



## ESTRATEGIAS DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL VIÑEDO DE LA CUENCA MEDITERRÁNEA: EL CASO DEL RIOJA

TEODORO LASANTA<sup>1</sup>, CARLOS BAROJA-SÁENZ<sup>1,2</sup>,  
MELANI CORTIJOS-LÓPEZ<sup>1\*</sup>, ESTELA NADAL-ROMERO<sup>1</sup>,  
IGNACIO MARTÍN<sup>3</sup>, ENRIQUE GARCÍA-ESCUADERO<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Instituto Pirenaico de Ecología (IPE, CSIC), Campus de Aula Dei,  
Avda. Montañana, 177, 50080 Zaragoza, España.

<sup>2</sup> Instituto Geográfico Nacional (IGN), C/ General Ibáñez de Ibero, 3, 28003 Madrid, España.

<sup>3</sup> Instituto de Ciencias de la Vid y del Vino (ICVV) (CSIC, Universidad de La Rioja,  
Gobierno de La Rioja), Servicio de Investigación Agraria y Sanidad Vegetal  
del Gobierno de La Rioja, Finca La Grajera, España.

**RESUMEN.** El cambio climático está imponiendo condiciones cada vez más cálidas y secas en los viñedos de la cuenca mediterránea, que afectan tanto a la fisiología y fenología de la vid, como a la producción y a la calidad de la uva. En este contexto, se hacen necesarias medidas de adaptación y mitigación frente al cambio climático para mantener vinos de alta calidad y tipicidad varietal, así como para responder a las demandas del mercado. El objetivo de este trabajo es mostrar estrategias de adaptación que están llevando a cabo o están considerando los viticultores de la Denominación de Origen Calificada Rioja (DOCa Rioja). Entre las estrategias destacan: i) los cambios de localización del viñedo, bien hacia áreas con posibilidades de riego y suelos muy fértiles (terrazas bajas, principalmente), o bien hacia zonas de mayor altitud (glacis altos, fundamentalmente), con lo que se trata de evitar los efectos del estrés hídrico y del incremento de las temperaturas; y ii) las modificaciones en el sistema de conducción de la cepa, sustituyendo en muchas ocasiones la conducción en vaso por la de espaldera, con el fin de hacer coincidir un mayor grado de mecanización de las tareas agronómicas y la mejora del microclima de la cepa, especialmente en las nuevas plantaciones sobre suelos muy fértiles. Estas estrategias serán cada vez más relevantes, teniendo en cuenta el previsible incremento de las temperaturas y de las sequías en los futuros escenarios climáticos. No obstante, se plantea la duda de si serán suficientes o se necesitará eliminar restricciones actuales impuestas por la DOCa Rioja, como ampliar el área de cultivo del viñedo en zonas de montaña o introducir nuevas variedades.

### *Strategies for adaptation to climate change in vineyards in the Mediterranean basin: the case of the DOCa Rioja*

**ABSTRACT.** Climate change is promoting increasingly hot and dry conditions in the vineyards of the Mediterranean basin, affecting both the physiology and phenology of the vine, as well as the production and quality of the grape. In this context, adaptation and mitigation measurements against climate change are necessary to maintain high quality wines and varietal typicality, as well as to respond to market demands. The objective of this study is to show adaptation strategies that are being carried out or considered by winegrowers of the Denomination of Origin Qualified Rioja (DOCa Rioja). Among the strategies, the following should be highlighted: changes in the location of the vineyard, either towards areas with irrigation possibilities and very fertile soils (mainly low terraces), or towards higher altitude areas (mainly high glacis), thus trying to avoid the effects of water stress and increased temperatures; and (ii) modifications in the strain conduction system, often replacing the vessel

conduction with the trellis conduction, in order to match a greater degree of mechanization of the agronomic tasks and the improvement of the vine's microclimate, especially in the new plantations in very fertile soils. These strategies will be increasingly relevant, taking into account the foreseeable increase in temperatures and droughts in the future climate scenarios. However, the question arises as to whether these strategies will be sufficient or whether it will be necessary to eliminate current restrictions imposed by DOCa Rioja, such as expanding the vineyard in mountain areas or introducing new varieties.

