona, J.M., Pou, A., Fuentes, S., Flexas, J., Bota, J. 2015. Improving water use efficiency of vineyards in semi-arid regions. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 35: 499–517.
- Meehl, G.A., T.F. Stocker, W.D. Collins, P. Friedlingstein, A.T. Gaye, J.M. Gregory, A. Kitoh, R. Knutti, J.M. Murphy, A. Noda, S.C.B. Raper, I.G. Watterson, A.J. Weaver, Z.C. Zhao, 2007. Global Climate Projections. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Moreno, J. M., Aguiló, E., Alonso, S., Álvarez Cobelas, M., Anadón, R. et al. 2005. Evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del cambio climático. Madrid: Secretaría General Técnica. pp. 846. Ed. Ministerio de Medio Ambiente.

- Mori, K., Goto-Yamamoto, N., Kitayama, M., Hashizume, K. 2007. Loss of anthocyanins in redwine grape under high temperatura. *Journal of Experimental Botany* 58(8): 1935–1945.
- Morlat, R., Jacquet, A. 2003. Grapevine root system and soil characteristics in a vineyard maintained long-term with or without interrow sward. *American Journal of Enology and Viticulture* 54: 1–7.
- Mpelasoka, B.S., Schachtman, D.P., Treeby M.T., Thomas, M.R. 2003. A review of potassium nutrition in grapevine with special emphasis on berry accumulation. *Australian Journal of Grape and Wine Research* 9: 154–168.
- Mullins, M.G., Bouquet, A., Williams, L.E. 1992. *Biology of the Grapevine*. Cambridge University Press, Cambridge. 239pp.
- Nadal, M., Arola, L. 1995. Effects of limited irrigation on the composition of must and wine of Cabernet Sauvignon under semi-arid conditions. *Vitis* 34(3): 151–154.
- Nielsen. 2010. Estudio Nielsen sobre la evolución y tendencias del consumo de vino en España en 2010. http://www.riojawine.com/docs_noticias/NP_ESTUDIONIENSEN2010_cuadros.pdf accedido 15/03/2015.
- OIV - International Organization of Vine and Wine. 2012. Statistical report on world viticulture, OIV, París. <http://www.oiv.int/es/bases-de-datos-y-estadisticas/estadisticas> accedido 11/03/2015.
- OIV - International Organization of Vine and Wine. 2015. State of the vitiviculture world market 2015. <http://www.oiv.int/oiv/info/enconjoncture> accedido 21/09/2015.
- Ojeda, H., Deloire, A., Carbonneau, A., Ageorges, A., Romieu, C. 1999. Berry development of grapevines: relation between the growth of berries and their DNA content indicate cell multiplication and enlargement. *Vitis* 38(4): 145–150.
- 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: 203–215.
- Peuke, A. D. 2009. Nutrient composition of leaves and fruit juice of grapevine as affected by soil and nitrogen fertilization. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 172: 557–564.
- Reynier, A. 2002. *Manual de Viticultura*. Mundi-Prensa (ed.). Madrid. España.
- Riou, C., Carbonneau, A., Becker, N., Caló, A., Costacurta, A., Castro, R., Pinto, P.A., Carneiro, L.C., Lopes, C., Clímaco, P., Panagiotou, M.M., Sotez, V., Beaumont, H.C., Burril, A., Maes, J., Vossen, P. 1994. Le determinisme climatique de la maturation du raisin: application au zonage de la teneur en sucre dans la Communauté Européenne. Office des Publications Officielles des Communautés Européennes, Luxembourg.

- Robinson, J.B. 2005. Critical plant tissue values and application of nutritional standards for practical use in vineyards. Proc Soil Mineral Environment and Vine Nutrition Symposium, San Diego, CA (USA), June 29-30, 2004. (Christensen LP, Smart, DR, eds.). ASEV, Davis, CA (USA). pp: 61–68.
- Romero, I., García-Escudero, E., Martín, I. 2010. Effects of leaf position on blade and petiole mineral nutrient concentration of Tempranillo grapevine (*Vitis vinifera* L.). American Journal of Enology and Viticulture 61: 544–550.
- Romero, P., Muñoz, R., Del Amor, F., Valdes, E., Fernández, J.I., Martínez-Cutillas, A. 2013. Regulated deficit irrigation based upon optimum water status improves phenolic composition in Monastrell grapes in wines. Agricultural Water Management 121: 85–101.
- Rühl, E.H. 2000. Effect of roostock and K⁺ supply on pH and acidity of grape juice. Acta Horticulturae 512: 31–37.
- Rupp, D. 1995. Nutritional status of grapevines and electro-ultrafiltration: findings of field experiments en the conditions of Baden-Wüttemberg, Germany. Acta Horticulturae 383: 377–383.
- Sadras, V.O., Stevens, R.M., Pech, J.M., Taylor, E.J., Nicholas, P.R., McCarthy, M.G. 2007. Quantifying phenotypic plasticity of berry traits using an allometric-type approach: A case study on anthocyanins and sugars in berries of Cabernet Sauvignon. Australian Journal of Grape and Wine Research 13(2): 72–80.
- Salon, J.L., Chirivella, C., Castel, R. 2005. Responses of cv Bobal to timing of deficit irrigation in Requena, Spain: water relations, yield and wine quality. American Journal of Enology and Viticulture 56: 1–8.
- Santesteban, L.G., Royo, J.B. 2006. Water status, leaf area and fruit load influence on berry weight and sugar accumulation of cv. ‘Tempranillo’ under semiarid conditions. Scientia Horticulturae 109: 60–65.
- Santos, J.A., Malheiro, A.C., Karremann, M.K., Pinto, J.G. 2011. Statistical modelling of grapevine yield in the Port Wine region under present and future climate conditions. International Journal of Biometeorology 55: 119–131.
- Santos, J.A., Grätsch, S.D., Karremann, M.K., Jones, G.V., Pinto, J.G. 2013. Ensemble projections for wine production in the Douro Valley of Portugal. Climatic Change 117: 211–225.
- Sarah, P. 2006. Soil organic matter and land degradation in semi-arid area, Israel. Catena 67: 50–55.
- Schultz, H.R. 1996. Water relations and photosynthetic responses of two grapevine cultivars of different geographical origin during water stress. Acta Horticulturae 427: 251–266.

- Seguin, G. 1986. “Terroirs” and pedology of wine growing. *Experientia* 42:861–873.
- Seguin, G. 1988. Ecosystems of the great red wines produced in the maritime climate of Bordeaux. In *Proceedings of the Symposium on Maritime Climate Winegrowing*. L. Fuller-Perrine (Ed.), pp. 36–53. Department of Horticultural Sciences, Cornell University, Geneva, NY.
- Smart, R.E., Coombe, B.G. 1983. Water relations of grapevines. In: *Water Deficits and Plant Growth*. Vol. VII. Additional Woody Crop Plants. T. T. Kozlowski (Ed.) pp 137–96 Academic Press. New York.
- Smart, R.E., Robinson, M. 1991. *Sunligh into wine: A handbook for winegrape canopy management*. Ed. Winetitles. Adelaide. 88pp.
- Somers, T.C. 1977. A connection between potassium levels in the harvest and relative quality in Australian red wines. *Australian Wine, Brewing and Spirit Review* 24: 32–34.
- Sotés, V., Lissarrague, J.R. 1994. Control de la alimentación hídrica, especialmente por el riego. Influencia sobre la producción y la calidad del vino. Office International de la Vigne et du Vin, Grupo de Expertos en Fisiología de la Vid, 10ª sesión, Paris 29 Nov. 1994.
- Spayd, S.E., Wample, R.L., Evans, R.G., Stevens, R.G., Seymour, B.J., Nagel, C.W. 1994. Nitrogen fertilization of white Riesling grapes in Washington. Must and wine composition. *American Journal of Enology and Viticulture* 45: 34–42.
- Spayd, S.E., Tarara, J.M., Mee, D.L., Fergusn, J.C. 2002. Separation of sunlight and temperature on the composition of *Vitis Vinifera* cv. Merlot berries. *American Journal of Enology and Viticulture* 53: 171–182.
- Tarara, J.M., Lee, J., Spayd, S.E., Scagel, C.F. 2008. Berry temperature and solar radiation alter acylation, proportion, and concentration of anthocyanin in Merlot grapes. *American Journal of Enology and Viticulture* 59(3): 235–247.
- Tardáguila, J., Diago, M.P. 2008. Precision Viticulture: Principles and technologies used in the vineyard. VI World Wine Forum. Logroño, 23-25 April 2008.
- This, P., Lacombe, T, Thomas, M.R. 2006. Historical origins and genetic diversity of wine grapes. *Trends in Genetics* 22(9): 511–519.
- Tomás, M., Medrano, H, Escalona, J.M., Martorell, S., Pou, A., Ribas-Carbó M., Flexas, J. 2014. Variability of water use efficiency in grapevines. *Environmental and Experimental Botany* 103: 148–157.
- Tonietto, J., Carbonneau, A. 2004. A multicriteria climatic classification system for grape-growing regions worldwide. *Agricultural and Forest Meteorology* 124(1–2): 81–97.

- Ubalde, J.M., Sort, X., Zayas, A., Poch, R.M. 2010. Effects of soil and climatic conditions on grape ripening and wine quality of Cabernet Sauvignon. *Journal of Wine Research* 21(1): 1–17.
- Unamunzaga, O., Besga, G., Castellón, A., Usón, M., Chéry, P., Gallejones, P., Aizpurua, A. 2014. Spatial and vertical analysis of soil properties in a Mediterranean vineyard soil. *Soil Use and Management* 30: 285–296.
- Unwin, T. 2001. *El vino y la viña. Geografía histórica de la viticultura y el comercio del vino*. Ed. Tusquets, Barcelona. 536pp.
- van Leeuwen, C., Seguin, G. 1994. Incidences de l'alimentation en eau de la vigne, appréciée par l'état hydrique du feuillage, sur le développement de l'appareil végétatif et la maturation du raisin (*Vitis Vinifera* variété Cabernet franc, Saint-Emilion, 1990). *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin* 28: 81–110.
- van Leeuwen, C., Friant, Ph., Choné, X., Trégoat, O., Koundouras, S., Dubourdieu, D. 2004. Influence of climate, soil and cultivar on terroir, *American Journal of Enology and Viticulture* 55: 207–217.
- van Leeuwen, C., Seguin, G. 2006. The Concept of Terroir in Viticulture. *Journal of Wine Research* 17(1): 1–10.
- van Leeuwen, C., Bois, B., Pieri, P., Gaudillère J.P. 2007. Climate as a Terroir component. *Congress on climate and viticulture, Zaragoza, 10-14 April 2007* 1–14.
- Walworth, J.L., Sumner, M.E. 1987. The diagnosis and recommendation integrated system (DRIS). *Advances in Soil Science* 6: 149–188.
- Weibel, F.P. 1997. Enhancing calcium uptake in organic apple growing. *Acta Horticulturae* 448: 337–343.
- Williams, L.E., Matthews, M.A. 1990. Grapevine. In: *Irrigation of agricultural crops*. (eds. B.A. Stewart and D.R. Nielsen), pp. 1019–1055. *Agronomy Monograph* 30. Wisconsin, USA.
- Wilson, J. 1998. *Terroir, the role of geology, climate and culture in the making of French wines*. University Press of California. San Francisco, USA.
- Winkler, A.J., Cook, J.A., Kliewer, W.M., Lider L.A. 1974. *General Viticulture*. pp. 710. 2nd Ed. University of California Press, California.

CAPÍTULO 2: Soil type and climatic zone influence on must quality in a cooperative of Rioja appellation using HJ-Biplot



- Enviado a: Oeno One – Vine and Wine Open Access Journal (Anteriormente llamado: Journal international des sciences de la vigne et du vin)
- Comunicación Oral: 4th International Congress EUROSIL 2012, Bari, Italia.

Authors: Urtzi Leibar^{1,2}, Olatz Unamunzaga¹, María José Fernández-Gómez³, Purificación Galindo-Villardón³, Cesar Castro⁴ and and Ana Aizpurua^{1,*}

¹Environment Quality Department, Neiker-Tecnalia, Bizkaia Technological Park, 812 Berreaga St. 1., 48160 Derio, Bizkaia, Spain

²Current address: Hazi Fundazioa, Area of Statistics, Sectorial Analysis and Paying Agency's Technical Services, Granja Modelo de Arkaute s/n, 01192, Arkaute, Araba, Spain.

³University of Salamanca, Statistics Department, c/Alfonso X El Sabio s/n, 37008 Salamanca, Spain.

⁴Bodegas y Viñedos Labastida. Avenida Diputación, 22. 01330, Labastida, Álava, Spain.

Abstract

Aim: The main objective of this study was to evaluate the influence of soil type and climate on must qualitative parameters in a winegrower's cooperative at Rioja appellation.

Methods and results: The study was conducted from 2009 through 2011 with data collected routinely before harvest by the technician of a cooperative with a total surface area of 525 ha. Soils were classified using an existing soil map (1:50.000 scale) according to water holding capacity (WHC), and two climatic zones were differentiated based on the Huglin index. Effects of soil and climate on must quality were evaluated using HJ-Biplot statistical analysis. High WHC soils produced musts with high total acidity, mainly due to malic acid. Must K concentrations were lower in soils with lower K and clay content. Soils with lower WHC were the only ones able to produce musts with high anthocyanin concentration and higher colour intensity. According to climatic zones established for the winery vineyards, only small differences could be observed.

Conclusion: It is possible to differentiate must quality parameters according to soil type considering soil water holding capacity, but less clear differences were observed among climatic zones considering a 50 km² area and a difference of approximately 200 m in height between the two zones.

Significance and impact of the study: Many wineries have soil, climate and grape quality data. Therefore, these data could be used to make a grape quality classification at harvest that could be assessed every year using simple statistical tools.

Keywords: soil water holding capacity, grape quality, Tempranillo, HJ-Biplot, must acidity

Introduction

In viticulture, the concept of “terroir” relates the sensory attributes of wines to the environmental conditions of the grapes (Likar et al., 2015). The term terroir dates back to the ancient world and represents an important descriptor of the connection between wines and their origins (Likar et al., 2015). Some works, as stated by van Leeuwen et al., (2004), have determined the effects on grape yield and composition of a single terroir factor, whether climate (Jones & Davis, 2000; Tonietto & Carbonneau, 2004), soil (Tregoat et al., 2002) or others. However, it is less common to find studies that combine different factors.

Soil is a crucial component in grape and wine production, but its effect is complex, acting on grapevine water supply, grapevine nutrient supply and temperature in the root zone (Coipel et al., 2006). Although wine grapes can adapt to a wide range of soil properties, grape and wine composition are significantly affected by soil type, which influences the taste of the final product (Wang et al., 2015). Wine quality is often strongly dependent on the soil's physical properties, such as its texture and depth, due to their relationship with soil water-holding capacity (WHC) because vine behaviour and berry composition are closely related to water uptake conditions (van Leeuwen et al., 2004). In this sense, wine grapes grown on highly permeable soil and under the same environmental conditions with large diurnal temperature differences have faster photosynthetic rates, higher sugar concentrations, and improved chroma and palate (Wang et al., 2015). Sabon et al. (2002) also reported the influence of soil on the aromatic composition of Grenache wines, studying representative soils of the Rhone Valley (France) according to their geographical site, climatic conditions, hydrological regulation, and soil profile. Even though there are some studies concerning soil influence on grape quality, van Leeuwen et al. (2004) stated that little data have been published

related to this subject. Therefore, there is a need to deepen the knowledge of how different types of soil influence grape quality.

Apart from soil, climate is also widely acknowledged as one of the most important factors influencing grapevine development and growth (Fraga et al., 2014). The timing and duration of the grapevine phenological stages are deeply tied to the prevailing atmospheric conditions (Jones & Davis, 2000), which also contribute to variability in grapevine yield (Santos et al., 2011), wine production and quality (Fraga et al., 2014). Sabon et al. (2002), in the study quoted above in the Rhone Valley, observed that wines produced in most southern zones, where maturation occurs early, had high aromatic composition, low total acidity and high potential alcohol in their must. All this variability ultimately affects vinification and the wine microbiological, chemical and sensory aspects of wine (Mira de Orduña, 2010). Temperature is widely accepted to affect vine phenology, vegetative cycles and grape quality (Ramos et al., 2015). Over the last years, observations from various world winemaking zones have provided evidence of modified vine development and fruit maturation patterns.

In vineyards, spatial variations in topography, climatic conditions, and physical and chemical properties of the soil have been associated with spatial variations in yield and fruit soluble solids (Bramley & Hamilton, 2004). Considering that spatial variability is very high in soil, variation in soil properties appears to be a key driver of vineyard yield and quality variability. To understand and optimally manage vineyard variability, the main objective is to determine zones that are likely to produce grapes or wines of similar composition, while enabling operational decisions to be implemented at the various production stages (Vaudour & Shaw, 2005). Irimia et al. (2014) reported that the dominant methods used to delimit zones are based on bioclimatic indices, soil and lithological characteristics, or their combined influence referred to a specific geographical

area. Vineyard zoning does not need to always be the same. In zonal vineyard management, individual units are split into zones of characteristic performance and managed differentially depending on the purpose of the study. For example, different areas within a single block might be pruned to different bud numbers, fertilized at different rates, or selectively harvested (Bramley & Hamilton, 2004). There are many medium-sized wineries that have different layers of information regarding both environment variability (lithology, topography, soil, climate, etc.) and the productive and qualitative behaviour of the vineyard. Many wineries currently handle this information in order to assign grapes to different wines or when they have to make decisions regarding the vineyard's management. Despite that volume of data, their different origin and scale make it difficult to analyse and use them for a better knowledge of the environment. Taking all into account, the main objective of this study was to evaluate the influence of soil type and climate on Tempranillo grape quality using data from a winegrower's cooperative in Rioja appellation.

Materials and Methods

Study area

The study was carried out from 2009 through 2011 in the vineyards of the Bodegas y Viñedos Labastida cooperative winery situated in DOCa Rioja, Spain. All vineyards covered an area of 525 hectares in a surface of 50 km². They were located at altitudes ranging from 450 m to over 650 m, totalling more than 1,000 plots with an average size of less than 0.5 has. From among all those plots, non-irrigated vineyards and those with the cultivar Tempranillo were selected.

Climate and soil types were the independent variables (Environmental variables) used in this study. Must qualitative parameters, such as pH, malic acid,

tartaric acid, total acidity, K concentration, polyphenol total index (PTI), colour intensity (CI), anthocyanins and the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), were the dependent variables (Target variables) measured.

Environmental variables

Climate

The climate was characterized by being in an area of Oceanic-Mediterranean transition and by presenting a significant altitudinal difference between the Ebro River and the Cantabria mountain range (Barrios, 1994). The climate type could be defined as Temperate Mediterranean following the Papadakis agro-climatic classification (MAGRAMA, 1996).

As for data, 1 km x 1 km daily climatic data modelled from 1971 to 2007 were available in this region (data obtained using the methodology of Gutiérrez et al., 2010). Using this climatic data, the Heliothermal Index of Huglin (Equation 1; Huglin, 1978) was calculated.

$$\text{IndHuglin} = \sum_{1 \text{ Abril}}^{30 \text{ September}} \left(((T_{\text{mean}} - 10) + (T_{\text{max}} - 10)) / 2 \right) \times d \quad (\text{Equation 1})$$

where T_{mean} =daily mean air temperature (°C), T_{max} =daily maximum air temperature (°C), d =day length coefficient, in our particular case $d=1.03$ (Tonietto & Carbonneau, 2004).

Afterwards, the plots were classified into different climatic zones according to an unsupervised clustering method using the fuzzy k-means algorithm with the program FuzMe v.3.5 (Minasny & McBratney, 2002). Unsupervised clustering aims at grouping data items into homogeneous clusters according to a proximity

criterion defined by a distance function (Urretavizcaya et al., 2014). Two climatic zones (Figure 2.1) were chosen instead of three since the medium climatic cluster was not different from the high and low climatic clusters; this approach would reduce complexity when handling posterior results, in the opinion of the agronomist. The North zone (N) corresponds to a wetter and colder zone (Huglin Index: 1594-1884), while the South zone (S) refers to a drier and warmer zone (Huglin Index: 1885-1983) (Figure 2.1).

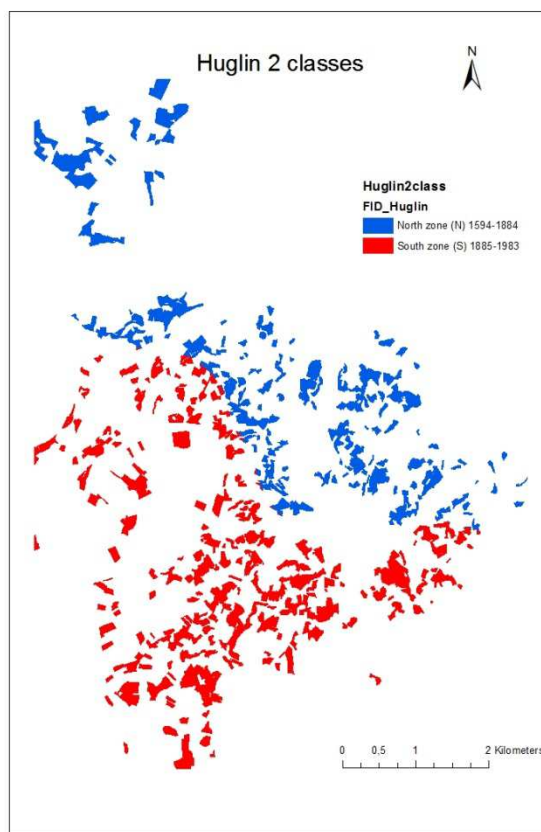


Figure 2.1. Huglin Heliothermal Index climatic zoning for the period 1971-2007 using k-means clustering in the Bodegas y Viñedos Labastida cooperative winery vineyard of Rioja appellation.

As the study years were 2009, 2010 and 2011, the temperature and precipitation data for each climatic zone (Hueta weather station for North zone and Espirbel weather station for South zone) were summarized in Figure 2.2. July

and August data for 2011 in Hueta weather station were not available. The most relevant phenological moments were presented in Table 2.1, consisting of average dates collected by the winery.

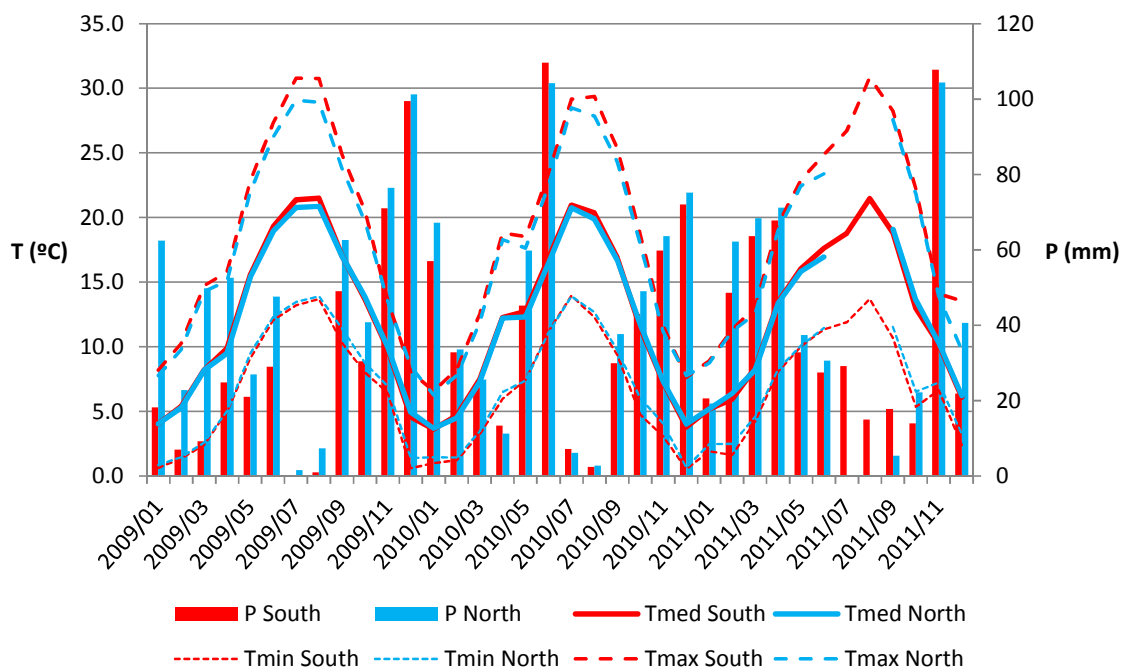


Figure 2.2. Average, minimum and maximum temperature and monthly precipitation at Hueta (North Zone) and Espirbel (South Zone) weather stations from January 2009 to December 2011.

Table 2.1. Most relevant phenological dates.

	2009	2010	2011
Budbreak	14/04	18/04	06/04
Flowering	12/06	18/06	02/06
Berry set	19/06	23/06	09/06
Veraison	20/08	23/08	11/08
Harvest	16/10	10/10	09/10

Soils

A soil map was made by Barrios (1994) for Rioja Alavesa (a DOCa Rioja area located in the Basque Country) at 1:50.000 scale. In this map, a total of 21 key

mapping units were established according to the USDA's "Keys to Soil Taxonomy" in force at the time, and they were transformed to the nomenclature used currently (Soil Survey Staff, 2014). The agronomist of the winery classified the 21 soil types into four groups that differ mainly in the soil's water holding capacity (WHC) (Table 2.2). Soil WHC was calculated for each soil unit according to equation 2 (Unamunzaga et al., 2014), which was obtained in similar vineyards close to the study area. Soil properties necessary to fulfil the equation (plus stoniness) were extracted from the profile description associated with each soil unit on the map where different layers are described and analysed. Depth and carbonate were also extracted from the soil map. The WHC was calculated for each soil type, and then the average WHC was assigned to each soil group.

$$\text{WHC (mm)} = (-98.73 + 0.09435 * \text{clay} + 0.1287 * \text{silt} + 0.09606 * \text{sand} - 0.26123 * \text{organic C}) * [1 - S] / 100$$

(Equation 2)

where clay, sand and silt are expressed in g kg^{-1} , organic C as $\text{SOM}/1.72 \text{ g/kg}$ and S as stoniness in %. Each group also corresponds to different vineyard yield and quality behaviours observed by the agronomist. Only those plots with more than 70% of the surface assigned to the same soil type were taken into account. The four groups were defined as follows:

-Low WHC group: including Lithic Xerorthent, Lithic Xeric Torriorthent and Xeric Torriorthent soils. These soils had characteristics such as being shallow (25-70 cm), located usually on slopes or high flat uplands, low water holding capacity and high total carbonates (35-50%).

-Mild WHC group: corresponding to Typic calcixerept soils that were stony (35-65% of coarse fragments) with high internal drainage and mild water retention capacity; Xeric Haplocalcid soils on stony medium terraces situated 40-100 m above the Ebro river with a moderate calcic horizon that allows high water

infiltration and low retention; and Typic Calcixerept soils that were accumulation areas receiving colluvial contributions and with an underlying calcic horizon (from 60-70 cm) and moderate depth (100-125 cm). These Typic Calcixerept soils could be expected to be found in the Medium or High WHC group according to their depth, but the agronomist of the winery observed that their behaviour was similar to Typic calcixerept and Xeric Haplocalcid soils.

-Medium WHC group: including mainly Typic Xerofluvent and Xeric Torriorthent and a few Typic calcixerept soils. These soils were low and medium terraces without stoniness with the exception of Typic calcixerepts. They were generally situated 7-40 m above the Ebro River and were deep (>125 cm) with high water holding capacity.