**Palabras clave:** Viticultura, regadío, viñedos de altitud, gestión de viñedos, Denominación de Origen.

**Key words:** Viticulture, irrigation, high altitude vineyards, vineyard management, "terroir".

Recibido: 10 Marzo 2021

Aceptado: 27 Abril 2021

\*Correspondencia: Melani Cortijos López, Instituto Pirenaico de Ecología (IPE, CSIC), Campus Aula Dei, Avda. Montañana, 177, 50080 Zaragoza, España. E-mail address: melani@ipe.csic.es

## 1. Introducción

El sector vitivinícola es especialmente vulnerable al cambio climático (CC), por su elevada dependencia de las condiciones climáticas y ambientales (Carroquino *et al.*, 2020). Especialmente, el incremento de las temperaturas y el estrés hídrico asociados al CC tienen efectos sobre la fisiología y fenología de la vid, los rendimientos y la calidad de la uva (Iglesias *et al.*, 2010; Jones y Alves, 2012; Fraga *et al.*, 2016a; Ramos, 2017).

En los últimos años, se han realizado diversos estudios a escala mundial y regional para evaluar y predecir cómo afecta el CC a la viticultura en la actualidad, y cómo afectará en las próximas décadas (López-Bustíns *et al.*, 2014; Mills-Novoa *et al.*, 2016; Ramos, 2017; van Leeuwen y Destrac-Irvine, 2017; Irimia *et al.*, 2018; Biasi *et al.*, 2019; Del Pozo *et al.*, 2019, entre otros). Los estudios realizados identifican tres efectos del CC especialmente sensibles para la viticultura: i) el aumento de las temperaturas; ii) la modificación de los patrones de lluvia, con un reparto irregular a escala anual e interanual de las precipitaciones, con la existencia de periodos de sequía más frecuentes, intensos y duraderos, junto con episodios de lluvias muy intensas que ocasionan graves problemas de erosión en el suelo; y iii) el incremento de la radiación solar, en particular de los rayos UV-B.

Los estudios climáticos señalan que, durante el siglo XX, la temperatura se ha incrementado entre 0,5 y 1°C (IPCC, 2014), y que esta tendencia continuará durante el siglo XXI con incrementos entre 1 y 4°C, en función de la cantidad de las emisiones de gases de efecto invernadero (IPCC, 2014). El incremento de la temperatura implica un adelanto de las etapas fenológicas de la vid (brotación, floración, envero y maduración), lo que lleva a una cosecha más temprana (Ramos, 2017; van Leeuwen y Destrac-Irvine, 2017; Santillan *et al.*, 2019). Jones (2006) señala que la cosecha de la uva se ha adelantado entre seis y veinticinco días en Europa, reflejando la fuerte relación entre calentamiento y fenología de la vid. En el hemisferio norte, la madurez de la uva, es decir, la composición óptima para que el vino sea de buena y adecuada calidad, se debe alcanzar entre el 10 de septiembre y el 10 de octubre, cuando las temperaturas comienzan a disminuir (van Leeuwen y Seguin, 2006). Si la maduración transcurre con temperaturas elevadas, el resultado supondrá uvas con características desequilibradas, con altos niveles de azúcar y, por tanto, un grado alcohólico elevado del vino, y baja concentración de ácidos orgánicos, lo que reduce la capacidad para el envejecimiento del vino, con un pH alto y escasa complejidad aromática (van Leeuwen y Destrac-Irvine, 2017; Carroquino *et al.*, 2020).