-High WHC group: corresponding to Typic Xerofluvent and Typic calcixerept soils that were deep (>150 cm). Typic Xerofluvent soils with high water holding capacity were at valley bottoms that receive input from sloping areas by erosion processes. Typic calcixerept soils occupied hollows located in concavities or depressed areas in flat landscapes with a calcic horizon between 90 and 100 cm.

Soil sampling throughout the winery vineyards was carried out by collecting 662 soil samples from the tilled rows but close to the herbicide-treated undervines to a depth of 10-35 cm, since there were no roots in the top 10 cm. Soil pH was determined in water in a 1:2.5 soil-to-water ratio, and these soils on average had high pH (8.87 ± 0.34). Organic matter content (Walkley and Black method; Hesse, 1971) was also analysed. Texture was measured by the pipette method (MAPA, 1994). Soil potassium content was measured by an extraction with 1N ammonium acetate at pH 7 and subsequently read by flame emission (MAPA, 1994). All these results are presented in Table 2.2 for each soil group.

Table 2.2. Physical and chemical soil properties (mean and standard error) of the four soil groups classified from the winery vineyards.

Soil group	Average WHC* (mm)	Depth* (cm)	Carbonates* (%)	Sand** (%)	Silt** (%)	Clay** (%)	OM** (%)	K** (mg kg ⁻¹)	pH**
Low WHC	77,59	25-75	35-50	51.55 ± 0.86	34.03 ± 0.64	14.75 ± 0.36	0.84 ± 0.01	140.46 ± 2.84	8.76 ± 0.02
Mild WHC	106,93	100-125	15-55	55.23 ± 1.07	30.42 ± 0.79	14.62 ± 0.53	0.95 ± 0.02	156.26 ± 5.41	8.75 ± 0.02
Medium WHC	135,65	>125	30-50	61.05 ± 2.19	28.16 ± 1.72	10.81 ± 0.78	0.94 ± 0.03	132.61 ± 6.75	8.71 ± 0.06
High WHC	240,49	>150	35-40	49.19 ± 1.43	35.32 ± 0.99	15.53 ± 0.77	0.94 ± 0.02	147.94 ± 5.72	8.72 ± 0.02

WHC=water holding capacity, OM=organic matter, * data from soil map, ** data from the 662 soils analysed.

It is worth mentioning that different training systems were included in the analysis at the beginning, and they did not provide variability. Therefore, this factor was not included in the statistical analysis to avoid making interpretation more difficult.

Target variables

Vegetation index

NDVI information was obtained at veraison in 2009 (20/08/2009) and 2010 (23/08/2010) from a flight image with 0.5 m resolution and was calculated from these individual measurements as follows (Equation 3):

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{VIS}) / (\text{NIR} + \text{VIS}) \quad (\text{Equation 3})$$

where VIS and NIR stand for the spectral reflectance measurements acquired in the visible (red) and near-infrared regions, respectively. Images were corrected for camera-induced geometric and radiometric distortions (Lamb et al., 2004). Image rectification (assigning map coordinates to individual image pixels) was then completed using 16 ground control points (readily identifiable features, of known dGPS coordinates, in the images) consisting of ends of selected vine rows.

Must qualitative parameters

Grape samples (100 berries each) from 185, 141 and 310 plots were taken during 2009, 2010 and 2011, respectively, 15 days before harvest. Sampling was done by taking three grapes per vine and 20-30 clusters per plot (one grape from the shoulder, another from the intermediate zone and the other from the head), alternating between grapes exposed to sun and grapes from the inside of the

cluster, collecting and making a zigzag within the vine lines all over the vineyards.

The winery collected and carried out an analysis where grapes were chopped and weighed and afterwards analysed with the FOSS analyser. Probable alcoholic degree (Brix), total acidity (g L^{-1}), malic acid (g L^{-1}), tartaric acid (g L^{-1}), pH, K concentration (g kg^{-1}), polyphenol total index (PTI), anthocyanins (mg L^{-1}) and colour intensity (CI) were analysed. Anthocyanins (mg L^{-1}) and CI were only measured in 2010 and 2011.

Statistical analysis

Statistical analysis was performed using an HJ-biplot (Galindo, 1986) in order to inspect the differences in quality parameters caused by the different soil types and climatic zones. This technique has been widely used in many studies (Hron et al., 2012; Hernández et al., 2014 among others). We used the Classical Biplot software package available free of charge (<http://biplot.usal.es/ClassicalBiplot/index.html>; Vicente-Villardón, 2014). The HJ-biplot is a conjoint representation in a low-dimensional subspace space of rows (grape samples) and columns (target variables) of data matrix X , using markers for its rows and columns. Environmental variables are introduced as nominal variables. The HJ-biplot has the advantage that it is a simultaneous representation of both samples and variables in the same reference system and provides optimal quality for that representation (Galindo, 1986).

The rules for the interpretation of the HJ-biplot were the following, as described by Galindo (1986): (1) the distances among samples were interpreted as an inverse function of similarities in such a way that closer markers (centres) were more similar. This property allowed for the identification of clusters of individuals

with similar profiles; (2) the lengths of the target variables (vectors) approximate the standard deviations of the variables; (3) the cosines of the angles between the column vectors approximate the correlations among variables in such a way that small acute angles were associated with variables that were strongly positively correlated, obtuse angles close to 180° with variables that were strongly negatively correlated, and right angles with non-correlated variables. Similarly, the cosines of the angles between the variable markers and the axes (the principal components) approximated the correlations between them; (4) the order of the orthogonal projections of the samples (points) onto a target variable (vector) approximated the order of the row elements (values) in that column; the greater the projection of an individual point. The target variables should be interpreted in the planes where their relative contributions in the corresponding axis are the highest. Those variables are highlighted in bold. If variables are represented in grey, they could not be interpreted in this plane, because they had low relative contribution there.

Results

Averaged grape quality results from 2009, 2010 and 2011 are presented in Tables 2.3, 2.4 and 2.5, respectively. In the results of HJ-Biplots, only those planes where variables had good representation quality are presented, and Table 2.6 refers to the variance in the data of each Axis. Thus, planes 1-2 and 1-3 for 2009 (Figure 2.3, A and B), 1-2 and 2-3 for 2010 (Figure 2.4, A and B) and 1-2 and 1-3 for 2011 (Figure 2.5, A and B) were selected to show the results.

Figure 2.3A presents an acute angle among the **K**, tartaric acid, pH and PTI variables showing a strong correlation, and the same among the NDVI, total acidity and malic acid variables. In contrast, the total acidity, malic acid and

NDVI variables showed right angles with the variables K and tartaric acid, reflecting no relationship.

Plane 1-2 in 2009 (Figure 2.3A) allowed us to fundamentally differentiate High WHC soils from the rest, and these soils were characterized, in general, by producing musts with the highest malic acid concentration and medium-high total acidity concentration, and they had high NDVI (Table 2.3). In the opposite quadrant to these three variables (malic acid, total acidity and NDVI), there were mainly Low WHC soils located in the South climate zone. Hence, grape samples from these plots tended to have low acidity and NDVI.

Low WHC soils could be found throughout the entire figure, although there were fewer near malic acid, total acidity and NDVI (Figure 2.3A), reflecting low acidity and low vigour. Next to the variables PTI and tartaric acid, there were mainly Low and Mild WHC soils (Figure 2.3A), indicating that only these soils were able to produce musts containing the highest PTI and tartaric acid concentrations (Table 2.3).

On the other hand, in the lower and middle right side there were samples representing Medium WHC soils (Figure 2.3A). These soils produced musts containing the lowest K concentration, pH, tartaric acid concentration and PTI rate (Table 2.3).

Plane 1-3 in 2009 (Figure 2.3B) shows that only Low and Mild WHC soils produced musts with high alcohol content. By contrast, High WHC soils produced musts with the lowest alcohol content (Table 2.3) since they were on the opposite side of the variable. Medium WHC soils were not related to probable alcoholic degree (Figure 2.3B). According to climatic zones, there were no clear patterns among must parameters.

In 2010, there were few samples of Medium WHC soils. Figure 2.4A shows again a positive correlation among the K, pH and PTI variables. Total acidity and malic acid also remained correlated, as did anthocyanins and CI. A nearly 90° angle was observed between the total acidity and malic acid variables and those of anthocyanin and CI, which indicates no direct relationship between these variables.

Taking into account the distribution of samples in Figure 2.4A, next to the variables that provide high must quality, such as anthocyanins and colour (CI), there were mostly Low and Mild WHC soils, indicating that these soils produce musts with the highest colour (Table 2.4). Moreover, there are many Low and Mild WHC soils near the pH, K and PTI variables.

High WHC soils located in the North produced musts with high total acidity and malic acid (Table 2.4) but low anthocyanin concentration and colour index (Table 2.4 and Figure 2.4A).

For 2010, plane 2-3 (Figure 2.4B) highlights that soils located in the North were placed mainly near the NDVI index (Table 2.4), especially High WHC soils. Low WHC soils and almost all soils in the South were in the left top position, so these soils had low NDVI values. Tartaric acid did not show any clear differences among soil groups or climatic zones.

A positive correlation between pH and PTI was again observed as well as between total acid and malic acid concentration (Figure 2.5A) in 2011. Medium WHC soils were located mainly in the opposite quadrant from the K variable, as also occurred in 2009, showing lower K values than other soil groups (Table 2.5). High WHC soils from the North produced musts with high acidity since they were closer to total acid and malic acid (Table 2.5). In Figure 2.5A, Low and Mild

Soil type and climatic zone influence on must quality

WHC soils were located throughout the figure, indicating that these soils did not produce musts with specific characteristics. Regarding climatic zones, there were no clear differences among must parameters.

Table 2.3. Number of samples for each climatic zone, soil type and grape quality parameters and NDVI mean and standard error in 2009.

2009	N	NDVI	Degree (Brix)	Total acidity (g L ⁻¹)	PH	Tartaric acid (g L ⁻¹)	Malic acid (g L ⁻¹)	PTI	K (g kg ⁻¹)	CI	Anthocyanin (mg L ⁻¹)
N	47	0.323 ± 0.015	13.28 ± 0.10	5.15 ± 0.07	3.56 ± 0.02	5.91 ± 0.05	2.70 ± 0.07	81.97 ± 1.00	1552.81 ± 35.26	-	-
S	185	0.306 ± 0.007	13.23 ± 0.05	5.30 ± 0.04	3.61 ± 0.02	6.06 ± 0.03	2.37 ± 0.04	79.36 ± 0.64	1483.98 ± 21.68	-	-
Low WHC	95	0.269 ± 0.008	13.23 ± 0.07	5.22 ± 0.04	3.62 ± 0.02	6.14 ± 0.04	2.36 ± 0.04	81.30 ± 0.76	1521.26 ± 25.17	-	-
Mild WHC	36	0.328 ± 0.014	13.46 ± 0.10	5.21 ± 0.09	3.64 ± 0.04	6.07 ± 0.07	2.41 ± 0.07	82.74 ± 1.11	1540.64 ± 42.83	-	-
Medium WHC	21	0.372 ± 0.015	13.38 ± 0.12	5.49 ± 0.08	3.41 ± 0.01	5.71 ± 0.05	2.34 ± 0.11	73.03 ± 1.40	1249.43 ± 41.90	-	-
High WHC	33	0.371 ± 0.012	12.98 ± 0.11	5.30 ± 0.10	3.60 ± 0.04	5.81 ± 0.04	2.86 ± 0.09	77.84 ± 1.00	1562.12 ± 37.50	-	-

NDVI = normalized difference vegetation index, PTI = polyphenol total index, CI = colour index

Table 2.4. Number of samples for each climatic zone, soil type and grape quality parameters and NDVI mean and standard error in 2010.

2010	N	NDVI	Degree (Brix)	Total acidity (g L ⁻¹)	PH	Tartaric acid (g L ⁻¹)	Malic acid (g L ⁻¹)	PTI	K (g kg ⁻¹)	CI	Anthocyanin (mg L ⁻¹)
N	53	0.615 ± 0.009	13.52 ± 0.08	6.20 ± 0.10	3.70 ± 0.01	5.54 ± 0.05	2.65 ± 0.08	81.13 ± 0.85	1689.72 ± 33.29	3.95 ± 0.18	123.19 ± 6.60
S	88	0.567 ± 0.007	13.39 ± 0.07	5.62 ± 0.05	3.71 ± 0.01	5.62 ± 0.03	2.02 ± 0.05	79.67 ± 0.72	1606.72 ± 25.13	3.62 ± 0.10	121.99 ± 3.44
Low WHC	75	0.558 ± 0.007	13.37 ± 0.07	5.71 ± 0.06	3.72 ± 0.01	5.63 ± 0.04	2.11 ± 0.06	79.95 ± 0.69	1611.69 ± 29.34	3.71 ± 0.12	122.17 ± 4.08
Mild WHC	45	0.616 ± 0.010	13.62 ± 0.11	5.86 ± 0.11	3.72 ± 0.02	5.58 ± 0.05	2.32 ± 0.09	82.95 ± 1.00	1686.24 ± 35.63	4.01 ± 0.18	135.98 ± 5.62
Medium WHC	2	0.647 ± 0.033	12.85 ± 0.45	6.31 ± 0.74	3.65 ± 0.05	5.45 ± 0.05	2.85 ± 0.55	69.80 ± 2.10	1667.50 ± 18.50	2.65 ± 0.75	76.00 ± 41.00
High WHC	19	0.616 ± 0.012	13.34 ± 0.08	6.23 ± 0.15	3.66 ± 0.02	5.45 ± 0.05	2.61 ± 0.15	75.91 ± 1.21	1623.84 ± 44.05	3.39 ± 0.22	96.32 ± 8.85

NDVI = normalized difference vegetation index, PTI = polyphenol total index, CI = colour index

Table 2.5. Number of samples for each climatic zone, soil type and grape quality parameters and NDVI mean and standard error in 2011.

2011	N	NDVI	Degree (Brix)	Total acidity (g L ⁻¹)	PH	Tartaric acid (g L ⁻¹)	Malic acid (g L ⁻¹)	PTI	K (g kg ⁻¹)	CI	Anthocyanin (mg L ⁻¹)
N	118	-	13.53 ± 0.07	4.64 ± 0.04	3.69 ± 0.01	6.27 ± 0.03	2.72 ± 0.04	91.94 ± 0.62	1843.72 ± 20.59	6.84 ± 0.12	227.27 ± 4.37
S	192	-	13.59 ± 0.05	4.36 ± 0.04	3.73 ± 0.02	6.34 ± 0.05	2.41 ± 0.05	93.39 ± 0.90	1866.76 ± 31.49	6.55 ± 0.15	232.71 ± 4.58
Low WHC	155	-	13.61 ± 0.06	4.41 ± 0.03	3.74 ± 0.01	6.39 ± 0.03	2.47 ± 0.04	94.43 ± 0.56	1902.79 ± 19.81	6.86 ± 0.11	238.22 ± 3.27
Mild WHC	73	-	13.67 ± 0.08	4.43 ± 0.06	3.71 ± 0.01	6.23 ± 0.04	2.55 ± 0.06	92.55 ± 0.85	1825.25 ± 29.04	6.68 ± 0.14	229.26 ± 5.81
Medium WHC	29	-	13.59 ± 0.15	4.37 ± 0.05	3.68 ± 0.03	6.21 ± 0.07	2.36 ± 0.08	90.41 ± 1.80	1728.34 ± 60.66	5.86 ± 0.17	216.14 ± 5.82
High WHC	53	-	13.29 ± 0.11	4.73 ± 0.07	3.69 ± 0.02	6.25 ± 0.04	2.76 ± 0.06	89.92 ± 1.10	1843.02 ± 37.53	6.49 ± 0.23	218.30 ± 7.59

NDVI = normalized difference vegetation index, PTI = polyphenol total index, CI = colour index

Table 2.6. Results of the variance for each axis for the 2009, 2010 and 2011 years.

	2009	2010	2011
Axis 1	34.25%	34.90%	44.76%
Axis 2	21.69%	24.11%	18.96%
Axis 3	13.47%	14.32%	13.44%

Tartaric acid was placed on the top of Figure 2.5B, while anthocyanins and IC were down at a right angle; therefore they were almost independent. Medium WHC soils were opposite for IC and anthocyanin, indicating low values for these variables (Table 2.5). In Plane 1-3 again (Figure 2.5B), the variability in the must quality produced by Low and Mild WHC soils was evidenced by the large dispersion that can be seen in the figure. Next to the variables that add colour (anthocyanins and IC), there were no Medium or High WHC soils (Figure 2.5B), indicating that these soils produced musts with lower colour, although it could not be appreciated as clearly as in 2009.

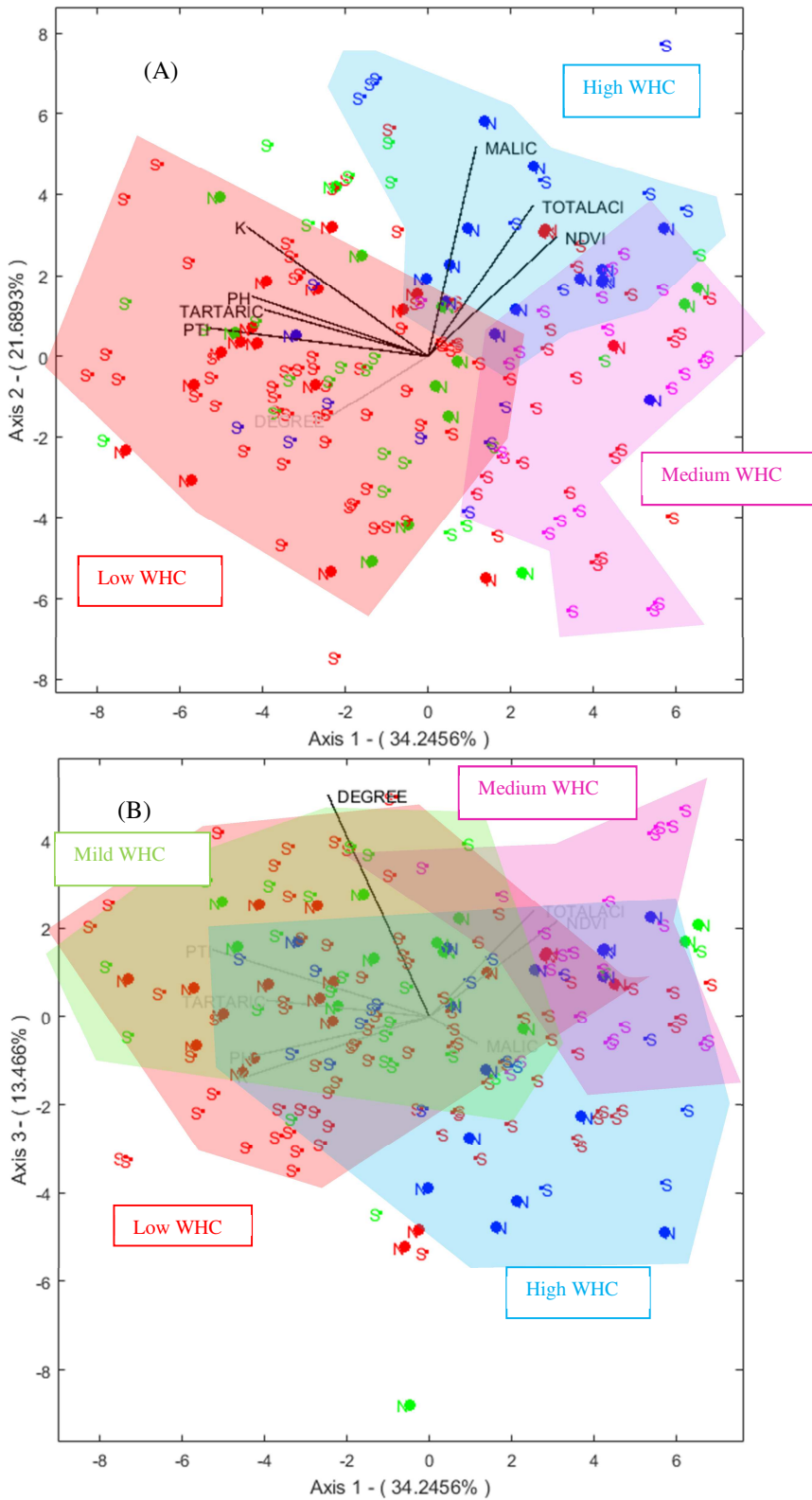


Figure 2.3. (A) HJ-biplot representation of quantitative must parameters (pH, malic acid, tartaric acid, total acidity, K, PTI) and NDVI in 2009 for plane 1-2 and (B) probable alcoholic degree in 2009 for plane 1-3. Low WHC soil samples are shown in red (●*), Mild WHC in green (●*), Medium WHC in pink (●*) and High WHC in blue (●*). Plots situated in the North climatic zone are shown with the letter N and those from the South with the letter S. Only black variables could be interpreted in each figure.

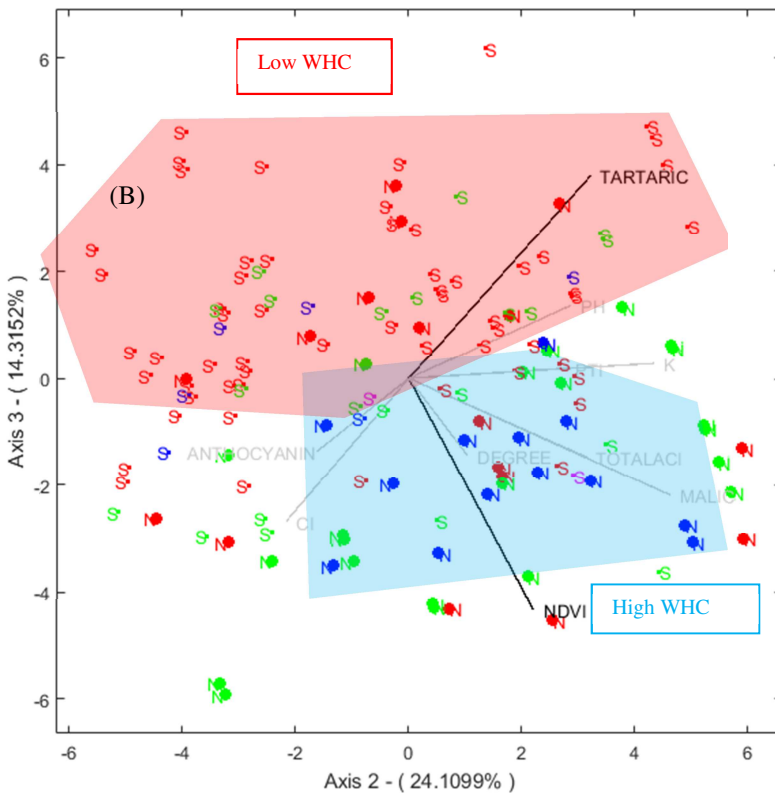
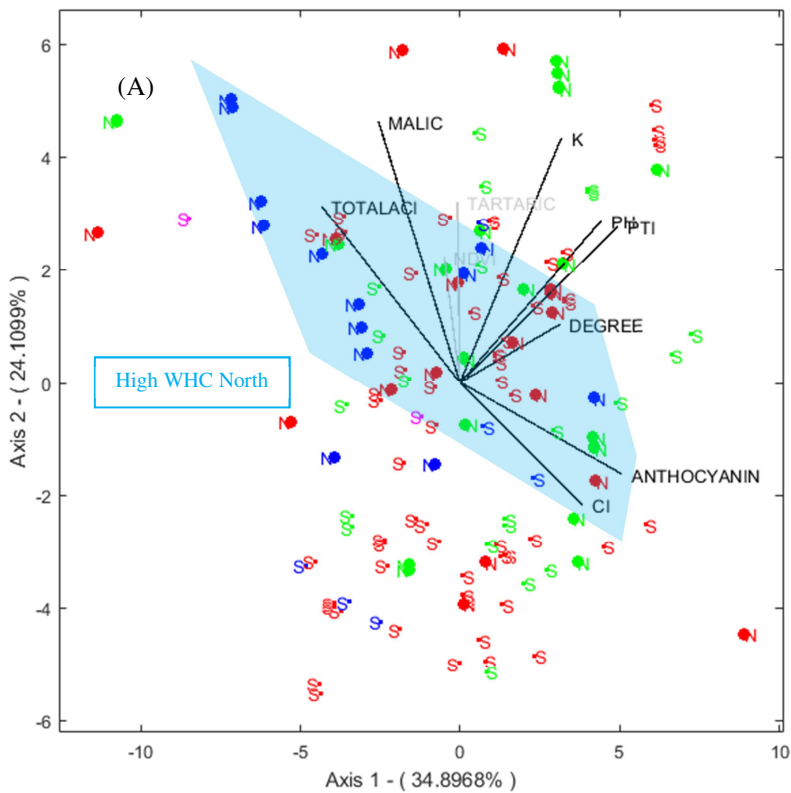


Figure 2.4. (A) HJ-biplot representation of quantitative must parameters (degree, pH, malic acid, total acidity, K, PTI, CI, anthocyanins) in 2010 for plane 1-2 and (B) NDVI and tartaric acid in 2010 for plane 2-3. Low WHC soil samples are shown in red (●*), Mild WHC in green (●*), Medium WHC in pink (●*) and High WHC in blue (●*). Plots situated in the North climatic zone are shown with the letter N and those from the South with the letter S. Only black variables could be interpreted in each figure.

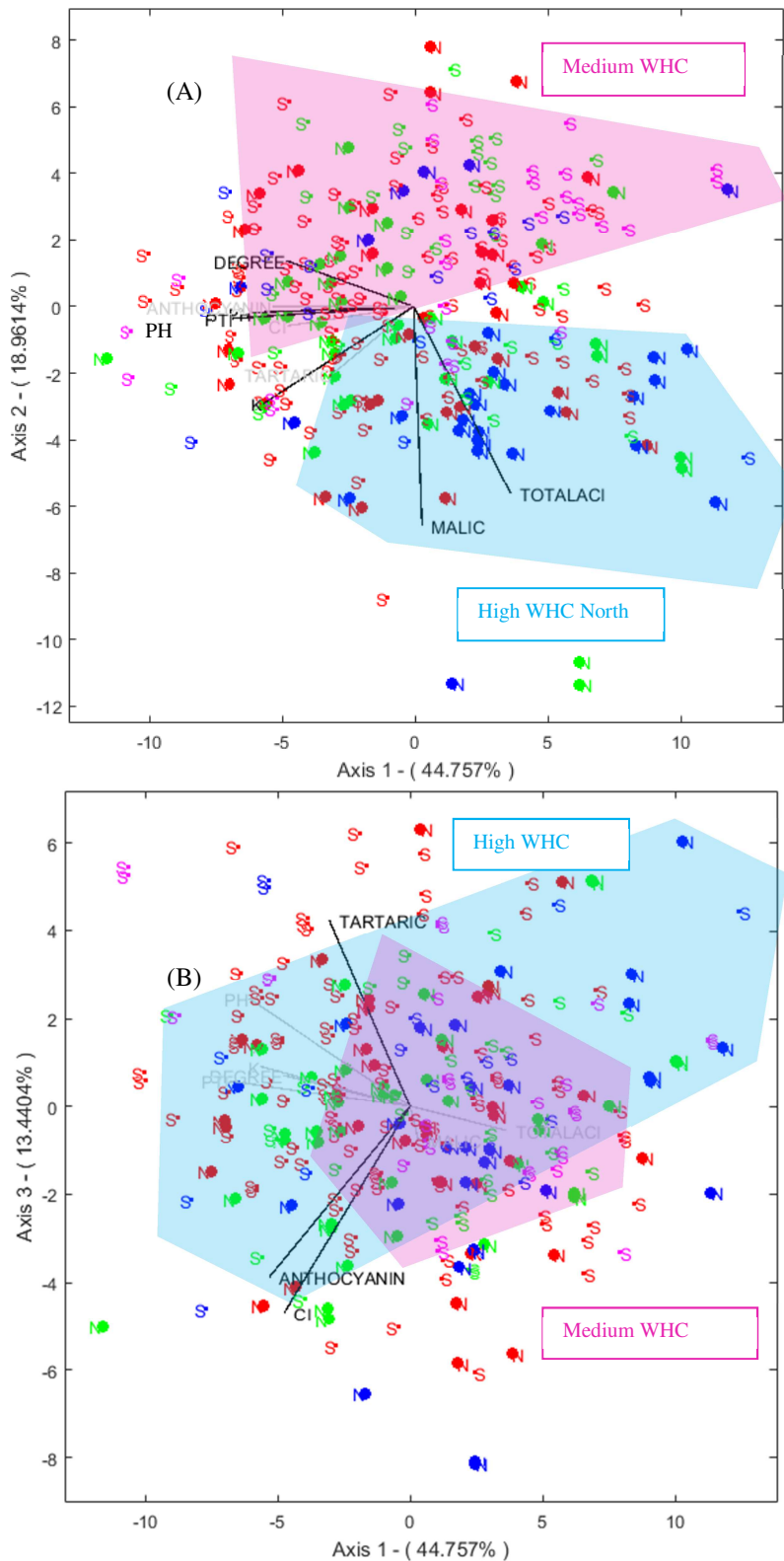


Figure 2.5. (A) HJ-biplot representation of quantitative must parameters (degree, pH, malic acid, total acidity, K, PTI) in 2011 for plane 1-2 and (B) CI, anthocyanins and tartaric acid in 2011 for plane 1-3. Low WHC soil samples are shown in red (•*), Mild WHC in green (•*), Medium WHC in pink (•*) and High WHC in blue (•*). Plots situated in the North climatic zone are shown with the letter N and those from the South with the letter S. Only black variables could be interpreted in each figure.

Discussion

There are factors that were not taken into account, such as age and orientation, making it more difficult to observe the influence of the study factors (soil and climatic classification). Moreover, different plots were analysed every year, but even if the experimental error due to these reasons is high, there were some effects that could be elucidated. Thus, in the three years of the study, the influence of soil variability on must quality was greater than that of climate classification. Ubalde et al. (2011) reported that soil is one of the most important factors in viticultural zoning due to its direct effect on vine development and wine quality, especially soil properties related to soil moisture regime and available water capacity. These authors stated that climate or geology alone cannot be used for viticultural zoning at detailed scale unless soil properties are taken into account.

The HJ-Biplot statistical analysis showed that there was a differentiating pattern among different soil groups that was repeated through the three years of study. In this regard, Leone et al. (2010) stated that the structure of the relationships between soil and grape variables was highly comparable and consistent from one year to another, although some variables vary from year to year. Wang et al. (2015) reported that different soil types can significantly affect the composition of wine grapes and the final wine product. In our case, soils with higher water retention capacity (High WHC soils) produced musts with high total acidity during the three years of study, mainly due to higher malic acid, since these variables were correlated in all figures. These results are in accordance with those of van Leeuwen et al. (2004), Intrigliolo & Castel (2010) and Ramos et al. (2015), which showed high malic acid concentrations in soil resulting in higher vine vigour, where clusters were more shaded because of excessive leaf surface. This caused a lower bunch temperature, thus temperatures higher than 30 °C were less frequent, and consequently malic acid was not combusted. In this sense, a

higher NDVI was achieved in High WHD soils, especially in 2009. This higher NDVI in 2009 was reflected in a lower probable alcoholic degree, which is in line with Coipel et al. (2006), who related high sugar content to limited vine growth and yield from shallow soils.

Medium WHC soils (low and medium terraces) generally produced musts with lower K concentration, which is caused by lower soil K and clay content in the horizon between 10 and 35 cm (Table 2.2). These K differences among soils were not so high as to increase total acidity in Medium WHC soils. Clay particles can hold nutrients due to their high cation exchange capacity, CEC (Pal & Marschner, 2016); thus, soil with low clay and K content (such as Medium WHC soils) could be expected to produce must with lower K concentration, as was observed in this study. In a greenhouse study using the same cultivar (Leibar et al., 2017) in different soils but with similar fertilization, the initial soil K content directly influenced the must K concentration. In turn, K content raises the pH due to precipitation of tartaric acid to potassium bitartrate (Mpelasoka et al., 2003), adversely affecting wine stability; thus, in musts with a lower K concentration, it is expected that the pH would also be lower, as was reflected mainly in 2009 and in 2011 in this work.

Results presented in this paper showed that, in general, Low and Mild WHC soils were the only ones that could produce musts with high PTI in 2009, or with high anthocyanin concentration and CI in 2010 and 2011. This higher colour has been shown to be inversely related to vigour (NDVI), as seen in 2009 and 2010 for our conditions, being in line with Lamb et al. (2004), who reported soils with higher vigour produced musts with lower grape colour. Filipetti et al. (2013) see these results as caused by greater light exposure of the fruiting zone in low vigour vines. In our case, PTI, K and pH showed a consistent correlation throughout the study. Coipel et al. (2006) also found when they compared five different soil types

that even under dry Mediterranean conditions, the grapes with the highest potential for making quality red wines were obtained on the soils with the lowest water holding capacity. In deep rich soil, vines are vigorous and highly productive, but better wines are generally produced when the vines are cultivated on poor soil (van Leeuwen & Seguin, 2006). Thus, grape quality could be high on soils that induce water deficit, reducing shoot growth, berry size and yield. These factors generally enhance grape quality for the production of red table wines. However, in our study, these Low and Mild WHC soils were also able to produce musts with low colour parameters. These results are not unexpected, as it is known that low water holding capacity does not necessary imply high quality and that grape composition is influenced by more complex factors (Filipetti et al., 2013). Skin anthocyanins, which among other parameters play an important role in the quality determination of grapes, are affected by environmental and management-related factors such as light interception, temperature, nitrogen, and bunch thinning (Filipetti et al., 2013). In our case, since there were many variables that we did not control, it was difficult to establish accurate conclusions.

According to climatic zones, few differences among must quality parameters were detected, although some small differences could be observed, mainly with High WHC soils located in the North that showed high NDVI in 2009 and 2010, high total acidity in 2010 and 2011, high malic acid in 2010 and low CI and anthocyanins in 2010. In our study, grape quality differences produced by soils located in the North and South were not clear. The climatic differences between the two zones, mainly in temperature (0.15 °C difference in average temperature and 0.75 °C difference in maximum temperature), were not sufficient to distinguish grape quality in the three years of study. Moreover, in the Ribera del Duero, 115 km along the Duero River and 300000 ha, Ramos et al. (2015) studied the phenology and grape ripening characteristics of cv. Tempranillo, and they found high variability related to site soil and landscape characteristics. These

authors observed phenological differences between the western and eastern parts of the area where the average temperature differed 0.23 °C, with the western locations generally earlier as driven by warmer climatic conditions, producing musts with higher pH values, sugar content and anthocyanins.

Conclusion

Soil type and soil water holding capacity in particular differentiated grape quality parameters in a winegrower's cooperative. Soil with higher water holding capacity (High WCH soils) produced must with higher total acidity, mainly due to a higher malic acid concentration. Medium WHC soils, low and medium terraces from the Ebro river, had lower must K concentration caused by a lower K soil content. Some of the soils with lower water holding capacity (Low and Mild WHC soils) were the only ones that could produce must with higher colour, probably due to better exposure of the clusters. On the other hand, climatic zones established for the winery vineyards showed small differences among must quality parameters.

This work could be useful for many wineries that currently have detailed soil, climate and grape quality data. Thus, using these data together with simple statistical analysis, a grape quality classification could be made and evaluated afterwards.

Acknowledgements

We thank the Department of Economic Development and Competitiveness of the Basque Government for their financial support. Urtzi Leibar was the recipient of a grant from “Fundación Cándido Iturriaga y María Doñabeitia”. The authors thank Bodegas y Viñedos Labastida for their collaboration and Oscar del Hierro (Neiker-Tecnalia) and Maialen Iturbide (Instituto de Física de Cantabria) for their excellent technical assistance obtaining 1 km x 1 km climatic data.

References

- Barrios A., 1994. Mapa de Suelos de La Rioja Alavesa E: 1/50000. Departamento de Agricultura de la Diputación Foral de Álava. Servicio de Estudios y Relaciones Comunitarias. Vitoria-Gasteiz. España.
- Bramley R.G.V. & Hamilton R.P., 2004. Understanding variability in winegrape production systems 1. Within vineyard variation in yield over several vintages. *Aust. J. Grape Wine Res.* **1**, 32–45.
- Coipel J., Rodriguez Lovelle B., Sipp C. & van Leeuwen C., 2006. Terroir effect, as a result of environmental stress, depends more on soil depth than on soil type (*Vitis Vinifera* L. cv. Grenache noir, côtes du Rhône, Frande, 2000). *J. Int. Sci. Vigne Vin* **40**(4), 177–185.
- Filippetti I., Allegro G., Valentini G., Pastore C., Colucci E. & Inriero C., 2013. Influence of vigour on vine performance and berry composition of cv. Sangiovese (*Vitis vinifera* L.). *J. Int. Sci. Vigne Vin* **47**(1), 21–33.
- Fraga H., Malheiro A.C., Moutinho-Pereira J., Cardoso R.M., Soares P.M. M., Cancela J.J., Pinto J.G. & Santos, J.A., 2014. Integrated analysis of climate, soil, topography and vegetative growth in Iberian viticultural regions. *PLoS ONE* **9**(9), e108078. doi:10.1371/journal.pone.0108078.
- Galindo M.P., 1986. Una alternativa de representación simultánea: HJ-BIPLLOT *Questio* **10**(1), 13–23.
- Gutiérrez J.M., Herrera S., San Martín D., Sordo C., Rodríguez J.J., Frochoso M., Ancell R., Fernández J., Cofiño A.S., Pons M.R. & Rodríguez M.A.. 2010. Escenarios regionales probabilísticos de cambio climático en Cantabria: termoplumiometría. Ed. Consejería de Medio Ambiente del Gobierno de Cantabria y Universidad de Cantabria. 105 pp. Available in: <http://www.meteo.unican.es/projects/escenariosCantabria>
- Hernández M., Espinosa F. & Galindo P., 2014. Tomato fruit quality as influenced by the interactions between agricultural techniques and harvesting period. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* **177**, 443–448.
- Hesse P.R., 1971. A test book of soil chemical analysis. John Murray. London, UK.
- Hron K., Jelínková M., Filzmoser P., Kreuziger R., Bednár P. & Barták P., 2012. Statistical analysis of wines using a robust compositional biplot. *Talanta* **90**, 46–50.
- Huglin P., 1978. Nouveau mode d'évaluation des possibilités héliothermiques d'un milieu viticole. In : Symposium International sur l'Écologie de la Vigne, 1, Constança, Roumanie, 1978. Ministère de l'Agriculture et de l'Industrie Alimentaire, p.89–98.

- Intrigliolo D.S. & Castel J.R., 2010. Response of grapevine cv. ‘Tempranillo’ to timing and amount of irrigation: water relations, vine growth, yield and berry and wine composition. *Irrigation Sci.* **28**, 113–125.
- Irimia L.M., Patriche C.V. & Quénoel H., 2014. Analysis of viticultural potential and delineation of homogenous viticultural zones in a temperate climate region of Romania. *J. Int. Sci. Vigne Vin* **48**, 145–167.
- Jones G.V. & Davis R.E., 2000. Climate influences on grapevine phenology, grape composition, and wine production and quality for Bordeaux, France. *Am. J. Enol. Vitic.* **51**, 249–261.
- Lamb D.W., Weedon M.M. & Bramley R.G.V., 2004. Using remote sensing to predict grape phenolics and colour at harvest in a Cabernet Sauvignon vineyard: Timing observations against vine phenology and optimising image resolution. *Aust. J. Grape Wine Res.* **10**, 46–54.
- Leibar U., Pascual I., Aizpurua A., Morales F. & Unamunzaga O., 2017. Grapevine nutritional status and must K concentration under future expected climate conditions and different soils. Sent to: *J. Soil Sci. Plant Nutr.*
- Leone A.P., Amenta P., Calabrò G., Coppola E., Buondonno A. & Morlat R., 2010. The disjointed influence of soil and climate on grape productivity and quality. An assessment by OMCIA-PLSR statistics on a case study in southern Italy. *Agrochimica* **54**(5), 257–278.
- Likar M., Vogel-Mikuš K., Potisek M., Hančević K., Radić T., Nečemer M. & Regvar M., 2015. Importance of soil and vineyard management in the determination of grapevine mineral composition. *Sci. Total Environ.* **505**, 724–731.
- MAGRAMA., 1996. Clasificación Climática de J. Papadakis [WWW Document]. SIGA-337 Sistema Inf. Geográfica Datos 338 Agrar. URL <http://sig.magrama.es/Docs/PDFServiciosProd1/ClasificacionClimatica.pdf>
- MAPA., 1994. Métodos oficiales de análisis de suelos y plantas. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid, España.
- Minasny B. & McBratney A.B., 2002. FuzME version 3.0, Australian Centre for Precision Agriculture, The University of Sydney, Australia. Available at: <http://www.usyd.edu.au/su/agric/acpa> Accessed 2016-12-03
- Mira de Orduña R., 2010. Climate change associated effects on grape and wine quality and production. *Food Res. Int.* **43**, 1844–1855.
- Mpelasoka B.S., Schachtman D.P., Treeby M.T. & Thomas M.R., 2003. A review of potassium nutrition in grapevine with special emphasis on berry accumulation. *Aust. J. Grape Wine Res.* **9**, 154–168.

- Pal S. & Marschner P., 2016. Influence of clay concentration, residue C/N and particle size on microbial activity and nutrient availability in clayamended sandy soil. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* **16**(2), 350–361.
- Ramos M.C., Jones G.V. & Yuste J., 2015. Phenology and grape ripening characteristics of cv Tempranillo within the Ribera del Duero designation of origin (Spain): Influence of soil and plot characteristics. *Europ. J. Agronomy* **70**, 57–70.
- Sabon I., de Revel G., Kotseridis Y. & Bertrand A., 2002. Determination of volatile compounds in Grenache wines in relation with different terroirs in the Rhone Valley. *J. Agric. Food Chem.* **50**(22), 6341–6345.
- Santos J.A., Malheiro A.C., Karremann M.K. & Pinto J.G., 2011. Statistical modelling of grapevine yield in the Port Wine region under present and future climate conditions. *Int. J. Biometeorol.* **55**, 119–131.
- Soil Survey Staff. 2014. Claves para la Taxonomía de Suelos. Décimo segunda Ed. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. Servicio de Conservación de Recursos Naturales, Washington, DC.
- Tonietto J. & Carbonneau A., 2004 A multicriteria climatic classification system for grapegrowing regions worldwide. *Agri. For. Meteorol.* **124**, 81–97.
- Tregoa O., van Leeuwen C., Choné X. & Gaudillère J.P., 2002. Étude du régime hydrique et de la nutrition azotée de la vigne par des indicateurs physiologiques. Influence sur le comportement de la vigne et la maturation du raisin (*Vitis Vinifera* L. CV Merlot, 2000, Bordeaux). *J. Int. Sci. Vigne Vin* **3**, 133–142.
- Ubalde J.M., Sort X. & Poch R.M., 2011. How soil forming processes determine soil-based viticultural zoning. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* **11**(1), 100–126.
- Unamunzaga O., Besga G., Castellón A., Usón M.A., Chéry, Y., Gallejones P. and Aizpurua A., 2015. Spatial and vertical analysis of soil properties in a Mediterranean vineyard soil. *Soil Use Manage.* **30**, 285–296.
- Urretavizcaya I., Santesteban L.G., Tisseyre B., Guillaume S., Miranda C. & Royo J.B., 2014. Oenological significance of vineyard management zones delineated using early grape sampling. *Precis. Agric.* **15**, 111–129.
- van Leeuwen C., Friant P., Choné X., Tregoa O., Koundouras S. & Dubourdiou D., 2004. Influence of climate, soil, and cultivar on terroir. *Am. J. Enol. Vitic.* **55**(3), 207–217.
- van Leeuwen C. & Seguin G., 2006. The concept of terroir in viticulture. *J. Wine Res.* **17**(1), 1–10.
- Vaudour E. & Shaw A.B., 2005. A worldwide perspective on viticultural zoning. *S. Afr. J. Enol. Vitic.* **26**(2), 106–115.

- Vicente-Villardón J.L., 2014. MULTBIPLOT: A package for multivariate analysis using Biplots. *Departamento de Estadística. Universidad de Salamanca.* <http://biplot.usal.es/ClassicalBiplot/index.html>
- Wang R., Sun Q. & Chang Q., 2015. Soil types effect on grape and wine composition in Helan Mountain area of Ningxia. *PLoS ONE* **10**(2), e0116690. doi:10.1371/journal.pone.0116690.



CAPÍTULO 3: *How will climate change influence grapevine cv. Tempranillo photosynthesis under different soil textures?*



Photosynthesis Research (2015) 124: 199–215.

Authors: Urtzi Leibar¹, Ana Aizpurua¹, Olatz Unamunzaga¹, Inmaculada Pascual², Fermín Morales^{2,3}

¹Environment Quality Department, Neiker-Tecnalia, Bizkaia Technological Park, 812 Berreaga St. 1., 48160 Derio, Bizkaia, Spain

²Plant Stress Physiology Group, Environmental Biology Department, Universidad de Navarra, Associated Unit to CSIC, EEAD Zaragoza and ICVV, Logroño, Irunlarrea 1, 31008 Pamplona, Navarra, Spain

³Department of Plant Nutrition, Aula Dei Experimental Station, CSIC, PO Box 13034, 50080 Zaragoza, Spain

Abstract

While photosynthetic responses to elevated CO₂, elevated temperature, or water availability have previously been reported for grapevine as responses to single stress factors, reports on the combined effect of multiple stress factors are scarce. In the present work, we evaluated effects of simulated climate change [CC; 700 ppm CO₂, 28/18 °C, and 33/53 % relative humidity (RH), day/night] versus current conditions (375 ppm CO₂, 24/14 °C, and 45/65 % RH), water availability (well-irrigated vs. water deficit), and different types of soil textures (41, 19, and 8 % of soil clay contents) on grapevine (*Vitis vinifera* L. cv. Tempranillo) photosynthesis. Plants were grown using the fruit-bearing cutting model. CC increased the photosynthetic activity of grapevine plants grown under well-watered conditions, but such beneficial effects of elevated CO₂, elevated temperature, and low RH were abolished by water deficit. Under water-deficit conditions, plants subjected to CC conditions had similar photosynthetic rates as those grown under current conditions, despite their higher sub-stomatal CO₂ concentrations. As expected, water deficit reduced photosynthetic activity in association with inducing stomatal closure that prevents water loss. Evidence for photosynthetic downregulation under elevated CO₂ was observed, with decreases in photosynthetic capacity and leaf N content and increases in the C/N ratio in plants subjected to CC conditions. Soil texture had no marked effects on photosynthesis and did not modify the photosynthetic response to CC and water-deficit conditions. However, in mature well-irrigated plants grown in the soils with the highest sand content, an important decrease in stomatal conductance was observed as well as a slight decrease in the utilization of absorbed light in photosynthetic electron transport (measured as photochemical quenching), possibly related to a low water-retention capacity of these soils even under well-watered conditions.

Keywords Climate change • Grapevine • Photosynthesis • Soil texture • Water deficit

Este artículo ha sido eliminado por restricciones de derechos de autor

Leibar, U., Aizpurua, A., Unamunzaga, O. et al. How will climate change influence grapevine cv. Tempranillo photosynthesis under different soil textures? *Photosynth Res* (2015) 124 (2): 199-215. <https://doi.org/10.1007/s11120-015-0120-2>

CAPÍTULO 4: Grape yield and quality responses to simulated year 2100 expected climatic conditions under different soil textures



Journal of the Science of Food and Agriculture 17 OCT 2016 DOI: 10.1002/jsfa.8086

-Comunicación oral y Conferencia de prensa: European Geosciences Union General Assembly 2014, Viena | Austria | 27 Abril – 02 May 2014

Authors: Urtzi Leibar^{φ,a}, Inmaculada Pascual^b, Fermín Morales^c, Ana Aizpurua^a and Olatz Unamunzaga^a

^φCurrent address: Hazi Fundazioa, Area of Statistics, Sectorial Analysis and Paying Agency's Technical Services, Granja Modelo de Arkaute s/n, 01192, Arkaute, Araba, Spain.

^aEnvironment Quality Department, Neiker-Tecnalia, Bizkaia Technological Park, 812 Berreaga St. 1., 48160 Derio, Bizkaia, Spain

^bPlant Stress Physiology Group, Environmental Biology Department, Universidad de Navarra, Associated Unit to CSIC, EEAD Zaragoza and ICVV, Logroño, Irunlarrea 1, 31008 Pamplona, Navarra, Spain

^cDepartment of Plant Nutrition, Aula Dei Experimental Station, CSIC, PO Box 13034, 50080 Zaragoza, Spain

Abstract

Background: The influence of global warming on grape quality is a great concern among grapegrowers and enologists. The effects of simulated year 2100 expected CO₂, temperature and relative humidity (RH) conditions (FCC; 700 μmol CO₂ mol⁻¹ air, 28/18 °C day/night and 33/53% RH, day/night) versus the current situation (Curr; 390 μmol CO₂ mol⁻¹ air, 24/14 °C and 45/65% RH); well-irrigated versus expected future water deficit and three soils with different clay contents (41, 19 and 8%) on yield and berry quality of grapevine cv. Tempranillo were evaluated.

Results: FCC shortened the time between fruit set and veraison and between fruit set and maturity by up to 7 and 10 days, respectively. This faster maturity led to higher must pH and tonality and reduced malic and tartaric acid concentrations, total anthocyanin concentration and colour intensity. Water deficit delayed ripeness for up to 9 days and reduced vegetative growth and malic acid concentration of grapes. However, this malic acid reduction did not occur with the clayey soils. These soils induced the lowest root fresh weight and berries with lower total anthocyanin concentration.

Conclusion: Among the adaptation techniques to cope with the described effects on fruit composition, soil selection should be considered with attention in addition to irrigation practices.

Este artículo ha sido eliminado por restricciones de derechos de autor

Leibar, U. , Pascual, I. , Morales, F. , Aizpurua, A. and Unamunzaga, O. (2017), Grape yield and quality responses to simulated year 2100 expected climatic conditions under different soil textures. *J. Sci. Food Agric.*, 97: 2633-2640. doi:10.1002/jsfa.8086

Introduction

The impacts of global warming at regional scales are raising many questions for wine producers.¹ It is expected that the atmospheric CO₂ concentration could increase to approximately 700 μmol CO₂ mol⁻¹ air at the end of the present century.² If greenhouse gas emissions continue as they are currently, air temperature is expected to increase by up to 4.8 °C.³ In addition, the predictions about global warming in southern Europe suggest a reduction in rainfall and an increased evapo-transpiration.² These scenarios will lead to more frequent water stress situations with negative impacts on the viticulture of Mediterranean winegrowing areas.

Because climatic parameters are the main drivers of grapevine growth and grape ripening, climate change can impact the whole grapevine physiology.⁴ An elevated atmospheric CO₂ concentration may result in a greater accumulation of total biomass and, consequently, increased yield.^{4,5} Growth period temperature influences phenology and the length of the growing season, and earlier harvest dates are expected with high temperatures. As a consequence of CO₂ and temperature increases, the yield, grape composition and quality will be affected. On the other hand, water stress decreases plant carbon assimilation, vegetative growth and yield.⁶ Therefore, phenology, grapevine water status and physiological processes including grape ripening might all be modified thoroughly by climate change, with important consequences on wine production⁷ and quality.¹

Grapevines are grown in a wide range of soils around the world. However, the influence of soil properties on the wine characteristics has not been analysed so widely.⁸ Nevertheless, since the 1970s, winemakers have shown a growing concern for the effects of soil composition and texture on wine quality. Among others, Renouf *et al.*⁹ studied the impact of soil type, grapevine variety and

rootstock on grape yield and wine quality in prestigious estates located in the Bordeaux area (France), where less developed soils produced the highest quality wines. Tramontini *et al.*¹⁰ observed that the soil effect was predominant over the genetic characteristics of the cultivar, thus reinforcing the idea that the soil is a key factor for grapevine productivity and fruit quality. Soil provides nutrients and water to grapevines, and therefore, soil chemical properties or soil water imbalance will affect grapevine growth and grape composition. Soil influences grapevine water status through soil water-holding capacity and, possibly, accessibility to the water table.⁸ Clayey soils have fine particles and retain large amounts of water but are poorly drained, and they are usually difficult to manage.¹¹ Conversely, sandy soils are coarse and usually excessively drained, with low water retention capacity.¹¹ Hence, soil characteristics can help to explain differences in wine quality within the same region or climate classification.

Some studies have documented the influence of atmospheric CO₂ concentration, temperature or water availability on grape quality, when these factors are applied individually, but not in combination, because such studies under field conditions are complex, difficult and expensive to execute.¹² Whereas the effects of CO₂, temperature and specifically water availability can be modulated by soil properties such as soil texture, few studies have studied their interactive effects. Thus, the aim of this work was to evaluate the effect of the simulated year 2100 expected climatic conditions, that is: (1) combined elevated CO₂, elevated temperature and reduced relative humidity, and (2) low water availability, in comparison with current conditions on plant growth, phenology and yield parameters and grape composition of grapevine (*Vitis vinifera* L.) cv. Tempranillo, grown under different soil textures.

Material and methods

Establishment of potted plants

Dormant cuttings of *Vitis vinifera* L. cv. Tempranillo clone RJ-43 were obtained in 2012 from an experimental vineyard of the Institute of Sciences of Vine and Wine (Logroño, Spain). Cuttings were selected to obtain fruit-bearing cuttings, grapevine plants with one single cluster, according to Mullins¹³ and modified by Ollat *et al.*¹⁴ and Santa María.¹⁵ Rooting was induced using indole butyric acid (September 2012), in a rock-wool heat-bed (27 °C) kept in a cool room (4 °C). One month later (October 2012), rooted cuttings were planted in 2-L plastic pots containing a mixture of perlite, vermiculite and peat (1:1:1, v/v/v) and transferred to the first greenhouse. Only a single flowering stem was allowed to develop on each plant. Growth conditions until fruit set were 24/14 °C and 60/70% relative humidity (RH) (day/night) and natural daylight. A supplemental system of high-pressure sodium lamps (HQI-TS 400 W/D; Osram, Augsburg, Germany) was triggered when photosynthetic photon flux density (PPFD) dropped below 1000 $\mu\text{molm}^{-2} \text{s}^{-1}$ (14 h photoperiod). Humidity and temperature were controlled using M22W2HT4X transmitters (Rotronic Instrument Corp., Hauppauge, NY, USA). PPFD was monitored with an LI-190SZ quantum sensor (LI-COR, Lincoln, NB, USA). Plants were irrigated with a nutrient solution.¹⁶

Experimental design

At fruit set, once plant viability and fruit setting of the single cluster per plant were ensured, plants were divided into 12 homogeneous groups of 8–11 plants and transplanted to pots (6 L) filled with soil mixtures in order to start with all experimental conditions. The transplant process was made with extreme care, and no significant amount of roots was lost. These plants were selected to have similar intergroup variability in terms of grape bunch size, avoiding changes in berry quality due to sink strength.

Growing conditions

Plants were subjected from fruit set to maturity (defined at 21–23 Brix) to (1) two glasshouse conditions (GC), combining two CO₂ concentrations, two temperatures and two relative humidity (RH) regimes: simulated year 2100 expected climatic conditions (FCC; 700 μmol CO₂ mol⁻¹ air (ppm) CO₂, 28/18 °C, day/night and 33/53% RH, day/night) vs. current situation (Curr; 390 ppm CO₂, 24/14 °C and 45/65% RH); (2) three soil textures: 41, 19 and 8% soil clay content; and (3) two water availabilities: well-irrigated (WI) vs. expected future water deficit (WD: 60% of the water applied to the WI plants). As in potted plant establishment, the above-mentioned supplemental light system of high-pressure sodium lamps was used. The photoperiod was 15 h. Thus, 12 treatments were applied in a factorial design (two glasshouse conditions × three soil textures × two water availabilities) (Table 4.1) as previously reported.¹⁶ To prevent edge effect, plants were rotated once a week within the corresponding greenhouse. Vegetative growth was not pruning-controlled.

Table 4.1. Treatments applied to *Vitis vinifera* (cv. Tempranillo) plants from fruit set to maturity at the greenhouse experiment

Glasshouse conditions	Soil texture	Water availability
Simulated year 2100 expected CO ₂ , T and RH conditions FCC 700 μmol CO ₂ mol air ⁻¹ 28/18 °C 33/53% RH	41% clay	Well irrigated
		Expected future water deficit
	19% clay	Well irrigated
		Expected future water deficit
	8% clay	Well irrigated
		Expected future water deficit
Current CO ₂ , T and RH situation Curr 390 μmol CO ₂ mol air ⁻¹ 24/14 °C 45/65% RH	41% clay	Well irrigated
		Expected future water deficit
	19% clay	Well irrigated
		Expected future water deficit
	8% clay	Well irrigated
		Expected future water deficit

Climatic conditions

The CO₂, temperature and RH conditions set by the IPCC¹⁷ for the period 2070–2100 were simulated in two different growth chamber–greenhouses¹⁶ (GCG), leading to an increase in the CO₂ concentration up to 700 μmol CO₂ mol⁻¹ air and an increase in the temperature of 4 °C. Regarding relative humidity, ENSEMBLES models (based on IPCC data), according to the Max Planck Institute model (MPI-ECHAM5; reported in Leibar *et al.*¹⁶), state the relative humidity for the summer period will be 12% lower (change signal) at the end of the present century in the area of study (i.e. in the grid or region of interest, *Denominación de Origen Calificada* Rioja, DOCa Rioja).

Soil characteristics

To study the influence of three contrasting soil textures on grape yield and quality, a typical clay soil from Rioja was collected with high pH and carbonate content. It was mixed with silica sand to obtain three different soil textures, that is, 41% clay (soil), 19% clay (soil and sand 1:1, v/v) and 8% clay (soil and sand 1:3, v/v), and put in 6-L plastic pots. Properties of the different soil mixtures have been previously reported in Leibar *et al.*¹⁶

Water status

Well-irrigated plants were kept at container capacity, never letting the soil water content drops below 20% and they were watered to achieve approximately 35% moisture, representing approximately 500–800 mL of water or nutrient solution every day, never becoming waterlogged. In the expected future water deficit treatment, plants received 60% of the water applied to well-irrigated plants. Hence, well-irrigated plants received 50 L during the experiment while expected future water deficit received 30 L. Such a water deficit plants level was chosen according to the model of the Max Planck Institute, which establishes that, in the

summer period, precipitation will be 40% lower in DOCa Rioja at the end of the present century (change signal). According to climatic models, future CO₂, temperature and relative humidity conditions have lower uncertainty intervals than water availability. However, it is easier to control the water content of the soil than climatic conditions, such as temperature or CO₂. Soil water sensors (EC-5 volumetric water content sensor; Decagon Devices, Pullman, WA, USA) were placed in the pots to control irrigation. Plants were irrigated, from fruit set to ripeness, with half-strength Hoagland nutrient solution or distilled water to provide the same amount of nutrients to all treatments.

Measurements

Plant growth and yield parameters

Plants were harvested individually at maturity, when berry total soluble solid content was between 21 and 23 Brix. Leaves were counted, and total leaf area was estimated by measuring midrib length of leaves and calculated as: $\text{leaf area} = -4.65 + (2.23 \times \text{midrib length}) + (0.96 \times \text{midrib length}^2)$.¹⁵ Root and bunch fresh weight, berry diameter, the skin/pulp ratio and berry weight were determined from each plant (one plant as a biological replicate). Berry weight and berry diameter were measured in 10 berries of each cluster with a weighing scale and calliper respectively, and the average was calculated for both parameters. One hundred berries were collected randomly from each plant. Fifty of these berries were used for the study of technological ripeness (total soluble solids: TSS content, malic and tartaric acid concentrations) and the other 50 berries for phenolic ripeness measurements (chromatic characteristics and anthocyanin concentration). Grapes from two different plants within the same treatment (8–11 plants) were pooled in order to have four to six biological replicates per treatment (two plants made one biological replicate). Therefore, we had two samples of 100 berries per biological replicate for each grape quality analysis. These grape

samples were frozen in liquid nitrogen and stored at $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ until analysis. Finally, leaf, root, shoot and bunch dry weights were calculated after drying them in an oven at $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ until constant weight. Total dry weight was calculated as the sum of all of the dried parts.

Grape quality parameters

For the study of technological ripeness, berries were weighed, manually crushed and filtered, removing seeds and skins. Then, extracts were centrifuged at $4.302 \times g$ for 10min at $4\text{ }^{\circ}\text{C}$, and the supernatants were used for the following determinations: TSS content (Brix) measured using a refractometer (Zuzi model no. 315, Digital ABBE, Beriáin, Spain); pH (pH-meter); L-malic acid was measured by an enzymatic method (Enzytec L-Malic Acid, Boehringer Mannheim/R-Biopharm, Darmstadt, Germany) and tartaric acid by using the modified Rebelein's method.^{18,19}

For the study of total anthocyanin concentration and colour properties, berries were weighed and ground in a blender (omnimixer). Part of the extract was centrifuged at $4.302 \times g$ for 10min and diluted 10 times. Absorbance was measured at 420, 520 and 630nm using a Hitachi spectrophotometer (Model U-2001; Hitachi Instruments Inc., Tokyo, Japan). Colour intensity was calculated as the sum of the absorbance at 420, 520 and 620 nm. The tonality index was determined by the ratio between the absorbance at 420 and 520 nm.²⁰ Total anthocyanin concentration was determined after maceration for 4 h.²¹ For maceration, homogenate and buffer were mixed (1:1 by volume), and HCl (pH 1.0) buffer was used. Subsequently, the macerated samples were centrifuged at $4.302 \times g$ for 10min, and the supernatants were used for the following determination. Total anthocyanin concentrations (extracted at pH 1.0) were determined using the methodology described by Ribéreau-Gayon and Stonestreet,²² by measuring the absorbance at 520 nm.

Statistical analysis

Statistical analysis was carried out with R software (R Development Core Team, Vienna, Austria). The data were analysed with a three-way analysis of variance to investigate the effects of the CO₂–temperature–relative humidity regime, soil texture, water availability and their interactions. The results were considered statistically significant at $p < 0.05$. The Tukey HSD test was used as a post hoc technique when the effects of treatments were statistically significant. When there was any interaction between factors, further analysis of variance was required to separate factors into levels. Data are presented as means \pm standard error (SE).

Results

Plant growth, phenology and yield parameters

No significant interaction among glasshouse conditions (GC), water availability and soil texture was observed for plant growth, yield parameters and berry characteristics (data not shown). Simulated year 2100 expected CO₂, temperature and RH conditions (FCC) shortened the time between fruit set and veraison and between fruit set and maturity (up to 7 and 10 days, respectively) (Table 4.2). Plants grown under FCC had more leaves than plants grown under the current CO₂, temperature and RH situation (Curr) (Table 4.2). However, total leaf area, total dry weight and root fresh and dry weight were not significantly modified by FCC. Expected future water deficit did not modify the elapsed time between fruit set and veraison, but maturity was delayed up to 9 days (Table 4.2). Total leaf area, total dry weight and root fresh and dry weight were significantly lower in WD plants compared to WI plants. Berries from water-stressed plants had, as expected, an increased skin/pulp ratio in comparison with well-irrigated ones (Table 4.2). Root fresh weight was the only growth parameter that was affected by soil texture, and plants grown in the soil with the lowest clay content had higher

root growth than plants grown in more clayey soils (Table 4.2). Root dry weight had the same trend as fresh weight but there were not significant differences. Berry weight and diameter were no significantly affected by any factor (data not shown).

Table 4.2. Mean and standard error values of elapsed time from fruit set to veraison and from fruit set to maturity, number of leaves, total leaf area, total dry weight, root fresh weight and skin/pulp ratio in grapevine (cv. Tempranillo) plants grown under two glasshouse conditions (GC): Curr and FCC; two water availabilities (WA): well-irrigated (WI) and expected future water deficit (WD); and three soil textures (ST): 41, 19 and 8% clay

	Elapsed time (days)		Number of leaves	Total leaf area (cm ²)	Total dry weight (g)	Root fresh weight (g)	Root dry weight (g)	Skin/Pulp ratio
	From fruit set to veraison	From fruit set to maturity						
Glasshouse conditions (GC)								
Curr	39 ± 0.05 ^a	70 ± 1.34 ^a	22.49 ± 1.30 ^b	2834 ± 156	116.0 ± 3.1	40.79 ± 1.93	8.85 ± 0.70	0.28 ± 0.02
FCC	32 ± 0.07 ^b	60 ± 1.19 ^b	29.53 ± 1.62 ^a	2809 ± 154	113.2 ± 3.2	37.26 ± 3.06	8.32 ± 0.42	0.30 ± 0.02
Water availability (WA)								
WI	33 ± 0.06	60 ± 1.12 ^b	32.47 ± 1.47 ^a	3507 ± 147 ^a	125.0 ± 3.3 ^a	49.45 ± 2.47 ^a	10.54 ± 0.62 ^a	0.25 ± 0.01 ^b
WD	34 ± 0.06	69 ± 1.48 ^a	19.44 ± 1.03 ^b	2112 ± 88 ^b	103.6 ± 2.2 ^b	28.33 ± 1.46 ^b	6.49 ± 0.33 ^b	0.35 ± 0.02 ^a
Soil texture (ST)								
41% clay	36 ± 0.05	63 ± 1.64	26.94 ± 2.14	2782 ± 197	114.6 ± 3.9	34.60 ± 2.87 ^b	7.92 ± 0.80	0.32 ± 0.03
19% clay	36 ± 0.06	65 ± 1.87	25.37 ± 1.89	2890 ± 194	114.5 ± 3.5	36.93 ± 2.72 ^b	8.78 ± 0.68	0.26 ± 0.01
8% clay	35 ± 0.06	65 ± 1.80	25.95 ± 1.68	2795 ± 181	114.6 ± 4.2	45.86 ± 3.40 ^a	9.04 ± 0.64	0.29 ± 0.02
GC	***	***	***	NS	NS	NS	NS	NS
WA	NS	***	***	***	***	***	***	***
ST	NS	NS	NS	NS	NS	**	NS	NS

NS, no significant differences, *** $p < 0.001$, ** $0.001 \leq p < 0.01$, Different superscript letters indicate significant differences ($p < 0.05$) among levels of the applied factor.

Grape quality parameters

Grapes grown under FCC had higher pH, and lower malic and tartaric acid concentrations than grapes grown under Curr (Table 4.3). Berries from water-stressed plants had increased pH values compared to well-irrigated ones (Table 4.3). A significant interaction was observed between water availability and soil texture for malic acid. Thus, whereas under well-watered conditions, no differences were observed among soil textures for malic acid concentration, expected future water deficit only decreased the berry malic acid concentration of plants grown in soils with 19% and 8% clay, but not in those grown in more clayey soil (Fig. 4.1).

Table 4.3. Mean and standard error values of malic acid and tartaric acid concentrations and pH in grapevine (cv. Tempranillo) plants grown under two glasshouse conditions (GC): Curr and FCC; two water availabilities (WA): well-irrigated (WI) and expected future water deficit (WD); and three soil textures (ST): 41, 19 and 8% clay

Parameter	Malic acid (g L ⁻¹)	Tartaric acid (g L ⁻¹)	pH
Glasshouse conditions (GC)			
Curr	7.29 ± 0.24 ^a	2.70 ± 0.11 ^a	3.24 ± 0.02 ^b
FCC	5.72 ± 0.29 ^b	2.20 ± 0.14 ^b	3.41 ± 0.02 ^a
Water availability (WA)			
WI	INT	2.57 ± 0.14	3.29 ± 0.03 ^b
WD		2.31 ± 0.66	3.37 ± 0.12 ^a
Soil texture (ST)			
41% clay	INT	2.39 ± 0.18	3.37 ± 0.03
19% clay		2.49 ± 0.18	3.32 ± 0.03
8% clay		2.44 ± 0.14	3.30 ± 0.04
GC	***	*	***
WA	INT	NS	**
ST	INT	NS	NS
GC x WA	NS	NS	NS
GC x ST	NS	NS	NS
WA x ST	*	NS	NS
GC x WA x ST	NS	NS	NS

NS, no significant differences, *** $p < 0.001$, ** $0.001 \leq p < 0.01$, * $0.01 \leq p < 0.05$. Different superscript letters indicate significant differences ($p < 0.05$) among levels of the applied factor. INT: WA × ST interaction is significant, WA and ST factors influences are analysed in Fig. 4.1.

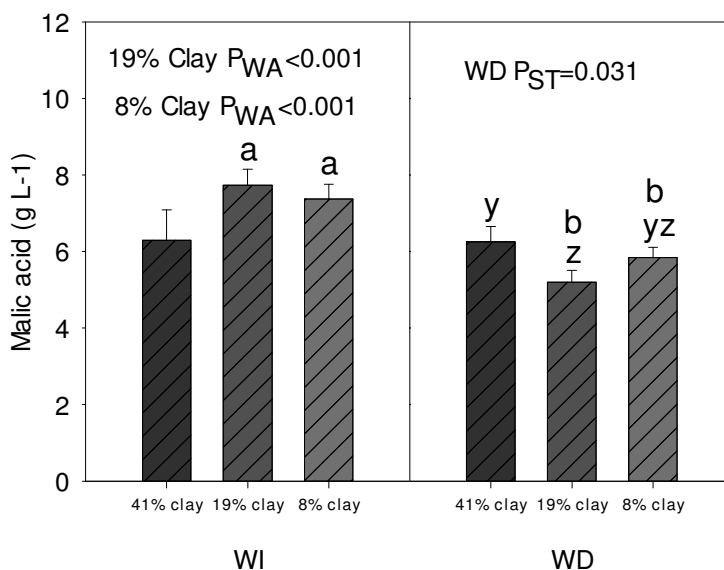


Figure 4.11. Interaction analysis of malic acid in grapevine (cv. Tempranillo) plants grown under two water availabilities (WA) (Well-irrigated: WI and Expected future water deficit: WD) and three soil textures (ST) (41, 19 and 8% clay). Different lower-case (a,b) letters indicate significant differences ($p < 0.05$) between well irrigated and expected future water deficit within each soil type (p -value of water availability: P_{WA}). Different lower-case (y,z) letters indicate significant differences ($p < 0.05$) among different soil textures within each water availability (p -value of soil texture: P_{ST}). Vertical bars are the standard errors.

No significant interactions among GC, water availability and soil texture were observed for total anthocyanins, colour intensity and tonality (data not shown). Total anthocyanin concentration and colour intensity were significantly lower in berries grown under FCC than in those grown under Curr (Table 4.4). On the other hand, FCC produced musts that had a higher tonality compared with Curr. Regarding soil texture, berries of plants grown in the soil with 8% clay had higher total anthocyanin, compared to those sampled from plants grown in higher clay content soils (Table 4.4).

Table 4.4. Mean and standard error values of total anthocyanin concentration, colour intensity and tonality, in grapevine (cv. Tempranillo) plants grown under two glasshouse conditions (GC): Curr and FCC; two water availabilities (WA): well-irrigated (WI) and expected future water deficit (WD); and three soil textures (ST): 41, 19 and 8% clay

	Total anthocyanins (mg L ⁻¹)	Colour intensity	Tonality
Glasshouse conditions (GC)			
Curr	677 ± 19 ^a	9.50 ± 0.43 ^a	0.51 ± 0.01 ^b
FCC	516 ± 25 ^b	6.17 ± 0.33 ^b	0.58 ± 0.02 ^a
Water availability (WA)			
WI	605 ± 27	7.89 ± 0.46	0.53 ± 0.02
WD	582 ± 144	7.73 ± 2.85	0.56 ± 0.07
Soil texture (ST)			
41% clay	538 ± 35 ^b	7.35 ± 0.65	0.57 ± 0.02
19% clay	591 ± 27 ^{ab}	7.31 ± 0.54	0.54 ± 0.02
8% clay	650 ± 33 ^a	8.72 ± 0.59	0.53 ± 0.01
GC	***	***	**
WA	NS	NS	NS
ST	*	NS	NS

NS, no significant differences, *** $p < 0.001$, ** $0.001 \leq p < 0.01$, * $0.01 \leq p < 0.05$. Different superscript letters indicate significant differences ($p < 0.05$) among levels of the applied factor.

Discussion

This study aimed to investigate the effect of simulated year 2100 expected climatic conditions, specifically (1) combined elevated CO₂, elevated temperature and reduced RH (FCC); and (2) low water availability (WD), on grapevine growth, phenology and yield parameters and grape composition, grown under three contrasting soil textures in comparison with current climatic conditions.

Plant phenology and growth

Grapevine is one type of crop that is most challenged by climate change.²³ In our study, FCC accelerated berry development in comparison with Curr. Plants were harvested when grapes reached the same sugar content (21–23 Brix); thus, the

advancement of ripeness induced by FCC indicates a faster sugar accumulation compared to Curr plants. Berry sugar accumulation and therefore the rate of maturation depend on the import of photoassimilates. A higher photosynthetic rate of FCC plants, previously reported by Leibar *et al.*,¹⁶ could be, at least in part, the reason for such faster sugar accumulation, as Martínez-Lüscher *et al.*²⁴ showed a high correlation between photosynthetic rates and rates of sugar accumulation. When observing data from the last decades, advancements in grapevine phenology due to future climatic conditions have been reported, taking into consideration the whole growth period.²³ After modelling the phenological development, Pieri *et al.*⁷ highlighted that the whole phenological calendar will likely be shifted towards earlier dates by 20–40 days, by the end of the century. In our study, the observed advancement in phenology was not as large as that reported by Pieri *et al.*,⁷ which could be related to the fact that in this study, FCC treatment was applied only from fruit set to maturity, and not during the whole growth period.

On the other hand, plants grown under WD took up to 9 days longer to reach grape berry ripeness. This delay was mainly due to a slow-down of stage III of berry growth (comprising the period between veraison and maturity) and was probably a consequence of the reduced photosynthetic activity and leaf area of droughted plants, as reported by Martínez-Lüscher *et al.*²⁵ Although moderate drought, in general, promotes sugar accumulation in the field, thus accelerating grape ripening, the effect varies depending on the timing and intensity of water stress imposition.²⁶ In our study, expected future water deficit treatment significantly impaired grapevine vegetative growth (number of leaves, leaf area, total dry weight and root fresh weight), as well as net photosynthesis and stem water potential (WD: -1.55 MPa vs WI: -0.81 MPa at harvest), stated by Leibar *et al.*¹⁶ The results agree with those of Esteban *et al.*,²⁷ who observed a lower leaf area in plants subjected to water deficit, and with Morlat and Jacquet,²⁸ who reported that water supply had a positive effect on grapevine rooting.

Soil type did not modify grapevine growth and phenological development from fruit set to ripeness, with the exception of root growth. Sandy soils (8% clay) increased only root fresh weight, not dry weight, in comparison with more clayey soils. The limitations of greenhouse experiments with potted plants may lead to results that sometimes differ from those obtained in experiments under field conditions. In this sense, the present result is in disagreement with Morlat and Jacquet,²⁸ who reported a lower root growth in very sandy soils under field conditions, but in their case, lower water availability may also have influenced the root system development. On the contrary, Gill *et al.*²⁹ found a higher root growth of wheat plants in a sandy soil conducted in pots under glasshouse conditions, which agrees with the present results. Soil may affect the root growth due to its penetrability,³⁰ and it is known that a greater macroporosity means lower penetrometer resistance.³¹ Therefore, the greater macroporosity attributed to sandy soils could be the explanation for the greater root growth in the 8% clay treatment.

Berry composition

Grape acid composition and pH are of great importance for juice stability, and they are parameters that are commonly used as quality indicators in musts. This is because the concentration of organic acids not only contributes to sourness and organoleptic properties but also influences anthocyanin pigments in red wines, wine colour and microbiological stability.³² Grapes grown under FCC had lower malic and tartaric acid concentrations, which was associated with higher must pH. Many authors argue the temperature is one of the main factors influencing grape malic acid concentration.^{8,12} Elevated temperatures increase the speed of sugar accumulation, thus hastening acid degradation.³³ This study shows that the combination of elevated temperature and CO₂ also decreased malic acid concentration. By contrast, Gonçalves *et al.*³⁴ and Bindi *et al.*⁵ reported that berry malic and tartaric acid concentrations were not significantly affected by an increase in the atmospheric CO₂ concentration.

Regarding water availability, the increase in pH and reduction in malic acid concentration observed in the grapes subjected to water stress in the present work are in agreement with previous studies.^{35–37} Many authors,^{27,36,38} justify the malic acid decrease due to malate breakdown in grapevines with low water status, although others^{6,39,40} explained such a decrease by respiration due to the cluster thermal effect caused by a reduced vegetative growth. However, there was an interaction between water availability and soil texture for malic acid concentration. Thus, lower water availability only decreased malic acid levels in less clayey soils (19% and 8% clay). Although an initial characterisation of soils showed clear differences in the maximum retention of water for the three different soil textures,¹⁶ where clayey soils (41% clay content) were able to retain 1.84 kg of water while the sandy soils (8% clay content) retained 1.32kg of water, these soils did not show differences among stem water potential values¹⁶ measured at veraison and harvest. Hence, soil water availability could not be the explanation for the malic acid differences.

The results show that berries of plants grown under FCC had significantly lower total anthocyanin concentrations than those grown under Curr. In agreement with this, Salazar-Parra *et al.*¹² and Martínez-Lüscher *et al.*⁴¹ found that the combination of elevated CO₂ and temperature decreased the grape total anthocyanin concentration at maturity. Many authors (Mori *et al.*,⁴² Spayd *et al.*,⁴³ among others) reported that under high temperatures, anthocyanin accumulation is inhibited and contents were decreased in experiments with controlled high temperature (30–35 °C), but the mechanisms responsible for this inhibition have not been completely understood yet.¹² Spayd *et al.*⁴³ stated that anthocyanin concentrations were lower due to elevated temperature either through degradation or inhibition of synthesis, and Mori *et al.*⁴² reported that under high temperatures (35 °C), anthocyanins decreased in grape skins probably due to many factors, such as chemical and/or enzymatic degradation, not just the inhibition of anthocyanin

biosynthesis. However, in our study, the temperature was not so high (28 °C). Moreover, Sadras and Moran,⁴⁴ in an open-top chamber experiment, stated that elevated temperature (ambient temperature elevated up to ~3 °C) delayed the onset of anthocyanin accumulation. Thus, the reason that a decoupling between sugar and anthocyanin accumulation exists is not clearly known.

The decrease in anthocyanin concentration under FCC led to lower colour intensity values. On the other hand, berries under FCC had a higher tonality index. Tonality usually increases concomitantly with decreases in colour intensity, and a high tonality index indicates a lower grape maturity degree. The results agree with those of Salazar-Parra *et al.*,¹² who observed an increase in the tonality index of grapes ripened under elevated CO₂ and temperature. On the contrary, Bindi *et al.*⁵ reported no changes in the colour of wines obtained from grapevines cultivar Sangiovese subjected to elevated CO₂ concentrations, which suggests that temperature could be the factor that most influenced grape colour in the FCC treatment.

Many studies have reported higher anthocyanin levels in berries from grapevines grown under reduced or no irrigation.^{36,45} Water deficit can activate the expression of numerous transcripts associated with the anthocyanin biosynthetic pathway, thus increasing anthocyanin concentration in the skin.⁴¹ Increases in most anthocyanins under drought conditions have also been associated with the differential growth responses of skin and inner mesocarp tissue to water deficit, which results in greater relative skin mass per berry.⁴⁶ Water deficit did not affect the anthocyanin concentration in this study, although the skin pulp ratio was higher in droughted plants. According to the literature, the response of anthocyanins to water deficit is quite variable and contrasting results may be related to differences in the timing of application and severity of water deficit among studies.^{26,36,47} The water deficit level reached in this study (-0.96 ± 0.05

MPa at veraison) would not have been severe enough to affect the anthocyanin concentrations.

Soil properties are associated with grapevine vigour and have a measurable effect on berry, must and wine compositions⁸. Nevertheless, it is sometimes difficult to differentiate wines from various soil types by means of sensory evaluation.³⁰ Grapes cultivated in soils with low water-holding capacity usually lead to wines with higher anthocyanin⁴⁸ and polyphenol concentrations, as well as higher colour intensity,⁴⁹ as seen in the present work, where the soils with lower water-holding capacity (sandy soils) produced musts with a higher anthocyanin concentration. In addition, soil type effects could be maintained under climate change conditions. One of the problems that the winemakers in DOCa Rioja currently have is keeping the acidity at appropriate levels. According to the results obtained in this work, this problem will worsen with projected climatic conditions, which not only entail an increase in temperature and CO₂ but also a decrease in water availability. Additionally, it should be considered that water resources will be limited and it will not be possible to have the necessary water for irrigation. Given this scenario, physical soil properties such as clay content could be considered a good solution for those grapevines in new plantations because the acidity problem could be attenuated in soils with more clay content.

Conclusions

Simulated year 2100 expected CO₂, temperature and RH conditions (FCC) treatment hastened berry sugar accumulation and led to grapes with lower anthocyanin concentrations and colour intensity, suggesting a decoupling between anthocyanin and sugar accumulation, regardless of soil texture. FCC treatment also reduced must malic and tartaric acid concentrations probably associated with the elevated temperature. The expected future water deficit reduced vegetative growth and delayed grape sugar accumulation and consequently the harvest date

determined by sugar content. In addition, water deficit reduced the malic acid concentration only in those soils with lower clay contents. Plants grown in sandy soils had higher root growth and higher grape total anthocyanin concentrations. All of these findings highlight the need that grapevine growers have to adapt to future expected climatic conditions. In this line, not only grapevine management practices such as irrigation should be considered, but it is also important to carefully select the soil for new plantations.

Acknowledgements

We thank the Department of Economic Development and Competitiveness of the Basque Government and Aragón Government (A03 research group) for their financial support. Urtzi Leibar was the recipient of a grant from Fundación Cándido Iturriaga y María Doñabeitia. The authors thank A. Urdiain and M. Oyarzun for excellent technical assistance (University of Navarra) and the Institute of Sciences of Vine and Wine (Logroño, La Rioja, Spain) for the supply of dormant cuttings.

References

- 1 Briche E, Beltrando G, Somot S and Quenol H, Critical analysis of simulated daily temperature data from the ARPEGE-climate model: application to climate change in the Champagne wine-producing region. *Climatic Change* **123**:241–254 (2014).
- 2 Intergovernmental Panel on Climatic Change (IPCC), *Climate Change 2013: the Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge (2013).
- 3 National Academy of Sciences, *Climate Change: Evidence and Causes*. (Set of 5 Booklets). The National Academies Press, Washington DC (2014).
- 4 Bock A, Sparks TH, Estrella N and Menzel A, Climate-induced changes in grapevine yield and must sugar content in Franconia (Germany) between 1805 and 2010. *PLoS ONE* **8**:e69015 (2013).
- 5 Bindi M, Fibbi L and Miglietta F, Free air CO₂ enrichment (FACE) of grapevine (*Vitis vinifera* L.): II. Growth and quality of grape and wine in response to elevated CO₂ concentrations. *Eur J Agron* **14**:145–155 (2001).
- 6 Smart RE and Coombe BH, Water relations of grapevines, in *Water Deficits and Plant Growth*, ed. by Kozłowski TT. Academic Press, New York, pp. 137–196 (1983).
- 7 Pieri, P, Lebon E and Brisson N, Climate change impact on French vineyards as predicted by models, in Proceeding of the XXVIIIth IHC–IS Vitic and Climate, Lisbonne, *Effect of Climate Change on Production and Quality of Grapevines and Their Products*. *Acta Hort* **931**:29–37 (2012).
- 8 van Leeuwen C, Friant P, Choné X, Tregoat O, Koundouras S and Dubourdieu D, Influence of climate, soil, and cultivar on terroir. *Am J Enol Vitic* **55**:207–217 (2004).
- 9 Renouf V, Trégoat O, Roby JP and van Leeuwen C, Soils, rootstocks and grapevine varieties in prestigious Bordeaux vineyards and their impact on yield and quality. *J Int Sci Vigne Vin* **44**:127–134 (2010).
- 10 Tramontini S, van Leeuwen C, Domec JC, Destrac-Irvine A, Basteau C, Vitali M *et al.*, Impact of soil texture and water availability on the hydraulic control of plant and grape-berry development. *Plant Soil* **368**:215–230 (2013).
- 11 Fraga H, Malheiro AC, Moutinho-Pereira J, Cardoso RM, Soares PMM, Cancela JJ *et al.*, Integrated analysis of climate, soil, topography and vegetative growth in Iberian viticultural regions. *PLoS ONE* **9**:e108078 (2014).

- 12 Salazar-Parra C, Aguirreolea J, Sánchez-Díaz M, Irigoyen JJ and Morales F, Effects of climate change scenarios on Tempranillo grapevine (*Vitis vinifera* L.) ripening: Response to a combination of elevated CO₂ and temperature, and moderate drought. *Plant Soil* **337**:179–191 (2010).
- 13 Mullins MG, Test-plants for investigations of the physiology of flowering in *Vitis vinifera* L. *Nature* **209**:419–420 (1966).
- 14 Ollat N, Geny L and Soyer J, Les boutures fructifères de vigne: validation d'un modèle d'étude du développement de la physiologie de la vigne, I. Caractéristiques de l'appareil végétative. *J Int Sci Vigne Vin* **32**:1–9 (1998).
- 15 Santa María E, Incidencia de *Botrytis cinerea* en relación con diferentes aspectos fisiológicos de la vid. PhD thesis, University of Navarra (2004).
- 16 Leibar U, Aizpurua A, Unamunzaga O, Pascual I and Morales F, How climate change will influence grapevine cv. Tempranillo photosynthesis under different soil textures? *Photosynth Res* **124**:199–215 (2015).
- 17 Intergovernmental Panel on Climatic Change (IPCC), *Climate Change: The Physical Basis Summary for Policy Makers*. Cambridge University Press, Cambridge (2007).
- 18 Rebelein H, Rapid quantitative determination of tartaric acid. *Chem Mikrobiol Technol Lebensm* **2**:33–38 (1973).
- 19 Vidal M and Blouin J, Dosage colorimétrique rapide de l'acide tartrique dans les moûts et les vins. *Rev Fr Oenologie* **16**:39–46 (1978).
- 20 Sudraud P, Interprétation des courbes d'absorption des vins rouges. *Annales de Technologie Agricole* **7**:203–208 (1958).
- 21 Glories Y and Augustin M, Maturité phénolique du raisin, conséquences technologiques: Applications aux millésimes 1991 et 1992, in Actes du Colloque "Journée Technique du CIVB", 21 Janvier 1993, Bordeaux, France, pp. 56–61 (1993).
- 22 Ribéreau-Gayon J and Stonestreet E, Le dosage des anthocyanes dans le vin rouge. *Bulletin de la Société Chimique* **9**:2649–2652 (1965).
- 23 Fila G, Gardimana M, Belvini P, Meggio F and Pitacco A, A comparison of different modelling solutions for studying grapevine phenology under present and future climate scenarios. *Agric For Meteorol* **195–196**:192–205 (2014).
- 24 Martínez-Lüscher J, Morales F, Sánchez-Díaz M, Delrot S, Aguirreolea J, Gomès E *et al.*, Climate change conditions (elevated CO₂ and temperature) and UV-B radiation affect grapevine (*Vitis vinifera* cv. Tempranillo) leaf carbon assimilation, altering fruit ripening rates. *Plant Sci* **236**:168–176 (2015).

- 25 Martínez-Lüscher J, Morales F, Delrot S, Sánchez-Díaz M, Gomès E, Aguirreolea J *et al.*, Characterization of the adaptive response of grapevine (cv. Tempranillo) to UV-B radiation under water deficit conditions. *Plant Sci* **232**:13–22 (2015).
- 26 Castellarin SD, Matthews MA, Di Gaspero G and Gambetta GA, Water deficits accelerate ripening and induce changes in gene expression regulating flavonoid biosynthesis in grape berries. *Planta* **227**:101–112 (2007).
- 27 Esteban MA, Villanueva MJ and Lissarrague JR, Effect of irrigation on changes in berry composition of Tempranillo during maturation. Sugars, organic acids, and mineral elements. *Am J Enol Vitic* **50**:418–434 (1999).
- 28 Morlat R and Jacquet A, The soil effect on the grapevine root system in several vineyards of the Loire valley (France). *Vitis* **32**:35–42 (1993).
- 29 Gill JS, Sivasithamparam K and Smettem KRJ, Soil types with different texture affects development of Rhizoctonia root rot of wheat seedlings. *Plant Soil* **221**:113–120 (2000).
- 30 Jackson DI and Lombard PB, Environmental and management practices affecting grape composition and wine quality: A review. *Am J Enol Vitic* **44**:409–430 (1993).
- 31 Wheaton AD, McKenzie BM and Tisdall JM, Management to increase the depth of soft soil improves soil conditions and grapevine performance in an irrigated vineyard. *Soil Till Res* **98**:68–80 (2008).
- 32 Boulton RB, The relationship between total acidity, titratable acidity and pH in wine. *Am J Enol Vitic* **31**:76–80 (1980)
- 33 Webb LB, Watterson I, Bhend J, Whetton PH and Barlow EWR, Global climate analogues for winegrowing regions in future periods: projections of temperature and precipitation. *Aust J Grape Wine Res* **19**:331–341 (2013).
- 34 Gonçalves B, Falco V, Moutinho-Pereira J, Bacelar E, Peixoto F and Correia C, Effects of elevated CO₂ on grapevine (*Vitis vinifera* L.): volatile composition, phenolic content, and *in vitro* antioxidant activity of red wine. *J Agric Food Chem* **57**:265–273 (2009).
- 35 des Gachons CP, Van Leeuwen C, Tominaga T, Soyer JP, Gaudillère JP and Dubourdieu D, Influence of water and nitrogen deficit on fruit ripening and aroma potential of *Vitis vinifera* L. cv. Sauvignon blanc in field conditions. *J Sci Food Agric* **85**:73–85 (2005).
- 36 Shellie KD and Bowen P, Isohydrodynamic behavior in deficit-irrigated Cabernet Sauvignon and Malbec and its relationship between yield and berry composition. *Irrigation Sci* **32**:87–97 (2014).
- 37 Matthews MA and Anderson MM, Fruit ripening in *Vitis vinifera*: responses to seasonal water deficits. *Am J Enol Vitic* **39**:313–320 (1988).

- 38 Matthews MA and Anderson MM, Reproductive development in grape (*Vitis vinifera* L.): responses to seasonal water deficits. *Am J Enol Vitic* **40**:52–60 (1989).
- 39 Williams LE, Dokoozlian NK and Wample R, Grape, in Handbook of Environmental Physiology of Fruit Crops, vol. 1, Temperate Crops, ed. by Schafer B and Andersen PC. CRC Press, Boca Raton, FL, pp. 85–133 (1994).
- 40 Basile B, Marsal J, Mata M, Vallverdú X, Bellvert J and Girona J, Phenological sensitivity of Cabernet Sauvignon to water stress: Vine physiology and berry composition. *Am J Enol Vitic* **62**:452–461 (2011).
- 41 Martínez-Lüscher J, Sánchez-Díaz M, Delrot, S Aguirreolea J, Pascual I and Gomès E, UV-B alleviates the uncoupling effect of elevated CO₂ and increased temperature on grape berry (*Vitis vinifera* cv. Tempranillo) anthocyanin and sugar accumulation. *Aust J Grape Wine Res* **22**:87–95 (2016).
- 42 Mori K, Goto-Yamamoto N, Kitayama M and Hashizume K, Loss of anthocyanins in red-wine grape under high temperature. *J Exp Bot* **58**:1935–1945 (2007).
- 43 Spayd SE, Tarara JM, Mee DL and Ferguson JC, Separation of sunlight and temperature effects on the composition of *Vitis vinifera* cv. ‘Merlot’ berries. *Am J Enol Vitic* **53**:171–182 (2002).
- 44 Sadras VO and Moran MA, Elevated temperature decouples anthocyanins and sugars in berries of Shiraz and Cabernet Franc. *Aust J Grape Wine Res* **18**:115–122 (2012).
- 45 Bodin F and Morlat R, Characterization of viticultural terroirs using a simple field model based on soil depth, I. Validation of the water supply regime, phenology and vine vigour, in the Anjou vineyard (France). *Plant Soil* **281**:37–54 (2006).
- 46 Roby G, Harbertson JF, Adams DA and Matthews MA, Berry size and vine water deficits as factors in wine grape composition: anthocyanins and tannins. *Aust J Grape Wine Res* **10**:100–107 (2004).
- 47 Esteban MA, Villanueva MJ and Lissarrague JR, Effect of irrigation on changes in the anthocyanin composition of the skin of cv Tempranillo (*Vitis vinifera* L.) gr berries during ripening. *J Sci Food Agric* **81**:409–420 (2001).
- 48 Unamunzaga O, Zonificación de un viñedo de Rioja Alavesa según las propiedades del suelo y su influencia sobre producción y calidad. PhD thesis, Universidad de Zaragoza (2010).
- 49 Filippetti I, Allegro G, Valentini G, Pastore C, Colucci E and Intrieri C, Influence of vigour on vine performance and berry composition of cv. Sangiovese (*Vitis vinifera* L.). *J Int Sci Vigne Vin* **47**:21–33 (2013).

CAPÍTULO 5: *Grapevine nutritional status and K concentration of must under future expected climatic conditions and different soils*



-Enviado a: *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*

-Comunicación oral: ClimWine 2016. Sustainable grape and wine production in the context of climate change, Burdeos, Francia, Abril 10-13, 2016

Authors: Urtzi Leibar^{1,2}, Inmaculada Pascual³, Ana Aizpurua¹, Fermín Morales⁴ and Olatz Unamunzaga¹

¹Environment Quality Department, Neiker-Tecnalia, Bizkaia Technological Park, 812 Berreaga St. 1., 48160 Derio, Bizkaia, Spain

²Current address: Hazi Fundazioa, Area of Statistics, Sectorial Analysis and Paying Agency's Technical Services, Granja Modelo de Arkaute s/n, 01192, Arkaute, Araba, Spain.

³Plant Stress Physiology Group, Environmental Biology Department, Universidad de Navarra, Associated Unit to CSIC, EEAD Zaragoza and ICVV, Logroño, Irunlarrea 1, 31008 Pamplona, Navarra, Spain

⁴Department of Plant Nutrition, Aula Dei Experimental Station, CSIC, PO Box 13034, 50080 Zaragoza, Spain

Abstract

Nutrition is a relevant issue for winegrowers because it influences grapevine growth, berry composition, as well as must and wine quality. In this research, the following impacts on the nutritional status and the K concentration of the must of cv. Tempranillo grapevines were evaluated: the effect of simulated 2100 expected CO₂, T and relative humidity (RH) conditions (FCC; 700 μmol CO₂/mol air, 28/18 °C day/night and 33/53% RH, day/night) vs. current CO₂, T and RH conditions (Curr; 390 μmol CO₂/mol air, 24/14 °C and 45/65% RH); well-watered vs. future expected water deficit; and three soils with different clay contents (41, 19 and 8%). FCC resulted in reduced N and Ca concentrations in the leaf blades at veraison and of N and Zn at full maturity. Water-stressed blades had higher Na concentrations at veraison and Mn at maturity compared to those in the well-watered treatments. However, well-watered plants had higher K concentrations in the leaves and must than water-stressed plants. Calcium and Mn exhibited higher leaf blade concentrations in more clayey soils at full maturity. Even when nutrient inputs clearly exceeded plant extractions, high soil clay content increased the K concentration in must and consequently could affect wine quality in terms of acidity loss. However, future expected water stress will have the opposite effect, reducing the berry K uptake.

Keywords: climate change / leaf analysis / potassium / soil texture / water deficit

Abbreviations: T – temperature; RH - relative humidity; FCC - simulated year 2100 expected CO₂, T and RH conditions; Curr - current CO₂, T and RH conditions; WA – water availability; WW - well-watered; WD - future expected water deficit; ST - soil texture; CEC - cation exchange capacity.

Introduction

Nutrition is an important issue for wine grape growers since it impacts grapevine growth, fruit set, crop yield, berry composition and ultimately, the quality of the must and wine. Grapevine nutrient needs are moderate, but unbalanced fertilization may lead to both undesired effects on wine quality, including a lack of acidity in wines made from grapes with an excessive potassium (K) supply, and to environmental impacts as a consequence of groundwater nitrate contamination (Romero et al., 2010). Increasingly, consumers and legislators are demanding sustainable production practices with concomitant reduction in vineyard inputs and environmental impacts, putting pressure on winegrowers to better manage fertilisers. Plant analysis is a reliable method to assess grapevine nutritional status. Therefore, fertiliser recommendation programmes are very useful for fruit tree and vineyard management. However, there is still discussion about the most suitable sampling dates and the appropriate tissues to analyse (Benito et al., 2013). Despite the obvious influence of soil fertilization on plant growth and yield, knowledge and understanding about nutrient availability, the actual uptake of different fertilisers and how they are affecting grapevine physiology and productivity is surprisingly poor (Bratašvec et al., 2013).

Monitored data and model simulations indicate that climatic conditions are changing, resulting in increased atmospheric CO₂ concentrations, higher temperatures and rates of evaporation, changes in precipitation patterns, with greater seasonal variability, and more frequent extreme weather events (IPCC, 2013). Thus, the impacts of global warming at regional scales are raising many questions for wine producers. Regarding grapevine nutrition, changes in temperature and evaporation are likely to affect the availability of soil water for grapevines, as well as the internal mechanisms of water movement through the grapevine, with consequences for nutrient uptake and mobilization (Proffitt and

Campbell-Clause, 2012). *Martins* et al. (2014) reported that the influence of enhanced atmospheric CO₂ concentrations on plant productivity and growth has often been explored in combination with alterations in photosynthesis, respiration and carbon use and allocation (*Zhu* et al., 2012), whereas corresponding modifications in mineral composition (with the exception of nitrogen) have received much less attention (*Thiec* et al., 1995). Heavier and more frequent rainfall events could increase the incidence of water logging, leaching and erosion, thereby causing unfavourable conditions for nutrient uptake, as well as a loss of nutrients from the soil (*Proffitt* and *Campbell-Clause*, 2012). This, in turn, is likely to directly affect the ability of grapevines to extract nutrients from the soil and, therefore, to modify nutrient mobility within the grapevine (*Proffitt* and *Campbell-Clause*, 2012).

Potassium is by far the major cation related to berry ripeness (*Mpelasoka* et al., 2003), and its concentration in grapes is related to the must acidity. In a climate change scenario, this cation becomes very relevant since high temperatures could possibly increase K levels (*Mira de Orduña*, 2010). Potassium is involved in a variety of physiological processes, including enzyme activation in photosynthesis and respiration and the maintenance of cellular osmotic potential in plants (*Salisbury* and *Ross*, 1992). Potassium is mobile within the grapevine, and due to the relatively high requirements in vineyards, it is often applied as a fertiliser (*Mosse* et al., 2013). High K additions may negatively impact overall grapevine health and wine quality (*Mpelasoka* et al., 2003) because it is predominantly implicated in the neutralization of tartaric and malic acids in the berries, thereby affecting the acid characteristics of the grapes (*Esteban* et al., 1999). Then, increased K application is associated with a reduction in juice acidity (*Mpelasoka* et al., 2003), thus increasing the expected negative effect of the lack of acidity caused by climatic change (*Leibar* et al., 2016). Application of K to grapevines

has also been found to influence anthocyanin levels and colour intensity (*Mosse et al.*, 2013).

The characteristics of a particular soil have a large influence on the availability of water and the concentration of nutrients stored within it and, in turn, on the availability of nutrients for the grapevine. Grapevine development and yield are affected by soil water and nutrient storage and availability, and these latter, in turn, are influenced by soil depth and fertility, soil physical texture and structure, and soil chemistry, biology and organic matter content (*van Leeuwen et al.*, 2004). Among all of the factors affecting soil nutrition, storage capacity and accessibility, soil texture, root depth and organic matter concentration deserve particular attention (*Gonzalez-Dugo et al.*, 2010). In this regard, soil texture is an important component because it determines the amount of water that a soil can hold when fully wet and the amount of water and nutrients potentially available for grapevine uptake. In fact, any deficiency or excess of water can play a determinant role in root function and tissue mineral concentrations, causing unbalanced grapevine growth and poor yield (*Ghaffari and Ferchichi*, 2011).

Taking into account the importance of mineral nutrition and nutrient balance on grapevine, and within a climate change context, it is of crucial importance to know how changes in environmental factors, such as atmospheric CO₂, temperature, relative humidity (RH), and water availability, can affect plant nutritional status and the K concentration of must, which is central to wine quality. Nevertheless, there are few studies that have evaluated the combined effect of elevated CO₂ concentrations, water availability and elevated temperature on grapevine nutrition because such studies are complex, difficult and expensive to execute under field conditions (*Salazar-Parra et al.*, 2015). Even less frequent are studies where the impact of climate change on different soil types is evaluated. Therefore, the aim of this work was to evaluate the effect of the simulated year

2100 expected climate conditions: (1) a combination of elevated CO₂, elevated temperature and reduced RH and (2) low water availability in comparison with current conditions on the nutritional status and on K concentration of grapevine must (*Vitis vinifera* L.) of cv. Tempranillo grown under different soil textures.

Materials and methods

Potted plant establishment

Dormant cuttings of *Vitis vinifera* L. of cv. Tempranillo clone RJ-43 were obtained in 2012 from an experimental vineyard at the Institute of Vine and Wine Sciences (Logroño, La Rioja, Spain). The cuttings were selected to obtain fruit-bearing cuttings, grapevine plants with one single cluster, in accordance with *Leibar et al.* (2015). Rooting was induced using indole butyric acid (September 2012) in a rock-wool heat-bed (27 °C) kept in a cool room (4 °C). One month later (October 2012), rooted cuttings were planted in 2 L plastic pots containing a mixture of perlite, vermiculite and peat (1:1:1, v/v/v) and were transferred to the first greenhouse. Only a single flowering stem was allowed to develop on each plant, the rest were removed. Growth conditions until fruit set were 24/14 °C and 60/70% RH (day/night) with natural daylight. A supplemental system of high-pressure sodium lamps (HQI-TS 400W/D Osram, Augsburg, Germany) was triggered when photosynthetic photon flux density (PPFD) dropped below 1000 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (14 h photoperiod). Humidity and temperature were controlled using M22W2HT4X transmitters (Rotronic Instrument Corp., Hauppauge, USA). The PPFD was monitored with an LI-190SZ quantum sensor (LI-COR, Lincoln, USA). Plants were irrigated with a nutrient solution proposed by *Ollat et al.* (1998).

Experimental design

At fruit set, the plants were transferred to growth chamber–greenhouses (GCGs) and divided into 12 homogeneous groups of 8-11 plants that would result in the treatments described in the next paragraph. These plants were selected to have similar intergroup variability in terms of grape bunch size, avoiding changes in berry quality due to sink strength. The transplant process was made with extreme care, and no significant amount of roots was lost.

Plants were subjected from fruit set to maturity (defined at 21-23 Brix) to the following conditions: i) two glasshouse conditions (GC), combining two CO₂ concentrations, two temperatures (T) and two RH regimes: simulated year 2100 expected climate conditions (FCC; 700 μmol CO₂/mol air (ppm) CO₂, 28/18 °C, day/night and 33/53% RH, day/night) vs. current climate conditions (Curr; 390 ppm CO₂, 24/14 °C and 45/65% RH); ii) three soil textures: 41, 19 and 8% of soil clay content; and iii) two water availabilities: well-watered (WW) vs. expected future water deficit (WD: 60% of the water applied to the WW plants). As in potted plant establishment, the above-mentioned supplemental light system of high-pressure sodium lamps was used. The photoperiod was 15 h. Thus, 12 treatments were applied in a factorial design (2 glasshouse conditions x 3 soil textures x 2 water availabilities) as previously reported (*Leibar et al. 2015*). To prevent an edge effect, plants were rotated once a week within the corresponding greenhouse. Vegetative growth was not pruning-controlled.

The CO₂, T and RH conditions projected by the *IPCC (2007)* for the period from 2070-2100 were simulated in two different GCGs, with an increase in the CO₂ concentration up to 700 ppm and an increase in temperature of 4 °C. For the RH, ENSEMBLES models (based on IPCC data), based on the Max Planck Institute model (MPI-ECHAM5; *Roeckner et al., 2003*), state that the RH for the

summer period will be 12% lower (change signal) at the end of the present century in the study area (i.e., in the grid or region of interest, “Denominación de Origen Calificada Rioja, DOCa Rioja”).

Soils with a high red clay content are typical in DOCa Rioja (*Barrios, 1994*). To study the influence of three contrasting soil textures on grape yield and quality, a typical clay soil from La Rioja with high pH and low organic matter content was collected. It was mixed with sand to obtain three different soil textures: 41% clay (soil), 19% clay (soil and sand 1:1, v/v) and 8% clay (soil and sand 1:3, v/v) and put into 6 L plastic pots. Analysis by X-ray diffraction was carried out on the same soil type in the area where the sample was taken and showed that approximately 69% of the clay was illite, 10% chlorite, 12% kaolinite and 9% had one interlayer of vermiculite / smectite. The container capacity of each soil was measured as described by *Leibar et al. (2015)*. The properties of the different soil:sand mixtures are shown in Table 5.1. The potassium soil content (Table 5.1) was slightly low according to the reference contents proposed by the regional extension service in the more clayey soil and was very low in the less clayey soils. The soil P content was low in the three soils, and the Mg soil content was low for sandy soils and high for the more clayey ones.

Table 5.1. Physico-chemical properties, particle size fractions, texture, bulk density, pH, organic matter, carbonates, active lime N, P, Mg K, Na and Ca content and cation-exchange capacity (CEC) of the three soils used in the experiment.

	41% clay	19% clay	8% clay
Sand (%) ^a	8	58	86
Silt (%) ^a	51	23	6
Clay (%) ^a	41	19	8
Texture ^a	Silty clay	Sandy loam	Loamy sand
Bulk density (g cm ⁻³)	1.230	1.325	1.410
pH ^b	8.84	9.21	9.39
Organic matter (%) ^a	<0.01	<0.01	<0.01
Carbonates (%) ^a	70.18	19.39	6.32
Active lime (%)	10.17	4.61	0.00
N (%) ^c	0.03	0.01	0.01
P (mg kg ⁻¹) ^a	1.83	1.39	1.27
Mg (meq 100 g ⁻¹) ^a	5.26	2.72	1.15
K (mg kg ⁻¹) ^a	138	67	29
Na (meq 100 g ⁻¹) ^a	0.11		
Ca (meq 100 g ⁻¹) ^a	20.51	18.55	15.50
CEC (meq 100 g ⁻¹) ^a	12.75	6.21	2.43

^aTexture by pipette method, organic matter, carbonates, P, Mg, K, Na, Ca, CEC (MAPA, 1994);

^bpH (1:2.5 soil:water); ^cTotal N (dry combustion using an LECO TruSpec®13 CHNs)

Well-watered plants were maintained at container capacity (20-35% of soil water content), with soil water content maintained above 20%. This represented inputs of approximately 500-800 mL of water or nutrient solution every day. The same amount of water was applied to all plants in order to observe the water availability of each soil type. Under the future expected water deficit treatment, plants received a 60% of the water applied to the well-watered plants. This water deficit level was chosen based on the model from the Max Planck Institute, which establishes that, in the summer period, precipitations will be 40% lower in DOCa Rioja at the end of the present century. Soil water sensors (EC-5 volumetric water

content sensor, Decagon Devices, Washington) were placed into the pots to control irrigation. The plants were irrigated, from fruit set to ripeness, with a half-strength Hoagland nutrient solution or distilled water in order to provide the same amount of nutrients to all treatments.

Measurements

Leaf blade samples opposite from the cluster were collected in all of the plants, as stated by *Benito et al.* (2013), at veraison and maturity. Samples were dried at 70 °C in a forced-air oven for 48 h. Blades from every two plants within the same treatment were pooled in order to have 4-6 biological replicates per treatment; therefore, two plants made one biological replicate. Samples of 0.5 g were taken and the K, Mg, Na, Ca, Mn, Fe and Zn concentrations were determined by flame atomic absorption spectrometry (SpectrAA-200, Varian, Australia) following digestion with a mixture of HNO₃/HClO₄. Nitrogen was measured using dry combustion in an elemental analyser (TruSpec CN, Leco, St. Joseph, Michigan) from a 0.1 g sample.

All of the plants were harvested individually at maturity, that is, when the berries reached 21-23 Brix. The leaves were counted, and the total (leaves, shoots and roots) dry weight was calculated after drying in an oven.

To analyse the K concentration of must, 50 berries per plant were randomly collected. Berries from two different plants within the same treatment (8-11 plants) were pooled in order to have 4-6 biological replicates (two plants made one biological replicate). Therefore, we had samples of 100 berries. Berries were weighed and ground in a blender (Omni Mixer). Part of the extract (10 ml) was centrifuged at 4.302 g for 10 min and diluted 10 times. Then, it was used to determine the K concentration by flame atomic absorption spectrometry (AAS, Varian) following a similar digestion procedure as the leaf samples.

Statistical analysis

Statistical analysis was carried out with R software (R Development Core Team, Vienna, Austria). The data were analysed with a 3-way analysis of variance to investigate the effects of glasshouse condition, soil texture, water availability and their interactions. The results were considered statistically significant at $p < 0.05$. The Tukey HSD test was used as a post hoc technique when the effects of treatments were statistically significant. When there was any interaction between factors, further analysis of variance was required, separating factors into levels. Data are presented as the means \pm standard error (SE).

Results

The plants grown under simulated year 2100 expected CO₂, T and RH conditions (FCC) had a lower nutrient concentration in the leaf blades than those grown under Curr, although significant differences were only observed for N and Ca at veraison (Table 5.2) and N and Zn at full maturity (Table 5.3). The leaf blades from water-stressed plants had a higher concentration of most of the nutrients analysed compared with the well-watered treatments, even though significant differences were only found for Na at veraison (Table 5.2) and Mn at full maturity (Table 5.3). However, the K concentration was higher in leaf blades at full maturity in the well-watered treatment (Tables 5.3). Soil texture did not affect plant nutrition at veraison (Table 5.2). Nevertheless, at full maturity, plants grown under more clayey soils had a higher Ca and Mn concentration in their blades than those grown under the other two soil textures (Table 5.3). There was no significant interaction among factors, with the exception of Mn and Fe blade concentration at veraison (Table 5.2), where glasshouse conditions (GC) and water availability interacted. FCC significantly reduced the concentration of Mn and Fe only in plants grown under well-watered conditions, but not in those subjected to future expected water deficit (WD) (Figure 5.1).

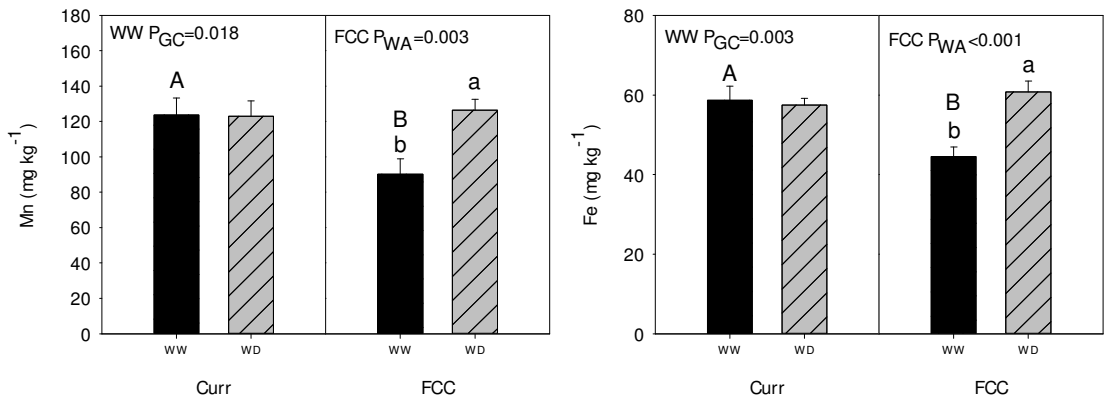


Figure 5.1. Glasshouse conditions (GC) and water availability (WA) factor interactions for leaf Mn and Fe concentration at veraison in grapevine cv. Tempranillo. Different capital letters indicate significant differences ($p < 0.05$) between the FCC and Curr treatments within each water availability treatment ($WW p_{GC}$). Different small letters indicate significant differences ($p < 0.05$) between the WW and WD within each glasshouse condition ($FCC p_{WA}$).

Table 5.2. Average concentration of macronutrients and micronutrients in grapevine cv. Tempranillo leaf blades and standard errors at veraison, grown under two glasshouse conditions (GC): current conditions (Curr) and future expected conditions (FCC); two water availabilities (WA): well-watered (WW) and future expected water deficit (WD); and three soil textures (ST): 41, 19 and 8% clay. Significance codes: ns = no significance differences, *** $p < 0.001$, ** $0.001 \leq p < 0.01$, * $0.01 \leq p < 0.05$. Different capital letters indicate significant differences ($p < 0.05$) between FCC and Curr. Different small letters indicate significant differences ($p < 0.05$) between WW and WD. INT = interaction between GC and WA.

Veraison	N %	K %	Ca %	Mg %	Na mg kg ⁻¹	Fe mg kg ⁻¹	Mn mg kg ⁻¹	Zn mg kg ⁻¹
Glasshouse conditions (GC)								
Curr	2.77A ± 0.06	0.71 ± 0.04	2.41A ± 0.09	0.42 ± 0.02	107.8 ± 6.6	58.1 ± 2.1	123.4 ± 6.4	33.8 ± 2.6
FCC	2.47B ± 0.07	0.70 ± 0.03	2.13B ± 0.09	0.39 ± 0.02	101.8 ± 6.5	52.1 ± 2.4	107.0 ± 6.4	27.6 ± 2.5
	**	ns	*	ns	ns	INT	INT	ns
Water availability (WA)								
WW	2.57 ± 0.06	0.72 ± 0.03	2.17 ± 0.10	0.39 ± 0.01	86.6b ± 4.9	51.6 ± 2.5	107.0 ± 7.1	28.8 ± 2.8
WD	2.70 ± 0.08	0.69 ± 0.03	2.38 ± 0.08	0.42 ± 0.03	126.6a ± 5.8	59.2 ± 1.7	124.8 ± 5.1	32.8 ± 2.1
	ns	ns	ns	ns	***	INT	INT	ns
Soil texture (ST)								
41% clay	2.62 ± 0.11	0.71 ± 0.03	2.27 ± 0.14	0.41 ± 0.03	109.2 ± 9.1	56.1 ± 3.8	112.9 ± 8.8	34.0 ± 4.1
19% clay	2.66 ± 0.06	0.68 ± 0.04	2.30 ± 0.09	0.39 ± 0.02	103.4 ± 7.5	52.8 ± 2.0	117.7 ± 8.1	28.1 ± 2.5
8% clay	2.59 ± 0.07	0.72 ± 0.04	2.23 ± 0.11	0.41 ± 0.01	101.7 ± 7.6	56.3 ± 2.5	114.5 ± 7.5	30.0 ± 2.7
	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
GC x WA	ns	ns	ns	ns	ns	**	*	ns
GC x ST	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
WA x ST	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
GC x WA x ST	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

Table 5.3. Average concentration of macronutrients and micronutrients in grapevine cv. Tempranillo leaf blades and standard errors at full maturity, grown under two glasshouse conditions (GC): current conditions (Curr) and future expected conditions (FCC); two water availabilities (WA): well-watered (WW) and future expected water deficit (WD); and three soil textures (ST): 41, 19 and 8% clay. Significance codes: ns = no significance differences, *** $p < 0.001$, ** $0.001 \leq p < 0.01$, * $0.01 \leq p < 0.05$. Different capital letters indicate significant differences ($p < 0.05$) between FCC and Curr. Different small letters indicate significant differences ($p < 0.05$) between WW and WD. *o symbols within the same parameter indicate significant differences ($p < 0.05$) among different soil textures.

Full maturity	N %	K %	Ca %	Mg %	Na mg kg ⁻¹	Fe mg kg ⁻¹	Mn mg kg ⁻¹	Zn mg kg ⁻¹
Glasshouse conditions (GC)								
Curr	2.60A ± 0.07	0.73 ± 0.04	2.44 ± 0.09	0.38 ± 0.03	83.4 ± 4.2	62.6 ± 3.0	110.3 ± 6.2	47.3A ± 3.6
FCC	2.25B ± 0.05	0.65 ± 0.03	2.55 ± 0.10	0.43 ± 0.03	83.5 ± 5.4	55.51 ± 2.2	103.7 ± 5.7	28.6B ± 1.7
	***	ns	ns	ns	ns	ns	ns	***
Water availability (WA)								
WW	2.40 ± 0.07	0.74a ± 0.03	2.42 ± 0.10	0.41 ± 0.03	77.2 ± 4.3	57.3 ± 2.7	93.2b ± 5.9	37.3 ± 3.3
WD	2.44 ± 0.07	0.63b ± 0.04	2.58 ± 0.09	0.41 ± 0.03	90.3 ± 5.2	60.6 ± 2.6	121.5a ± 4.8	37.9 ± 3.1
	ns	*	ns	ns	ns	ns	***	ns
Soil texture (ST)								
41% clay	2.44 ± 0.11	0.69 ± 0.03	2.69* ± 0.14	0.43 ± 0.05	83.9 ± 4.6	64.1 ± 3.2	117.0* ± 7.7	40.1 ± 3.5
19% clay	2.52 ± 0.08	0.71 ± 0.04	2.45* ^o ± 0.10	0.41 ± 0.03	89.0 ± 5.2	56.8 ± 2.1	111.4* ^o ± 7.5	40.5 ± 4.3
8% clay	2.30 ± 0.07	0.68 ± 0.05	2.35 ^o ± 0.09	0.38 ± 0.03	77.5 ± 7.3	56.1 ± 3.9	92.7 ^o ± 5.8	32.4 ± 3.9
	ns	ns	*	ns	ns	ns	*	ns
GC x WA	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
GC x ST	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
WA x ST	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
GC x WA x ST	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

Regarding the K concentration of must, there was no significant difference between FCC and Curr (Table 5.4). The potassium concentration was higher in must in the well-watered treatment (Table 5.4). Berries from plants grown under the more clayey soils had a higher K concentration in the must than berries from plants grown under the other soil textures (Table 5.4).

Table 5.4. Mean and standard error values of the K concentration in the must of cv. Tempranillo grapevines grown under two glasshouse conditions (GC): current conditions (Curr) and future expected conditions (FCC); two water availabilities (WA): well-watered (WW) and future expected water deficit (WD); and three soil textures (ST): 41, 19 and 8% clay. ns = no significant differences, *** $p < 0.001$, ** $0.001 \leq p < 0.01$, * $0.01 \leq p < 0.05$. Different letters indicate significant differences ($p < 0.05$) among levels of the applied factor.

	K (g kg ⁻¹)
GC	
Curr	2.37 ± 0.04
FCC	2.29 ± 0.03
	ns
WA	
WW	2.40 ± 0.04 a
WD	2.26 ± 0.03 b
	**
ST	
41% clay	2.42 ± 0.05 a
19% clay	2.33 ± 0.05 ab
8% clay	2.25 ± 0.03 b
	*
GC x WA	ns
GC x ST	ns
WA x ST	ns
GC x WA x ST	ns

Furthermore, no significant differences in the leaf dry weight or in the dry weight of other organs (shoots and roots) were observed in plants grown under different GC and different soil textures (Table 5.5). However, well-watered plants

had higher leaf dry weights and higher total dry weights than plants subjected to water stress (Table 5.5).

Table 5.5. Average total leaf dry weight and total weight in cv. Tempranillo grapevines and standard error at full maturity, grown under two glasshouse conditions (GC): current conditions (Curr) and future expected conditions (FCC); two water availabilities (WA): well-watered (WW) and future expected water deficit (WD); and three soil textures (ST): 41, 19 and 8% clay. Significance codes: ns = no significance differences, *** $p < 0.001$, ** $0.001 \leq p < 0.01$, * $0.01 \leq p < 0.05$. Different small letters indicate significant differences ($p < 0.05$) between WW and WD.

	Total leaf dry weight (g)	Total weight (g)
GC		
Curr	17.70 ± 1.01	116.02 ± 3.10
FCC	16.13 ± 0.87	113.20 ± 3.22
	ns	ns
WA		
WW	21.16a ± 0.93	124.99a ± 3.27
WD	12.48b ± 0.49	103.59b ± 2.23
	***	***
ST		
41% clay	16.66 ± 1.35	114.62 ± 3.91
19% clay	16.92 ± 1.11	114.50 ± 3.51
8% clay	17.20 ± 1.06	114.60 ± 4.22
	ns	ns
GC x WA	ns	ns
GC x ST	ns	ns
WA x ST	ns	ns
GC x WA x ST	ns	ns

Discussion

Potassium, Mg and Mn concentrations at veraison were within the normal range for cv. Tempranillo for DOCa Rioja (K 0.65-0.97%, Mg 0.36-0.51% and Mn 69-119 mg kg⁻¹) (García-Escudero et al., 2013), whereas lower values were observed for Ca and Fe (Ca < 2.6% and Fe < 112 mg kg⁻¹) and higher values were found for

Zn and N ($\text{Zn} > 24 \text{ mg kg}^{-1}$ and $\text{N} > 2.5\%$). Nutrient values at maturity were also very similar to those found by *García-Escudero et al.* (2013).

The lower nutrient concentration in leaf blades under FCC plants (in particular, N and Ca at veraison and N and Zn at full maturity) was associated with a greater number of leaves on these plants (29.53 ± 1.62) in comparison to those plants grown under Curr (22.49 ± 1.30) (*Leibar et al.*, 2015). Greater leaf biomasses usually resulted in a dilution of nutrients and, therefore, lower nutrient concentrations (*Ata-Ul-Karim et al.*, 2014). In our case, this effect could be discarded since there were no differences in biomass in the FCC plants. *Martins et al.* (2014) found that leaf mineral nutrient concentrations are frequently observed to decline in the biomass in response to exposure to enhanced atmospheric CO_2 concentrations. This has been largely attributed to higher growth rates but also to increased amounts of non-structural carbohydrates (mainly starch) or to lower leaf transpiration rates (*Thiec et al.*, 1995). As reported by *Leibar et al.* (2015), at veraison there were no differences in stomatal conductance, but at maturity, water-stressed plants grown under FCC ($0.63 \pm 0.10 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) had lower leaf transpiration compared to plants grown under Curr ($1.22 \pm 0.17 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). Among well-watered plants, there were no differences between FCC and Curr in leaf transpiration (*Leibar et al.*, 2015). Therefore, the lower Ca and Zn concentrations under the FCC treatment might be explained by a higher transpiration rate only when plants were grown under a water deficit. The reduced leaf N concentration of FCC plants, at veraison and full maturity, is in line with *Salazar-Parra et al.* (2015) and *Leibar et al.* (2015), who reported lower N concentrations in plants grown under elevated CO_2 as evidence of photosynthetic acclimation (down-regulation of assimilation) to elevated CO_2 .

The higher nutrient concentrations of leaf blades in the water-stressed plants (significant differences only for Na at veraison and Mn at full maturity) could be

because the well-watered plants had higher leaf dry weight and higher total dry weight than the plants subjected to water stress, causing a dilution effect and, consequently, nutrients that were more concentrated in plants grown under WD (*Ata-Ul-Karim et al.*, 2014). On the other hand, *Wang et al.* (2008) suggested that the capacity to maintain Na in plant tissues under drought is part of the water stress avoidance mechanism. In contrast, the K concentration was higher in leaf blades and must at full maturity in the well-watered treatment. Similarly, *Dundon and Smart* (1984) stated that K availability and uptake is reduced under conditions of limited soil water. In this regard, *Esteban et al.* (1999) reported that the absorption of K may be limited in dry soils. *Klein et al.* (2000) reported an increase of K in leaf blades under irrigation, which indicates a general increase in grapevine K status. Therefore, an increase in the K root uptake under irrigated conditions may account for elevated grapevine and berry K accumulation (*Mpelasoka et al.*, 2003), which was observed in this experiment. Irrigation enhances the dissolution of K from clay particles and its movement in the soil solution, which facilitates its supply to roots and a higher plant uptake (*Klein et al.*, 2000). In addition, *Rühl et al.* (1992) stated that a water deficit might reduce mineral absorption because of lower root activity and root growth, as *Leibar et al.* (2016) observed for root growth in this experiment.

The finding of an absence of a soil texture effect at veraison is in agreement with *Shange and Conradie* (2012), who did not observe a consistent pattern of soil parent materials influence on leaf blade nutritional status. The higher leaf Ca and Mn concentrations at full maturity in grapevines grown in more clayey soil may be related to the higher initial nutrient content and the higher cation exchange capacity (CEC) of these soils, as clay particles can hold nutrients due to their high CEC (*Pal and Marschner*, 2016). In our study, sandy soils had higher pH (9.39) than clayey soils (8.84); similarly, *Pearson and Goheen* (1988) stated that Mn deficiency symptoms were more likely to occur in alkaline sandy soils, as Mn

availability decreases in high pH soils. However, in our case, Mn values were within normal ranges, even high in all treatments, and no visual symptoms of Mn deficiency were observed. Although the K concentration in leaf blades did not exhibit significant differences among different soil textures, berries from plants grown under more clayey soils had higher K concentration in the must than berries from plants grown under other soil textures, which indicates that grape berries are a strong sink for K, particularly during ripening, as observed by *Mpelasoka et al. (2003)*. Even if the three soils received the same high K input (206.94 g), and this amount was much higher than total K leaf biomass + must extraction (0.12+0.56 g), the higher exchangeable K content, higher cation exchange capacity and the predominance of 2:1 clay minerals as illites may explain the higher K concentration in the must. The ability to fix or release K from 2:1 clay minerals led to authors such as *Barré et al. (2008)* to postulate that they behave as a K reservoir in soils. *Esteban et al. (1999)* asserted that the K concentration in must mainly comes from root absorption, which is determined by the level of assimilable K in the soil. The capability of our soil to provide K was so high that the K concentration of the must was higher in plants grown in the clayey soil, even when the root system was less developed (*Leibar et al., 2016*). A positive correlation has been found between the K concentration and pH of grape berry juice (*Mpelasoka et al., 2003*), adversely affecting the stability of the wine. It is well known how climate change (higher T and higher CO₂ concentration) will influence must and wine acidity (*Jones et al., 2005; Leibar et al., 2016*); therefore, soils with medium-high K content could enhance that acidity decrease.

Conclusions

The elevated CO₂ and temperature and reduced RH expected in climate change predictions resulted in N concentration reductions in leaf blades regardless of their phenological stage. Future expected water deficits significantly altered grapevine nutritional status, thereby leading to higher concentrations of Na at veraison and

Mn at maturity compared to well-watered plants. The higher aerial biomass produced was probably the cause of this dilution effect in the treatment with no water deficit. The exception was K, which showed lower concentrations in the leaves and in the must under the water deficit treatment. Soil texture influenced the leaf Ca and Mn concentrations and the K concentration of the must, where higher concentrations were observed in more clayey soils. Even when K input from fertilization was much higher than plant K extraction, a greater availability of soil K could increase the K concentration in plant tissues and must. Thus, we must take special care with soils that have a great ability to supply K because this property is hard to change. This increased K concentration of must could be a problem in terms of wine acidity loss, especially since one of the adverse effects of climate change (elevated CO₂ and T) will also be lower must acidity. However, it is worth mentioning that future expected water reduced availability would cause a decrease in the K concentration of must.

Acknowledgements

We thank the Department of Economic Development and Competitiveness of the Basque Government and Aragón Government (A03 research group) for financial support. Urtzi Leibar was the recipient of a grant from “Fundación Cándido Iturriaga y María Doñabeitia”. The authors would like to thank A. Urdiain and M. Oyarzun (Universidad de Navarra) for their excellent technical assistance and the Institute of Vine and Wine Sciences (Logroño, La Rioja, Spain) for the dormant cuttings supply.

References

- Ata-Ul-Karim, S. T., Zhu, Y., Yao, X., Cao, W. 2014.** Determination of critical nitrogen dilution curve based on leaf area index in rice. *Field Crop Res.* 167, 76–85.
- Barré, P., Velde, B., Fontaine, C., Catel, N., Abbadie, L. 2008.** Which 2:1 clay minerals are involved in the soil potassium reservoir? Insights from potassium addition or removal experiments on three temperate grassland soil clay assemblages. *Geoderma* 146, 216–223.
- Barrios, A. 1994.** Mapa de Suelos de La Rioja Alavesa E: 1/50000. Departamento de Agricultura de la Diputación Foral de Álava. Servicio de Estudios y Relaciones Comunitarias. Vitoria-Gasteiz. España.
- Benito, A., Romero, I., Domínguez, N., García-Escudero, E., Martín, I. 2013.** Leaf blade and petiole analysis for nutrient diagnosis in *Vitis vinifera* L. cv. Garnacha tinta. *Aust. J. Grape Wine Res.* 19, 285–298.
- Brataševc, K., Sivilotti, P., Vodopivec, B. M. 2013.** Soil and foliar fertilization affects mineral contents in *Vitis vinifera* L. cv. ‘rebula’ leaves. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 13(3), 650–663.
- Dundon, C. G., Smart, R. E. 1984.** Effects of water relations on the potassium status of Shiraz vines. *Am. J. Enol. Viticult.* 35, 40–45.
- Esteban, M. A., Villanueva, M. J., Lissarrague, J. R. 1999.** Effect of irrigation on changes in berry composition of Tempranillo during maturation. Sugars, organic acids, and mineral elements. *Am. J. Enol. Viticult.* 50, 418–434.
- García-Escudero, E., Romero, I., Benito, A., Domínguez, N., Martín, I. 2013.** Reference levels for leaf nutrient diagnosis of cv Tempranillo Grapevine in the Rioja appellation. *Commun. Soil Sci. Plan.* 44, 645–654.
- Ghaffari, S., Ferchichi, A. 2011.** Characterization of Tunisian grapevine (*Vitis vinifera* L.) cultivars using leaves morphological traits and mineral composition. *Rom. Biotechnol. Lett.* 5(16), 6556–6563.
- Gonzalez-Dugo, V., Durand, J. L., Gastal, F. 2010.** Water deficit and nitrogen nutrition of crops. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 30, 529–544.
- IPCC. 2007.** Climate change and its impacts in the near and long term under different scenarios. In: Pachauri RK, Reisinger A (eds) *Climate change 2007: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Core Writing Team.* IPCC, Geneva.

- IPCC. 2013.** Climate Change 2013: The Physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Jones, G.V., White, M.A., Cooper, O.R., Storchmann, K. 2005.** Climate change and global wine quality. *Climatic Change* 73, 319–343.
- Klein, I., Strime, M., Fanberstein, L., Mani, Y. 2000.** Irrigation and fertigation effects on phosphorus and potassium nutrition of wine grapes. *Vitis* 39, 55–62.
- Leibar, U., Aizpurua, A., Unamunzaga, O., Pascual, I., Morales, F. 2015.** How will climate change influence grapevine cv. Tempranillo photosynthesis under different soil textures? *Photosyn. Res.* 124, 199–215.
- Leibar, U., Pascual, I., Morales, F., Aizpurua, A., Unamunzaga, O. 2016.** Grape yield and quality responses to simulated year 2100 expected climatic conditions under different soil textures. *J. Sci. Food Agr.* Accepted. DOI: 10.1002/jsfa.8086.
- MAPA. 1994.** Métodos de Análisis para Suelos. En: Métodos Oficiales de Análisis. Tomo III. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA), Madrid.
- Martins, L. D., Tomaz, M. A., Lidon, F. C., DaMatta, F. M., Ramalho, J. C. 2014.** Combined effects of elevated [CO₂] and high temperature on leaf mineral balance in *Coffea* spp. *Plants. Climatic Change* 126, 365–379.
- Mira de Orduña, R. 2010.** Climate change associated effects on grape and wine quality and production. *Food Res. Int.* 43, 1844–1855.
- Mosse, K. P. M., Lee, J., Leachman, B. T., Parikh, S. J., Cavagnaro, T. R., Patti, A. F., Steenwerth, K. L. 2013.** Irrigation of an established vineyard with winery cleaning agent solution (simulated winery wastewater): Vine growth, berry quality, and soil chemistry. *Agric. Water Manage.* 123, 93–102.
- Mpelasoka, B. S., Schachtman, D. P., Treeby, M. T., Thomas, M. R. 2003.** A review of potassium nutrition in grapevine with special emphasis on berry accumulation. *Aust. J. Grape Wine Res.* 9, 154–168.
- Ollat, N., Geny, L., Soyer, J. 1998.** Les boutures fructifères de vigne: validation d'un modèle d'étude du développement de la physiologie de la vigne, I Caractéristiques de l'appareil végétative. *J. Int. Sci. Vigne Vin* 32, 1–9.
- Pearson, R. C., Goheen, A. C. 1988.** Compendium of Grape Diseases 4th Edition. The American Phytopathological Society, USA.

- Proffitt, T., Campbell-Clause, J. 2012.** Managing grapevine nutrition and vineyard soil health. http://www.perthregionnrm.com/media/57989/grapevine_nutrition_amended.pdf (accessed 2016/09/25).
- Roeckner, E., Bäuml, G., Bonaventura, L., Brokopf, R., Esch, M., Giorgetta, M., Hagemann, S., Kirchner, I., Kornblueh, L., Manzini, E., Rhodin, A., Schlese, U., Schulzweida, U., Tompkins, A. 2003.** The atmosphere general circulation model ECHAM5, part 1: model description. Technical report no. 349: 127 pp, Max-Planck-Institut für Meteorologie.
- Romero, I., García-Escudero, E., Martín, I. 2010.** Effects of leaf position on blade and petiole mineral nutrient concentration of Tempranillo grapevine (*Vitis vinifera* L.). *Am. J. Enol. Viticult.* 61: 544-550.
- Rühl, E. H., Fuda, A. P., Treeby, M. T. 1992.** Effect of potassium, magnesium and nitrogen supply on grape berry composition of Riesling, Chardonnay and Cabernet Sauvignon vines. *Aust. J. Exp. Agr.* 32, 645–649.
- Pal, S., Marschner, P. 2016.** Influence of clay concentration, residue C/N and particle size on microbial activity and nutrient availability in clay amended sandy soil. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 16(2): 350–361.
- Salazar-Parra, C., Aranjuelo, I., Pascual, I., Erice, G., Sanz-Sáez, A., Aguirreolea, J., Sánchez-Díaz, M., Irigoyen, J. J., Araus, J. L., Morales, F. 2015.** Carbon balance, partitioning and photosynthetic acclimation in fruit-bearing grapevine (*Vitis vinifera* L. cv. Tempranillo) grown under simulated climate change (elevated CO₂, elevated temperature and moderate drought) scenarios in temperature gradient greenhouses. *J. Plant Physiol.* 174, 97–109.
- Salisbury, F. B., Ross, C. W. 1992.** *Plant Physiol.* 4th Edition. Wadsworth Publishing Company, USA.
- Shange, L. P., Conradie, W. J. 2012.** Effects of soil parent material and climate on the performance of *Vitis vinifera* L. cvs. Sauvignon blanc and Cabernet Sauvignon - Part II. Climate, Leaf Analysis, Juice Analysis and Wine Quality. *S. Afr. J. Enol. Vitic.* 33(2), 174–183.
- Thiec, D. L., Dixon, M., Loosveldt, P., Garrec, J. P. 1995.** Seasonal and annual variations of phosphorus, calcium, potassium and manganese contents in different cross-sections of *Picea abies* (L.) Karst. needles and *Quercus rubra* L. leaves exposed to elevated CO₂. *Trees* 10, 55–62.
- van Leeuwen, C., Friant, Ph., Choné, X., Trégoat, O., Koundouras, S., Dubourdieu, D. 2004.** Influence of climate, soil and cultivar on terroir. *Am. J. Enol. Vitic.* 55, 207–217.

- Wang, R.Z., Cheng, L., Bai, Y.G., Xiao, C.W., 2008.** Seasonal dynamics in resource partitioning to growth and storage in response to drought in a perennial rhizomatous grass, *Leymus chinensis*. *J. Plant Growth Regul.* 27, 39–48.
- Zhu, C., Ziska, L., Zhu, J., Zeng, Q., Xie, Z., Tang, H., Jia, X., Hasegawa, T. 2012.** The temporal and species dynamics of photosynthetic acclimation in flag leaves of rice (*Oryza sativa*) and wheat (*Triticum aestivum*) under elevated carbon dioxide. *Physiol. Plant.* 145, 395–405.



CAPÍTULO 6: *Discusión general*





El Capítulo 2 de la Tesis ha permitido conocer el efecto del suelo sobre la calidad de la uva en dos zonas climáticas y tomando como base los suelos diferenciados por una bodega cooperativa de Rioja Alavesa a partir del mapa de suelos de la zona (Barrios, 1994) a escala 1:50.000. La zonificación climática se hizo en función de los datos climáticos comprendidos entre los años 1971-2007 a una escala de 1km x 1km. Los datos de calidad de uva utilizados provienen de los obtenidos por la bodega de manera rutinaria en las añadas 2009, 2010 y 2011, durante el seguimiento de maduración. Como resultado de este estudio se ha observado que las diferencias entre las dos zonas climáticas dentro del parcelario de la bodega (que abarca 50 km² de territorio) no han sido determinantes a la hora de diferenciar con claridad la calidad de la uva. No obstante, el tipo de suelo clasificado según la capacidad de retención hídrica, ha permitido diferenciar ciertos patrones de calidad de uva. Los suelos con una alta capacidad de retención hídrica han producido mostos con una mayor acidez total debido a una mayor concentración de ácido málico. Por el contrario, los mostos con mayor color provienen mayoritariamente de viñedos situados en suelos con menor capacidad de retención de agua, siendo el color una propiedad muy bien valorada en Rioja.

Conocer la influencia del clima y el suelo en las condiciones actuales ayuda a comprender mejor lo que va a ocurrir en el futuro, en un escenario de cambio climático (CC); pero para poder estudiar las interacciones entre los distintos factores de cambio y estudiar tratamientos más extremos, los estudios bajo condiciones controladas resultan de gran interés. En este sentido, en los Capítulos 3, 4 y 5 se han estudiado bajo condiciones de invernadero la influencia que tendrá el CC estimado para el final de siglo en la variedad Tempranillo tanto a nivel fisiológico, como a nivel nutricional y en cuanto a la calidad de la uva en diferentes tipos de suelo diferenciados por su contenido de arcilla. Un aumento de 4 grados de la temperatura, un aumento del CO₂ hasta una concentración de 700ppm ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ aire) y un descenso de la humedad relativa del 12%,

respecto al periodo de referencia 1971-2007, han influido de forma notoria en la fenología de la planta adelantando su ciclo reproductivo, mientras que un empeoramiento significativo del estado hídrico de la planta lo ha retrasado. Además, la actividad fotosintética (Capítulo 3) también se ha visto afectada, así como la calidad de la uva (Capítulo 4) y el estado nutricional de la planta (Capítulo 5). Aunque en menor medida que el factor clima, la textura del suelo también ha sido un factor determinante.

Cabe destacar que, a pesar de las diferencias existentes, los estudios de campo y de invernadero pueden ser complementarios si están coordinados. El estudio de invernadero trabaja en unas condiciones muy controladas que nos permite estudiar las tendencias futuras y permite profundizar más en las causas últimas pudiéndose aportar así mejores soluciones a distintos problemas (Morales *et al.*, 2016).

Las plantas en condiciones de campo se enfrentan a múltiples factores de estrés (abiótico y biótico) muy difíciles de controlar y medir. Estudiar el efecto combinado del aumento de CO₂, temperatura y estrés hídrico en condiciones de campo resulta hoy en día muy complicado. Por ello, los invernaderos-cámaras de crecimiento (GCG) nos ayudan a tener bajo control muchos de los factores que afectan a la vid (CO₂, temperatura, HR, riego, suelo) permitiendo así comparar las condiciones climáticas actuales con las del futuro (aproximadamente el periodo 2070-2100), lo que permite investigaciones más mecanicistas sobre las causas de las respuestas fisiológicas a condiciones climáticas futuras (Morales *et al.*, 2014). Otra ventaja en nuestro caso ha sido que el ensayo en GCG ha facilitado el estudio de las interacciones entre los tres factores estudiados en el experimento, lo cual hubiera resultado muy difícil llevar a cabo en condiciones reales. Sin embargo, un mejor control de los parámetros ambientales no necesariamente significa una respuesta más realista de los parámetros fisiológicos de la planta a una situación de CC. Es evidente también que los invernaderos utilizados en esta Tesis alejan a

las plantas de sus condiciones naturales de crecimiento y que no se pueden extrapolar estos resultados directamente a condiciones de campo, ya que, por ejemplo en el caso de los suelos, éstos tienen diferentes profundidades, contenido de elementos gruesos, diferentes posiciones en el paisaje, etc., es decir, una gran variabilidad espacial. A pesar de ello, los GCG son una buena aproximación, puesto que cuantificar estas respuestas ante el escenario del CC en el campo es difícil y costoso. No obstante, existe algún trabajo que pretende simular un aumento de CO₂ y temperatura en campo, pero se tratan de estudios que encierran las plantas individualmente (Edwards *et al.*, 2016) y el número de repeticiones posibles es limitado. La ventaja principal que tienen es que trabajan con suelo real y son plantas perennes ya establecidas que tienen el sistema radicular desarrollado.

Controlar factores como el CO₂, la T, la HR y la disponibilidad hídrica ha permitido entender la fisiología de la vid en un escenario de CC. El efecto combinado de una mayor concentración de CO₂, una elevada temperatura y una reducida humedad relativa desde cuajado hasta madurez ha hecho que la tasa fotosintética sea mayor en aquellas plantas con una buena condición hídrica, aunque esto no haya inducido una mayor superficie foliar ni mayor producción (peso baya o peso racimo). No obstante, este efecto se ha visto anulado cuando las plantas fueron sometidas a déficit hídrico. Por lo tanto, habrá que prestar especial atención al estado hídrico de las plantas puesto que podrá limitar la capacidad fotosintética y por consiguiente disminuir el vigor general de las plantas de vid así como ralentizar o dificultar la acumulación de azúcares y ácidos (Santos *et al.*, 2007). Además, se observó una aclimatación fotosintética tras un periodo largo de exposición a una mayor concentración de CO₂ y temperatura y menor HR.

En la mayoría de cultivos el previsible aumento del rendimiento debido a un aumento de CO₂ sería positivo en un contexto de aumento de la población

mundial. Sin embargo, de nuevo habrá regiones donde el estrés hídrico provocado por una menor disponibilidad hídrica hará que el posible aumento de la producción sea menor. En el cultivo de la vid este aumento de producción suscita un debate ampliamente discutido, pues aumentar el rendimiento es algo positivo siempre y cuando se obtenga una buena calidad del vino. Por otro lado, el stock y la comercialización juegan un papel relevante cuando se habla de limitaciones al rendimiento en viñedo.

Los resultados de esta Tesis muestran que a escala de una bodega cooperativa con viñedos repartidos en aproximadamente unos 50 km² y 200 m de altitud de variación entre las zonas climáticas, en el que las diferencias climáticas de temperatura media y precipitación anual pueden oscilar aproximadamente en 0,15 °C y 100 mm respectivamente de una zona a otra, el clima no ha sido un factor tan determinante de variación en la calidad de la uva como lo ha sido el suelo. Mientras que un cambio de clima significativo, donde las diferencias climáticas son mucho mayores (+4 °C y 40% de diferencia de disponibilidad hídrica), como pueda ser el generado por el CC a final de siglo, influirá de forma trascendental sobre la vid (Jones, 2003) modificando parámetros de calidad que actualmente son muy valorados en el mercado como por ejemplo el grado alcohólico, la acidez o los polifenoles, entre otros.

Tradicionalmente, un objetivo deseable por los vitivinicultores a nivel mundial ha sido el conseguir vinos con un alto contenido de sólidos solubles totales (Kliewer y Weaver, 1971; Jackson y Lombard, 1993), ya que este parámetro es el que ha determinado en muchos casos el precio de referencia de los vinos en varios países (Koblet, 1985). Hoy en día, sin embargo, este objetivo está perdiendo atractivo, puesto que por lo general los consumidores tanto a nivel nacional como internacional prefieren vinos con menos alcohol (Salamon, 2006; Seccia y Maggi, 2011), que es posible obtener reduciendo los sólidos solubles totales acumulados

en las bayas (Palliotti *et al.*, 2014). En cuanto a características organolépticas de los vinos tintos, en España de forma general, se solían buscar vinos color teja, con un aroma muy marcado por la oxidación y por la madera y suave al paladar. En los últimos años, se buscan vinos color rojo intenso que mantienen notas violáceas a largo tiempo, con aromas complejos y equilibrados entre la fruta y los aromas de la madera, además de con taninos suaves y maduros (Canals *et al.*, 2005; Kontoudakis *et al.*, 2011). En cualquier caso, no hay que olvidar que la percepción depende en gran medida de la sensibilidad y preferencias de las personas que degustan el vino y la evolución de estas preferencias está condicionada, en gran parte, por las guías y las revistas especializadas (The Wine Advocate, Wine Spectator, Decanter,...) detrás de las cuales están los grandes gurús del vino (Robert Parker, Jancis Robinson, José Peñín, etc.). Concretamente en Rioja, hasta el año 2000 aproximadamente, se hacían vinos tradicionalmente de poco color, finos en boca y de acidez más o menos alta, mientras que hoy en día se buscan vinos que alcanzan una intensidad de color elevada (Sáenz-Navajas *et al.*, 2016), menos ácidos, con una mayor untuosidad en boca y con una presencia muy marcada de tostado de la madera nueva, por lo que la uva se expresa mucho menos a favor de la madera. Ello conlleva la estandarización de los vinos de todas las regiones del mundo disminuyendo el componente *terroir* y el varietal a favor del componente tonelería.

En relación a lo comentado anteriormente, en los últimos años a la hora de determinar la fecha idónea para la vendimia, ha habido una clara tendencia hacia una mayor consideración del aroma o madurez polifenólica, además de la medición tradicional de variables tecnológicas, es decir, el azúcar y los niveles de ácido. Esto ha dado lugar a un retraso de la vendimia con el objetivo de alcanzar la madurez fenólica deseada y obtener un mayor color, que es uno de los parámetros que más valora el mercado como se ha comentado anteriormente (Mira de Orduña, 2010). Teniendo en consideración además los resultados de esta

Tesis, en los que se observa que el CC acelera la acumulación de azúcar y los mostos tienen una menor concentración de antocianos, el desfase entre el azúcar y los polifenoles (desacoplamiento) supondrá un reto aún mayor para los elaboradores.

El aumento de temperatura asociado al CC hará que disminuya la acidez de los vinos, como se ha observado en esta Tesis, y además, la variedad predominante Tempranillo produce uvas con baja acidez. Todo ello podría dificultar la conservación del vino y el mantenimiento del color en botella en los vinos de guarda. A su vez, los vinos de maceración carbónica que también tienen menor acidez podrían verse igualmente afectados. Este fue el único método utilizado en Rioja hasta la introducción a finales del siglo XVIII del despallado o método de Burdeos (Etaio *et al.*, 2008) aunque muchas pequeñas bodegas de Rioja Alavesa todavía hacen vino tinto joven con este método tradicional (Etaio *et al.*, 2009). Asimismo, parece que dicha práctica tiende a recuperarse levemente hoy en día, por lo que se habrá de considerar esta bajada de acidez.

El CC va a provocar un adelanto de la fenología de forma generalizada y un desacoplamiento entre la síntesis de azúcar y polifenoles. Por ello, el sector vitivinícola debe mostrarse sensible y afrontar el reto de intentar adaptarse a un escenario de CC manteniendo la producción de vinos de alta calidad. En este sentido, Hannah *et al.* (2013) afirman que el área apta para la viticultura descenderá entre un 25 y un 73% en las zonas de mayor producción vitivinícola para el año 2050 en el escenario más negativo (RCP 8.5) y entre un 19 y 62% en el escenario más favorable (RCP 4.5) según diversos modelos climáticos y en función de índices de idoneidad. Sin embargo, otros autores como van Leeuwen *et al.*, (2013), contestan a estas predicciones y consideran que se minusvalora la capacidad de adaptación de la especie *Vitis vinifera*. Además apuntan que la

metodología e índices de idoneidad empleadas por los autores anteriores no son adecuados y por lo tanto las predicciones resultan exageradas.

A pesar de las discordancias anteriores, hay que tener en cuenta que el CC no va a afectar por igual a todas las regiones vitivinícolas ni a todas las variedades, ya que éstas se adaptarán a las condiciones climáticas futuras en función del umbral de temperatura en el que maduran (Jones, 2003). Por ejemplo, dentro del País Vasco, en 100 km de distancia tenemos viticulturas muy distintas a las cuales el CC podrá afectar de manera muy dispar como son las DO Txakoli y la DOCa Rioja. El Txakoli que a menudo es considerado un vino demasiado ácido, probablemente podría verse beneficiado por la previsible bajada de acidez que causará el CC. Sin embargo, en Rioja debido a su distinta situación climática y a que la variedad Tempranillo no se caracteriza por tener una alta acidez, este fenómeno puede representar un problema. En este sentido, tanto los resultados de la Tesis en el estudio de campo como en el de invernadero muestran la importancia que tiene el K del suelo; principalmente cuando nos referimos a la acidez, los resultados llevan a pensar que, en condiciones de CC en Rioja, el problema de la baja acidez, podrá verse agravado en suelos con una mayor disponibilidad de K y que tengan una disponibilidad hídrica elevada. Tanto en los resultados del estudio de campo como en los resultados obtenidos del ensayo de invernadero se ha observado que cuanto mayor es el contenido de K en suelo, mayor es la concentración de K en el mosto. Además, el estudio de invernadero ha mostrado por un lado, que el K que tiene el suelo es más importante que la cantidad de K aportada, y por otro lado, que una mayor disponibilidad hídrica ha hecho aumentar la concentración de K en el mosto. Por todo ello, habrá que considerar el contenido de K en el perfil del suelo a la hora de plantar viñedos en un futuro en un escenario de CC donde la acidez puede ser un problema.

Hay que diferenciar el contenido de K en los horizontes superficiales del suelo del que se encuentra en profundidad. El contenido de K en los primeros cm de suelo suele ser alto en Rioja Alavesa, donde normalmente no hay raíces (aunque sí en el hilo) debido al laboreo. Sin embargo, el K que se aplica en el suelo no llega hasta profundidades superiores a los 48-55 cm (Unamunzaga, 2010), concluyendo que el material parental influye de forma más significativa que lo aportado en forma de fertilizante en las capas más profundas del suelo. Adicionalmente, las arcillas suelen tener un alto contenido de K disponible para las plantas de forma natural, mientras que este contenido en las areniscas suele ser menor (Matthews y Anderson, 1993).

Actualmente, la mayoría de las medidas de adaptación al CC que se plantean en la bibliografía a nivel global (revisión de Palliotti *et al.*, 2014) se centran en retrasar la maduración, buscando así que la vendimia coincida con periodos más frescos y favorables para la obtención de una uva más equilibrada, con una acidez no tan baja, evitando los periodos de temperaturas superiores al umbral metabólico de la maduración fenólica (17-26 °C) y mitigando por tanto su desacople con la madurez tecnológica (Iland y Gago, 2002; Sadras *et al.*, 2007). Brevemente se enumerarán algunas de ellas que según los resultados obtenidos y las condiciones en las que nos encontramos, pueden ser consideradas en un futuro. No obstante, como se ha comentado, no hay recetas únicas para todas las regiones. Estas medidas de adaptación al CC se podrían clasificar en dos grandes grupos: aquellas que se puedan realizar en viñedos actuales ya establecidos y aquellas dirigidas a nuevas plantaciones de viñedo.

Existen diferentes medidas de adaptación al CC para retrasar la vendimia en los **viñedos ya establecidos**. Por un lado, los que modifican el ratio fuente:sumidero (Stoll *et al.*, 2009); es decir, los que limitan la capacidad fotosintética de la planta y, por otro lado, las que afectan al microclima del racimo, mediante el manejo del

cultivo o estrategias de riego, que proporcionan sombra adicional al racimo para reducir el contenido de azúcar y aumentar la acidez de las bayas (Kliewer y Smart, 1989; Keller, 2010; Teixeira *et al.*, 2013; E-VitiClimate, 2012; Mozzel y Thach, 2014; Palliotti *et al.*, 2014).

Entre las medidas que pretenden disminuir el ratio fuente:sumidero, definido como área de hoja/peso de la fruta, tendríamos prácticas vitícolas como la poda tardía (retrasándola a primavera, Buesa *et al.*, 2014a; Filippetti *et al.*, 2011) o mínima (Clingeffer, 1993; Palliotti *et al.*, 2014), el deshojado (Martínez de Toda y Balda, 2013; Buesa *et al.*, 2014b), el despunte (Santesteban *et al.*, 2014) o el recorte de los pámpanos (Martínez de Toda, 1991; Martínez de Toda *et al.*, 2014; Zheng *et al.*, 2014) que tratan de reducir la superficie foliar. Otra posible medida que afecta al ratio de hoja por peso de fruta, podría ser aumentar la carga, es decir, aumentar el número de yemas por cepa para retrasar el inicio de la maduración de la baya (Keller, 2010; Mozzel y Thach, 2014), aunque esto haría aumentar la producción y algunas denominaciones como la DOCa Rioja la limitan.

Los resultados de estas técnicas es obvio que dependen estrechamente del momento en el que se apliquen y de su intensidad o severidad, así como del vigor de la vid, el tipo de conducción, la fertilidad del suelo y de factores ambientales, como las lluvias. Por tanto, la eficacia de la medida está en parte supeditada a las condiciones meteorológicas que podrán acaecer después de ser éstas acometidas (Palliotti *et al.*, 2014). Los resultados de estas técnicas son dispares, porque aunque en general todas retrasan la maduración, pocas son capaces de aumentar la acidez y ninguna logra aumentar ni siquiera ligeramente la concentración de polifenoles (Buesa *et al.*, 2014a). Es importante tener en cuenta, además, que varios estudios han sugerido que las técnicas de cultivo del viñedo como es el manejo de la vegetación, incluyendo la poda y el deshojado, han sido insuficientes en la última década para combatir las altas temperaturas y condiciones más secas

(Lereboullet *et al.*, 2013; Mozzel y Thach, 2014). Si bien, una de las medidas clave para adaptar el viñedo al CC es el retraso de la maduración, es importante considerar que puede acarrear inconvenientes tales como un mayor riesgo de *Botrytis*. Si la vendimia se retrasa mucho, puede coincidir con precipitaciones en las fases finales del ciclo o no alcanzar la madurez óptima si, por ejemplo, una técnica para retrasar el ciclo, como la poda, coincide con un año más frío que la media.

La viticultura depende en gran medida de los recursos hídricos, que podrán estar amenazados por el CC. Así, la capacidad de gestionar los recursos hídricos será un aspecto clave en las capacidades de adaptación de las distintas regiones vitivinícolas. Por tanto, los riegos deberán ser más efectivos y deberán aumentar la eficiencia del uso del agua (Chaves *et al.*, 2007; Medrano *et al.*, 2015), considerando estrategias de déficit de riego, por ejemplo técnicas como “partial root drying”, riego deficitario sostenible y riego deficitario regulado (Fraga *et al.*, 2012). Adicionalmente, el riego podría constituir una de las herramientas más potentes para contrarrestar los efectos de las variaciones climáticas. Así puede ser utilizado para aumentar el volumen de sumidero y retrasar la parada de crecimiento en el envero (García-Escudero, 2013; Buesa *et al.*, 2014 a, b; Santesteban *et al.*, 2014). Se podría plantear una estrategia de riego racional sobre estos criterios: el control de la disponibilidad hídrica en las fases de crecimiento de la vegetación y de la baya, fijando las bases adecuadas para establecer una arquitectura foliar de forma escalonada, suficiente y no excesiva, acorde al rendimiento que se asuma en el envero. Asimismo, se procuraría contener el peso de la baya (fase I), inducir la parada de crecimiento en el envero y mantener una disponibilidad de agua durante la maduración que autorice suficiente actividad fotosintética como para satisfacer los requerimientos de acumulación en la baya y evitar la senescencia prematura de hojas (García-Escudero, 2013). La posible implantación de estas medidas no está exenta de controversia. Además, siendo el

agua un bien escaso afectaría a la sostenibilidad medioambiental de la región y encarecería la producción (Tesci *et al.*, 2007; Celette *et al.*, 2009).

Cabe destacar que la erosión es y seguirá siendo un problema en condiciones futuras si tal y como se prevé, la precipitación estará peor repartida y por tanto ocurrirán episodios de lluvia más intensos (Moutinho-Pereira *et al.*, 2009). Según la FAO, 1 cm de suelo tarda aproximadamente 1000 años en formarse (Jones *et al.*, 2012), mientras que la velocidad de pérdida de suelo debido a la erosión es mucho más rápida en determinadas situaciones. En este sentido y como complementarias a las medidas ya citadas, el uso de cubiertas vegetales se podría utilizar en algunas situaciones para mejorar las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. Las cubiertas vegetales son una herramienta para controlar la erosión del suelo, sobre todo cuando acontecen periodos torrenciales de lluvia más frecuentes en un escenario de CC, además de maximizar el almacenamiento de agua y nutrientes (Schultz, 2000), pudiendo reducir la evapotranspiración mediante un menor laboreo (E-VitiClimate, 2012; Keller, 2010; Lereboullet *et al.*, 2013; Mozzel y Thach, 2014) y añadiendo valor paisajístico. Por añadido, inciden en la mejora del microclima y en el control del rendimiento y vigor de las cepas, habida cuenta de la competencia que se establece entre la cubierta y la cepa por el agua y los nutrientes, competencia que en gran medida dependerá de la intensidad de la cubierta, de la especie implantada o del manejo y temporalidad de la cubierta (García-Escudero, 2013).

Para **nuevas plantaciones** resultará fundamental conocer el suelo y habrá que tener en cuenta propiedades como la capacidad de retención hídrica, el contenido de potasio asimilable en suelo, la textura y la profundidad, entre otros. Para ello, sería muy útil hacer calicatas, describiendo y analizando horizontes y/o utilizar información de base como pueden ser los mapas de suelo por ejemplo de Rioja Alavesa, donde ya se está haciendo en algunas parcelas. Suelos con un alto

contenido de potasio asimilable deberán gestionarse con cuidado atendiendo además a la disponibilidad hídrica, puesto que como se ha comentado anteriormente, podrán producir mostos con mayor contenido de K que podría afectar directamente a la bajada de acidez. Sin embargo, si se incluye el uso del análisis de suelo como herramienta para modular la fertilización potásica, este problema se podría paliar si los niveles de K en suelo no son muy altos. Ante un escenario de CC se plantea la posibilidad de seleccionar suelos con una buena capacidad de retención hídrica, donde los resultados de esta Tesis muestran que las plantas cultivadas en éstos tuvieron mayor vigor y produjeron mostos con una mayor acidez. Así se podría hacer frente a sequías más intensas y a una mayor evapotranspiración provocada por los aumentos de temperatura y baja humedad relativa.

Además del suelo, otro aspecto a considerar es la selección del material vegetal (variedades, clones y portainjertos). Existen dos opciones, por un lado el cambio varietal hacia la elección de variedades de maduración más tardías y resistentes a altas temperaturas y a la sequía y por otro lado, el mantenimiento de la misma variedad pero recurriendo a la heterogeneidad genética intravarietal, es decir, a clones más tardíos o mejor adaptados a estas condiciones (Martínez de Toda *et al.*, 2015). En cuanto a la selección de portainjertos, será necesario elegir aquellos que se adapten mejor a la condiciones de CC, principalmente sequía (Serra *et al.*, 2014; Tsegay *et al.*, 2014), a las nuevas plagas y enfermedades que pudieran surgir (Kirkpatrick, 2011; E-VitiClimate, 2012), y la absorción de diferentes minerales, especialmente el potasio que determina en parte la acidez. Ha de considerarse, a su vez, la influencia que ejercen en la duración del ciclo y en la maduración y reconsiderar la elección de portainjertos que den un vigor medio-alto e induzcan una mayor producción retrasando la maduración de la uva (Palliotti *et al.*, 2014) como podrían ser 779, 1103 Paulsen, 140 Ruggeri o SO4. En el caso de Rioja Alavesa, hoy día predomina el patrón Richter 110 por su

versatilidad y porque proporciona un vigor medio. Entre los patrones más interesantes de cara a adaptarse al CC, podría estar 1103 Paulsen puesto que basa su retraso más en vigor que en aumento de producción como lo pueden hacer SO4 o140 Ruggeri, manteniendo un buen nivel de resistencia a la sequía y aumentando la acidez (Yuste *et al.*, 2016). Sin embargo, en cada caso habrá que estudiar el suelo para ver qué patrón se adapta mejor, dependiendo de si son o no resistentes a la caliza activa, al encharcamiento y a la sequía, entre otros. Asimismo, hay que considerar la interacción variedad/portainjerto. Según Duchêne (2016), encontrar la combinación apropiada desde el punto de vista agronómico y enológico es una meta a medio plazo.

La DOCa Rioja se reconoce en el mercado principalmente debido a su variedad mayoritaria que es Tempranillo. El hecho de que Rioja Alavesa sea una comarca monocultivo y monovarietal (96,44% de la variedades tintas en 2015; DOCa Rioja www.riojawine.com) la convierte en más vulnerable al CC. Es por ello que se podría plantear aumentar la superficie de variedades que podrían estar más adaptadas al escenario de CC y que hoy día ya están autorizadas en la DOCa Rioja. Como ejemplo, i) variedad Garnacha, que aguanta muy bien la sequía, el oídio y aporta aromas interesantes, ii) Graciano, que es una variedad de maduración tardía que ofrece vinos con importante acidez y contenido polifenólico, cuya superficie de cultivo ha aumentado considerablemente en los últimos años, iii) Mazuelo, que necesita mayor integral térmica para madurar y tiene acidez elevada. García-Merino *et al.* (2010) indican que la mezcla Graciano-Tempranillo mejora el contenido de antocianos del vino. Si en una mezcla de Graciano y Tempranillo el Graciano supera el 10% afectará a las características del vino y su adecuación a lo que el consumidor considera que es un vino de Rioja. Por consiguiente, estos cambios podrían conllevar una modificación de la esencia actual de los vinos de Rioja Alavesa. Además, hoy en día la suma de las variedades secundarias para una bodega, difícilmente podría suponer más de un

15-20% del total en la DOCa Rioja, ya que el mercado no asume grandes cantidades de estas variedades. Por ello, estos cambios deberían ser introducidos gradualmente, para que así el consumidor pueda ir aceptando de una manera más “natural”, sin que ello suponga una pérdida de dicha identidad.

Otra alternativa menos drástica sería seleccionar clones que estuvieran mejor adaptados a las condiciones de CC y así se podría mantener la tipicidad de los vinos. Su inconveniente no sólo es que no se dispone, en general, de selecciones de este tipo de clones para la variedad Tempranillo (Martínez de Toda, 2011) sino que los clones se han buscado principalmente para aumentar el grado y la producción que es por lo que se ha pagado y se paga aún en muchas bodegas. Sin embargo, existe algún estudio como el realizado por Revilla *et al.* (2009) donde se analizaron los antocianos en 6 clones de Tempranillo. Aunque estos autores se centraran en los antocianos, se observan diferencias importantes en el azúcar (12.6-15.3 grado de alcohol probable) y la acidez total (4.8-6.6g/L ácido tartárico). Además, existen otros estudios que evidencian diferencias en vendimia de 3,4-3,5 Brix usando clones diferentes con bayas y racimos más grandes que retrasan la acumulación de azúcares (Fidelibus *et al.*, 2006; Palliotti *et al.*, 2014). No obstante, van Leeuwen y Darriet (2016) determinan que únicamente con el cambio de clones se podría retrasar la vendimia en 7-10 días, pero la información es escasa al respecto y requiere de más trabajos de campo de larga duración para extraer conclusiones más concretas. Duchêne (2016) también comenta que la variabilidad clonal existente puede ser útil a corto plazo, posiblemente a medio plazo, pero ciertamente no a largo plazo.

El desplazamiento del cultivo a áreas más al norte o más elevadas puede ser otra solución de adaptación al CC, pero la inversión económica que supone es muy importante. Por ello, antes de desplazar el cultivo, como primera opción podrían ponerse en marcha las medidas de adaptación anteriormente comentadas.

Se pueden paliar los efectos de la subida de temperaturas desplazando el cultivo a zonas más altas como se ha comentado, pero siempre por debajo de zonas con heladas y teniendo en cuenta el cero vegetativo de 10 °C para esta especie (Williams, 1987). En el mapa de suelos de Rioja Alavesa (Barrios, 1994) se establecía un altitud máxima de 650 m por encima del cual no se cartografió pues no se consideraba aconsejable plantar. Subir las plantaciones en altitud no solo implica cambiar la temperatura y precipitación, si no modificar la textura y composición de suelo, entre otros, por lo que aunque podría ser una solución se deberían tener en cuenta estos aspectos. Además, con 200 m de diferencia de altitud entre la cota más baja y más alta las diferencias que se observan en esta Tesis no son muy grandes, en comparación con la idea generalizada de una disminución de 1 °C por cada 100-150 m que se suba en altitud.

En cuanto al diseño de las nuevas plantaciones, pueden ser en laderas expuestas al norte y noreste en vez de al sur para tener una menor radiación solar y por tanto un menor grado alcohólico (Martínez de Toda, 2007; E-VitiClimate, 2012; Fraga *et al.*, 2012). La orientación de las filas podría pasar a ser Este-Oeste para tener también una menor radiación solar (Keller, 2010; Palliotti *et al.*, 2014). La densidad de plantación podrá tender a ser menor para que permita menores necesidades de agua (Palliotti *et al.*, 2014), en contra de la idea tradicional de que mayores densidades de plantación con plantas de menor tamaño producían vinos de mayor calidad (Champagnol, 1984; Jackson y Lombard, 1993). No obstante, a medida que baja la densidad de plantación, se hace más necesaria una gestión adecuada de la geometría de la vegetación (Yuste *et al.*, 2007), buscando la superficie foliar de exposición óptima. El sistema de conducción vaso podría ser una buena opción frente al emparrado, ya que, además de ser más resistente a la sequía (van Leeuwen y Darriet, 2016), los racimos quedan bien iluminados y aireados, pero evitando una excesiva exposición que produce quemaduras y oxidaciones que se acompañan de pérdida de peso, aumento del pH,

sobremaduración y degradación fenólica y aromática (García-Escudero, 2013). El concepto de radiación difusa está volviendo a plantearse como una opción válida (Palliotti *et al.*, 2014), se trata de que los racimos tengan una exposición a la luz más difusa para regiones en las que la sequía está asociada frecuentemente con altas temperaturas y baja humedad relativa que provocan aumentos en el déficit de presión de vapor ($>3.5-4$ kPa). Para ello, habría que establecer un dosel con crecimiento libre, que combinara una radiación difusa con penetración directa ocasional de la luz desde direcciones diferentes.

Finalmente, además de los factores agronómicos de adaptación hay que tener en cuenta otro tipo de factores más de tipo socio-económico. En este sentido, falta mucho trabajo por hacer y existe una carencia de conocimiento científico de base para saber cómo afectará el CC al consumo de vino. Es cierto que existen múltiples factores sociales y políticos que pueden condicionar las tendencias de consumo como pueden ser, el etiquetado, el contexto económico actual de crisis, el comercio al por menor o la publicidad. El aumento en el consumo de bebidas carbonatadas y frías, como la cerveza, durante periodos más cálidos es bien conocida (Lenten y Moosa, 1999). Si bien existen trabajos que han estudiado el vino dentro de la estacionalidad del consumo de alcohol (Silm y Ahas, 2005), el posible efecto del aumento de las temperaturas externas en el consumo de bebidas con un alto contenido de alcohol no ha sido considerada (Mira de Orduña, 2010).

Bibliografía

- Barrios, A. 1994. Mapa de Suelos de La Rioja Alavesa E: 1/50000. Departamento de Agricultura de la Diputación Foral de Álava. Servicio de Estudios y Relaciones Comunitarias. Vitoria-Gasteiz. España.
- Buesa, I., Pérez, D., Yeves, A., Sanz, F., Chirivella, C., Intrigliolo, D.S. 2014a. Poda tardía en Bobal y Tempranillo para retrasar el ciclo fenológico: respuesta agronómica y enológica. *Actas de Horticultura. II Jornadas del Grupo de Viticultura*. Madrid 3-4 Noviembre 2014. 344–349.
- Buesa, I., Caccavello, G., Basile, B., Merli, M.C., Poni, S., Chirivella, C., Intrigliolo, D.S. 2014b. Ralentización del proceso de maduración en Bobal y Tempranillo mediante deshojado tardío y riego: efectos sobre la composición de la uva y del vino. *Actas de Horticultura. II Jornadas del Grupo de Viticultura*. Madrid 3-4 Noviembre 2014. 337–343.
- Canals, R., Llaudy, M.C., Valls, J., Canals, J.M., Zamora, F. 2005. Influence of ethanol concentration on the extraction of colour and phenolic compounds from the skin and seeds of Tempranillo grapes at different stages of ripening. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 53: 4019–4025.
- Celette, F., Findeling, A., Gary, C. 2009. Competition for nitrogen in an unfertilised intercropping system: the case of an association of grapevine and grass cover in a Mediterranean climate. *European Journal of Agronomy* 30: 41–51.
- Champagnol, F. 1984. *Elements de Physiologie de la Vigne et de Viticulture Générale*. Pub. The Author, Montpellier.
- Chaves, M.M., Santos, T.P., Souza, C.R., Ortuño, M.F., Rodrigues, M.L., Lopes, C.M., Maroco, J.P., Pereira, J.S. 2007. Deficit irrigation in grapevine improves water-use efficiency while controlling vigour and production quality. *Annals of Applied Biology* 150: 237–252.
- Clingeleffer, P.R. 1993. Development of management systems for low cost, high quality wine production and vigour control in cool climate Australian vineyards. *Vitic. Enol. Science* 48: 130–134.
- DOCa Rioja, Consejo Regulador de la DOCa Rioja 2014. <https://es.riojawine.com/en/8-grape-varieties/18-grape-varieties.html> accedido 30/12/2016.
- Duchêne, E. 2016. How can grapevine genetics contribute to the adaptation to climate change? *OENO One* 50(3): 113–124.
- Edwards, E.J., Unwin, D., Kilmister, R., Treeby, M. 2016. Multi-seasonal effects of warming and elevated CO₂ on the physiology, growth and production of mature, field grown, Shiraz

- grapevines. Sustainable grape and wine production in the context of climate change. Bordeaux-France, April 10-13, 2016.
- Etaio, I., Elortondo, F.J.P., Albisu, M., Gaston, E., Ojeda, M., Schlich, P. 2008. Effect of winemaking process and addition of white grapes on the sensory and physicochemical characteristics of young red wines. *Australian Journal of Grape and Wine Research* 14, 211–222.
- Etaio, I., Elortondo, F.J.P., Albisu, M., Gaston, E., Schlich, P. 2009. Sensory attribute evolution in bottled young red wines from Rioja Alavesa. *European Food Research and Technology* 228: 695–705.
- E-VitiClimate, 2012. Life long Learning Project, E-VitiClimate. Euro Project Lifelong Learning Programme. Available at: (<http://www.eviticlimate.eu>) accedido 28/11/2013.
- Fidelibus, M.W., Christensen, L.P., Katayama, D.G., Pierre-Thibaut Verdenal, P.T. 2006. Yield Components and fruit composition of six Chardonnay grapevine clones in the Central San Joaquin Valley. Calif. *American Journal of Enology and Viticulture* 57: 503–506.
- Filippetti, I., Allegro, G., Mohaved, N., Pastore, C., Valentini, G., Intrieri, C. 2011. Effects of late-season source limitations induced by trimming and antitranspirants canopy spray on grape composition during ripening in *Vitis vinifera* cv. Sangiovese. In: *Proceedings of 17th International Symposium Giesco*, August 29th–2nd September, Asti-Alba, Italy, pp. 259–262.
- Fraga, H., Malheiro, A.C., Moutinho-Pereira, J., Santos, J.A. 2012. An overview of climate change impacts on European viticulture. *Food Energy Security* 1: 94–110.
- García-Escudero, E. 2013. Incidencia de las variaciones climáticas en el cultivo de la viña. *Ciencia y Tecnología*. http://www.acenologia.com/cienciaytecnologia/variaciones_climaticas_cultivo_cienc0613.htm accedido 29/12/2016.
- García-Merino, M., Hernández-Hierro, J.M., Rivas-Gonzalo, J.C., Escribano-Bailón, M.T. 2010. Colour and pigment composition of red wines obtained from co-maceration of Tempranillo and Graciano varieties. *Analytica Chimica Acta* 660: 134–142.
- Hannah, L., Roehrdanz, P.R., Ikegami, M., Shepard, A.V., Shaw, M.R., Tabor, G., Zhi, L., Marquet, P.A., Hijmans, R.J. 2013. Climate change, wine, and conservation. *Proc Natl Acad Sci USA* 110(17): 6907–6912.
- Iland, P., Gago, P. 2002. *Australian Wine: Styles and Tastes*. Ed. Patrick Iland Wine Promotions, Campbelltown.
- Jackson, D.I., Lombard, P.B. 1993. Environmental and management-practices affecting grape composition and wine quality - A review. *American Journal of Enology and Viticulture* 44: 409–430.

- Jones, G.V. 2003. Paper 4 from the “Terroir, geology and wine: A tribute to Simon J. Haynes” Session Held at the Geological Society of American Annual Meeting Seattle, Washington, November 2: 1–14.
- Jones, A., Panagos, P., Barcelo, S., Bouraoui, F., Bosco, C., Dewitte, O., et al. 2012. The state of soil in Europe. JRC Reference Reports. 80pp.
- Keller, M. 2010. Managing grapevines to optimize fruit development in a challenging environment: a climate change primer for viticulturist. *Australian Journal of Grape and Wine Research* 16: 56–69.
- Kirkpatrick, N. 2011. Will Global Warming Affect the Wine Industry? *mnn.com*. 30 June 2011. Available at: (<http://www.mnn.com/food/beverages/stories/will-global-warming-affect-the-wine-industry>) accedido 24/12/2016.
- Kliwer, W.M., Weaver, R.J. 1971. Effect of crop level and leaf area on growth, composition and coloration of 'Tokay' grapes. *American Journal of Enology and Viticulture* 22: 172–177.
- Kliwer, W.M., Smart, R.E. 1989. Canopy manipulation for optimizing vine microclimate, crop yield and composition of grapes. In: Wright, C.J. (Ed.), *Manipulating of Fruiting*. Butterworth & Co. Ltd, London, pp. 275–291.
- Koblet, W. 1985. Influence of light and temperature on vine performance in cool climates and applications to vineyard management. In: *Proceedings of the International Symposium on Cool Climate Viticulture and Enology*. D. A. Heatherbell, P. B. Lombard, F. W. Bodyfelt, and S. F. Price (Eds.) pp 139- 157. Eugene, OR. Oregon State University Experiment Station Technical Publication No. 7628.
- Kontoudakis, N., Esteruelas, M., Fort, F., Canals, J.M., De Freitas, V., Zamora, F. 2011. Influence of the heterogeneity of grape phenolic maturity on wine composition and quality. *Food Chemistry* 124: 767–774.
- Lenten, L.J.A., Moosa, I.A. 1999. Modelling the trend and seasonality in the consumption of alcoholic beverages in the United Kingdom. *Applied Economics* 31: 795–804.
- Lereboullet, A., Beltrando, G., Bardsley, D.K. 2013. Assessing vulnerability and Framing Adaptive Options of two Mediterranean Wine Growing Regions Facing Climate Change: Roussillon (France) and McLaren Vale (Australia). *Echo Géó*. Available at: (<http://echogeo.revues.org/13384?lang=en>) accedido 12/07/2014.
- Martínez de Toda, F. 1991. *Biología de la vid: fundamentos biológicos de la viticultura*. Mundi Prensa Libros SA.
- Martínez de Toda, F. 2007. Nuevas técnicas de estimación y control de la calidad de la uva en el viñedo. *Revista Tierras de Castilla y León: Agricultura* 138: 96–99.

- Martínez de Toda, F. 2011. Claves de la viticultura de calidad. Ed. Mundi Prensa. pp 253.
- Martínez de Toda, F., Balda, P. 2013. Delaying berry ripening through manipulating leaf área to fruit ratio. *Vitis* 52(4): 171-176.
- Martínez de Toda, F., Sancha, J., Zheng, W., Balda, P. 2014. Leaf area reduction by trimming, a growing technique to restore the anthocyanins: sugars ratio decoupled by the warming climate. *Vitis* 53: 189-192.
- Martínez de Toda, F., García, J., Zheng, W. 2015. Efectos de las altas temperaturas y los golpes de calor en la vid. Estrategias frente al cambio climático. *Revista Tierras de Castilla y León: Agricultura* 228: 94–99.
- Matthews, M.A., Anderson, M.M. 1993. Potassium – water relationships in winegrape production. In: Better crops with plant food. Published by the Potash & Phosphate Institut (PPI) Gerogia (USA) 19–21.
- Medrano, H., Tomás, M., Martorell, S., Escalona, J.M., Pou, A., Fuentes, S., Flexas, J., Bota, J. 2015. Improving water use efficiency of vineyards in semi-arid regions. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 35: 499–517.
- Mira de Orduña, R. 2010. Climate change associated effects on grape and wine quality and production. *Food Research International* 43: 1844–1855.
- Morales, F., Pascual, I., Sánchez-Díaz, M., Aguirreolea, J., Irigoyen, J.J., Goicoechea, N., Antolín, M.C., Oyarzun, M., Urdiain, A. 2014. Methodological advances: using greenhouses to simulate climate change scenarios. *Plant Science* 226: 30–40.
- Morales, F., Antolín, M.C., Aranjuelo, I., Goicoechea, N., Pascual, I. 2016. From vineyards to controlled environments in grapevine research: investigating responses to climate change scenarios using fruit-bearing cuttings. *Theoretical and Experimental Plant Physiology* 28: 171–191.
- Moutinho-Pereira, J., Gonçalves, B., Bacelar, E., Cunha, J.B., Coutinho, J., Correia, C.M. 2009. Effects of elevated CO₂ on grapevine (*Vitis vinifera* L.): physiological and yield attributes. *Vitis* 48: 159–165.
- Mozzel, M.R., Thach, L. 2014. The impact of climate change on the global wine industry: Challenges & solutions. *Wine Economics and Policy* 3: 81–89.
- Palliotti, A., Tombesi, S., Silvestroni, O., Lanari, V., Gatti, M., Poni, S. 2014. Changes in vineyard establishment and canopy management urged by earlier climate-related grape ripening: A review. *Scientia Horticulturae* 178: 43–54.

- Revilla, E., García-Beneytez, E., Cabello, F. 2009. Anthocyanin fingerprint of clones of Tempranillo grapes and wines made with them. *Australian Journal of Grape and Wine Research* 15: 70–78.
- Sadras, V.O., Stevens, R.M., Pech, J.M., Taylor, E.J., Nicholas, P.R., McCarthy, M.G. 2007. Quantifying phenotypic plasticity of berry traits using an allometric-type approach: A case study on anthocyanins and sugars in berries of Cabernet Sauvignon. *Australian Journal of Grape and Wine Research* 13(2): 72–80.
- Sáenz-Navajas, M.P., Avizcuri, J.M., Echávarri, J.F., Ferreira, V., Fernández-Zurbano, P., Valentin, D. 2016. Understanding quality judgements of red wines by experts: Effect of evaluation condition. *Food Quality and Preference* 48: 216–227.
- Salamon, A. 2006. Techniques to achieve moderate alcohol levels in South African wine. Assignment submitted in partial requirement for the Cape Wine Master Diploma. capewineacademy.co.za.
- Santesteban, L.G., Miranda, C., Loidi, M., Urrestarazu, J., Royo, J.B. 2014. Interés del despuntado precoz y el forzado de crecimiento de anticipados para retrasar la maduración en Tempranillo. *Actas de Horticultura. II Jornadas del Grupo de Viticultura*. Madrid 3-4 Noviembre 2014. 280–286.
- Santos, T., Lopes, C.M., Rodrigues, M.L., de Souza, C.R., Ricardo-da-Silva, J.M., Maroco, J.P., Pereira, J.S., Chaves, M.M. 2007. Partial rootzone drying irrigation affects cluster microclimate improving fruit composition of ‘Moscatel’ field-grown grapevines. *Scientia Horticulturae* 112: 321–330.
- Schultz, H., 2000. Climate change and viticulture: A European perspective on climatology, carbon dioxide and UV-B effects. *Australian Journal of Grape and Wine Research* 6: 2–12.
- Seccia, A., Maggi, G. 2011. Futuro roseo per i vini a bassa gradazione alcolica. *L’Inf.Agr.* 13 (supp. 1/7 aprile), S11–S14.
- Serra, I., Strever, A., Myburgh, P.A., Deloire, A. 2014. Review: the interaction between rootstocks and cultivars (*Vitis vinifera* L.) to enhance drought tolerance in grapevine. *Australian Journal of Grape and Wine Research* 20: 1–14.
- Silm, S., Ahas, R. 2005. Seasonality of alcohol-related phenomena in Estonia. *International Journal of Biometeorology* 49: 215–223.
- Stoll, M., Scheidweiler, M., Lafontaine, M., Schultz, H.R. 2009. Possibilities to reduce the velocity of berry maturation through various leaf area to fruit ratio modifications in *Vitis vinifera* L. Riesling. *Prog. Agric. Vitic.* 127: 68–71.

- Teixeira, A., Eiras-Dias, J., Castellarin, S.D., Gerós, H. 2013. Berry phenolics of grapevine under challenging environments. *International Journal of Molecular Sciences* 14(9): 18711–18739.
- Tesic, D., Keller, M., Hutton, R.J. 2007. Influence of vineyard floor management practices on grapevine vegetative growth, yield, and fruit composition. *American Journal of Enology and Viticulture* 58: 1–11.
- Tsegay, D., Amsalem, D., Almeida, M., Crandles, M. 2014. Responses of grapevine rootstocks to drought stress. *International Journal of Plant Physiology and Biochemistry* 6: 1–6.
- Unamunzaga, O. 2010. Zonificación de un viñedo de Rioja Alavesa según las propiedades del suelo y su influencia sobre producción y calidad. PhD thesis, Universidad de Zaragoza.
- van Leeuwen, C., Schultz, H.R., Garcia de Cortazar-Atauri, I., Duchêne, E., Ollat, N., Pieri, P., Bois, B., Goutouly, J.P., Quénel, H., Touzard, J.M., Malheiro, A.C., Bavaresco, L., Delrot, S. 2013. Why climate change will not dramatically decrease viticultural suitability in main wine-producing areas by 2050. www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1307927110
- van Leeuwen, C., Darriet, P. 2016. The impact of climate change on viticulture and wine quality. *Journal of Wine Economics* 11(1): 150–167.
- Williams, L.E. 1987. The effect of cyanamide on budbreak and vine development of Thompson Seedless grapevines in the San Joaquin Valley of California. *Vitis* 26: 107–113.
- Yuste, J., Pérez, M^a.A., Barajas, E. 2007. Efectos de la densidad de plantación en el régimen hídrico del viñedo. Capítulo 4.2. En: *Fundamentos, Aplicación y Consecuencias del riego en la vid*. Ed. Agrícola Española S.A. Madrid. 264 p.
- Yuste, J., Yuste, R., Albuquerque, M.V. 2016. Ten grapevine rootstocks: effects on vegetative development, production and grape quality of cv. Mencia in the D.O. Bierzo (Spain). *Proceedings of 11th International Terroir Congress*. July 11-14, Linfield College, McMinnville, Oregon, USA 295–300.
- Zheng, W., García, J., Balda, P., Martínez de Toda, F. 2014. Efectos del recorte severo de los pámpanos sobre el retraso y características de la maduración de la uva. *Actas de Horticultura. II Jornadas del Grupo de Viticultura*. Madrid 3-4 Noviembre 2014. 188–192.

CAPÍTULO 7: *Conclusiones finales*





1. Los distintos tipos de suelo, principalmente de acuerdo a su capacidad de retención hídrica, provocaron diferencias en la calidad de los mostos de los viñedos en una bodega cooperativa de Rioja Alavesa.

- a. Los suelos con una mayor capacidad de retención hídrica confirieron un mayor vigor al viñedo (mayor NDVI) y produjeron mostos con una mayor acidez total, debido principalmente a una mayor concentración de ácido málico.
- b. Los suelos con una menor capacidad de retención hídrica fueron los únicos capaces de producir mostos con una mayor concentración de antocianos y mayor intensidad de color.
- c. Los suelos con una capacidad de retención de agua media, que tenían una textura más arenosa y un menor contenido de K en el suelo en el horizonte superficial, produjeron mostos con una menor concentración de K.

2. Las diferencias de temperatura y precipitación entre las dos zonas climáticas diferenciadas en los viñedos (la zona Norte a una mayor altitud y ubicada más próxima a la Sierra de Cantabria frente a la zona Sur próxima al río Ebro) no fueron lo suficientemente intensas para causar diferencias reseñables en la calidad de la uva.

3. Las condiciones de cambio climático esperadas para el periodo 2070-2100 en la DOCa Rioja [+CO₂,+T,-HR: una concentración de 700 ppm CO₂, un aumento de 4 °C (28/18 °C) y un descenso del 12% de la humedad relativa (33/53%); estrés hídrico: un aporte de agua 40% menor que en la actualidad] fueron estudiadas frente a las condiciones climáticas actuales [-CO₂, -T, +HR: 390 ppm CO₂, 24/14 °C, 45/56% HR; mayor disponibilidad hídrica] en tres suelos con texturas diferentes según su contenido de arcilla (41%, 19% y 8%) en la variedad Tempranillo en el estudio de invernadero.

3.1 Las condiciones de cambio climático referidas al CO₂, T y HR afectaron del siguiente modo:

- a. Se observó una interacción entre el factor CO₂, T, HR y el factor aporte de agua a las vides. Así se produjo un aumento de la actividad fotosintética en plantas crecidas bajo dichas condiciones y que estaban bien regadas, aunque este efecto se anuló cuando el aporte de agua fue menor, simulando las condiciones de precipitación que se esperan en el futuro.
- b. Tras un largo período de exposición a las condiciones esperadas bajo el nuevo escenario de cambio climático, se observó una aclimatación fotosintética ya que disminuyó la tasa fotosintética.
- c. En las condiciones esperadas en el nuevo escenario de cambio climático la acumulación de azúcar se vio acelerada, lo que llevó a un adelanto de la fecha de vendimia, determinada por el grado 21-23 Brix de azúcar. El periodo desde cuajado hasta envero se adelantó en 7 días y desde cuajado hasta vendimia en 10 días. Esto provocó que los mostos tuvieran concentraciones más bajas de ácido málico y tartárico (asociadas a una mayor temperatura), menor concentración de antocianos totales, menor intensidad de color, un pH más alto y una mayor tonalidad. Por tanto, se determinó que la síntesis de azúcar se desacopló del proceso de acumulación de polifenoles.

3.2 Las plantas de vid sometidas al estrés hídrico (40% menos de disponibilidad hídrica) tanto en el escenario de cambio climático como en el clima actual se vieron afectadas de la siguiente manera en el estudio de invernadero:

- a. Mostraron una menor actividad fotosintética, lo que junto con la inducción del cierre estomático, hizo que aumentara la eficiencia en el uso del agua. Esto redujo el crecimiento vegetativo y retrasó la acumulación de azúcar y, por tanto, la vendimia (en 9 días desde cuajado hasta alcanzar 21-23 Brix).
- b. El estrés hídrico produjo mostos con una menor concentración de ácido málico únicamente en los suelos con menor contenido de arcilla.

- c. Se alteró de forma significativa el estado nutricional de la vid, aumentando la concentración foliar de Na en envero y de Mn en vendimia (en comparación con plantas con una mayor disponibilidad hídrica). La menor concentración foliar de nutrientes en las plantas con una mayor disponibilidad hídrica fue debida a una mayor producción de biomasa aérea, lo que causó un efecto dilución de los nutrientes. La excepción fue el K, que presentó mayores concentraciones en hoja y también en uva en las plantas con una mayor disponibilidad hídrica debido a un incremento de la absorción de K con el agua extraída por las plantas.

3.3 La textura del suelo en el estudio de invernadero no causó cambios tan significativos como los factores anteriores:

- a. Las diferencias texturales no modificaron de forma significativa la actividad fotosintética. Hubo una interacción entre la textura del suelo y el aporte de agua. Así, en las plantas del tratamiento de mayor disponibilidad hídrica crecidas en los suelos con mayor contenido de arena disminuyó la conductancia estomática y de forma ligera el transporte electrónico fotosintético (medido como “quenching” fotoquímico).
- b. Los suelos con un mayor contenido de arcilla produjeron un menor peso fresco de raíces, mayores concentraciones foliares de Ca y Mn en vendimia y mostos con una menor concentración de antocianos totales y mayor concentración de K. A pesar de que el aporte de K por la fertirrigación excedió por mucho el K extraído por la planta y fue el mismo en los tres tipos de suelo, una mayor disponibilidad de K en los suelos de mayor contenido de arcilla aumentó la concentración de K en los tejidos vegetales y el mosto.

Esta Tesis pone de relieve que el estudio en invernadero-cámara de crecimiento utilizando suelo en macetas ha sido una muy buena aproximación para hacer una determinación preliminar de los posibles efectos de las condiciones de cambio climático, simuladas para el periodo 2070-2100, sobre la fisiología de la vid, la calidad de las bayas y su estado nutricional. Por tanto, es una excelente herramienta para estimar las consecuencias del cambio climático, y más teniendo en cuenta que cuantificar estas respuestas en el campo es muy complejo. Este tipo de ensayos ayudan a tener bajo control muchos de los factores que afectan a la vid (CO₂, temperatura, HR, disponibilidad hídrica, textura de suelo) además de permitir estudiar las interacciones entre dichos factores. Esto permite investigaciones más mecanicistas sobre las causas de las respuestas fisiológicas a condiciones climáticas futuras. A su vez, este tipo de estudios coordinados con otro tipo de ensayos en campo podría ayudar a una mejor comprensión de la problemática a estudiar.

Por otra parte, queda patente que la cartografía de suelo, la información del material vegetal, los datos de los seguimientos de maduración y de las prácticas de manejo de los que disponen las bodegas, junto con la información climática a escala 1km x 1km, suponen una información muy valiosa para la evaluación de la clasificación en calidades. Esa información detallada puede servir para otros fines, por ejemplo, para evaluar la influencia de las condiciones climáticas anuales, representando otro modo de estudiar la incidencia del aumento de temperatura o de la reducción de precipitaciones. Además, si se planifica y diseña de la manera adecuada, podría suponer una buena herramienta para estudiar la influencia de las modificaciones de las prácticas agronómicas sobre la calidad, con el objeto de poder mitigar las consecuencias negativas que el cambio climático va a ejercer sobre la calidad de la uva.

Es evidente que para una mejor toma de decisiones en el viñedo y para evaluar mejor la incidencia del cambio climático y de las prácticas tendentes a mitigar sus efectos, es necesario trabajar en la mejora de la información disponible tanto en lo referido a la captura como al manejo de la misma. De este modo se profundizaría en el conocimiento del viñedo y se podría actuar de la mejor forma según el tipo de suelo, parcela, disponibilidad hídrica, etc. Asimismo, el uso de herramientas estadísticas más potentes o disponer de un conocimiento mayor de las mismas podría ayudar a entender mejor la influencia del clima y suelo en la calidad.

De los resultados obtenidos en esta Tesis se puede concluir de forma general que los efectos del cambio climático, como pueden ser la aceleración en la acumulación de azúcar, la disminución de la acidez o el desacoplamiento con el proceso de acumulación de los polifenoles en la variedad Tempranillo, van a ser lo suficientemente importantes como para plantear medidas de adaptación. A la hora de seleccionar nuevos emplazamientos para viñedo, habrá que tener en cuenta la capacidad de retención hídrica de los suelos porque probablemente las precipitaciones irán descendiendo en un futuro. Además, la disponibilidad de K del suelo también se tendrá que considerar, y más sabiendo que la pérdida de acidez es una de las consecuencias negativas que parece que nos deparará el cambio climático.