Los cambios en la precipitación no son tan claros ni tan uniformes como en el caso de las temperaturas (IPCC, 2014). En la cuenca mediterránea, la precipitación anual no muestra una tendencia clara (Peña-Angulo *et al.*, 2020). Sin embargo, se ha observado la disminución de la precipitación en primavera y la mayor frecuencia e intensidad de las sequías, generando en la vid de secano periodos más acusados de estrés hídrico (De Luis *et al.*, 2009; Domínguez-Castro *et al.*, 2019). El estrés hídrico provoca la senescencia prematura de las hojas, lo que dificulta la correcta maduración de la uva y reduce los rendimientos, ya que condiciona el número de racimos y las bayas alcanzan menor peso (Romero *et al.*, 2015; Del Pozo *et al.*, 2019). Por otro lado, los escenarios futuros inciden en que el estrés hídrico se incrementará debido a la mayor demanda de agua por un aumento de la evapotranspiración (Iglesias *et al.*, 2011; Domínguez-Castro *et al.*, 2019). Otro aspecto del CC que influye en la fenología de la vid es el incremento de la radiación solar, especialmente de los rayos UV-B (Schultz, 2000), lo que puede ser positivo en determinadas circunstancias para los compuestos fenólicos del hollejo de la uva, pero negativo en otras para los aromas y el color, especialmente si la radiación es muy elevada (Van Leeuwen y Darriet, 2016).

Así las cosas, el CC está imponiendo condiciones cada vez más cálidas y secas en los viñedos, por lo que la calidad y los rendimientos se están viendo afectados. Aún lo estarán más en el futuro de continuar la actual tendencia climática (van Leeuwen *et al.*, 2019).

La globalización en la vitivinicultura es una realidad mucho más evidente que en otros cultivos y productos agroalimentarios. Alrededor de un tercio de la producción mundial de vino se exporta a los mercados internacionales, que son extremadamente competitivos (Albisu, 2014). Hay que tener en cuenta que el consumo de vino retrocede desde los años setenta del pasado siglo: en el quinquenio 1976-80 el consumo medio anual era de 285,7 millones de hectólitros (M/hl), mientras que para el periodo 2011-2015 lo fue de 241,8 M/hl. Sin embargo, la producción cada vez es mayor por la incorporación de nuevos países productores al mercado mundial, de tal modo que la producción supera claramente a la demanda, suponiendo en ese mismo quinquenio de 2011-2015 una producción de 271,4 M/hl/año (Barco Royo, 2018). Son los vinos de calidad, con características específicas ligadas a un territorio, los que mejor se comercializan en los mercados internacionales del vino y mayor rentabilidad aportan a las regiones productoras (Albisu, 2014; Constantini *et al.*, 2016).

En este contexto, normalmente cada vino se presenta en el mercado con una etiqueta de Denominación de Origen (D.O.) concreta, identificándose de algún modo con el concepto de “*Terroir*”, es decir, conjunto de factores naturales y humanos que interactúan para producir un vino específico (Vaudour, 2002; van Leeuwen y Seguin, 2006; Hinnewinkel, 2010). Estos factores incluyen el clima, el suelo, la topografía, el sistema de cultivo de la vid y las prácticas vitícolas y enológicas; juntos crean características únicas y distintivas en el vino de un lugar dado, lo que es percibido y reconocible por los consumidores y expertos (Costantini *et al.*, 2016; Vaudour *et al.*, 2015; Priori *et al.*, 2019).

Es cierto que se puede cultivar la vid en climas muy diversos, pero no es menos cierto que la viticultura de calidad sólo es posible en un estrecho rango de condiciones climáticas fuera del cual se puede producir vino, pero por lo general de una calidad muy inferior (Mills-Novoa *et al.*, 2016). Para muchas regiones vitícolas mediterráneas, con vinos muy reconocidos y valorados en los mercados, tiene especial interés mantener la calidad y tipicidad de la uva, con el fin de no perder mercados o sufrir la bajada de los precios que los consumidores están dispuestos a pagar (van Leeuwen *et al.*, 2019).

Las áreas mediterráneas tienen una gran diversidad de condiciones ambientales, como consecuencia de un relieve complejo, que genera una elevada heterogeneidad topográfica y topoclimática (Nogués-Bravo, 2006; Serra *et al.*, 2008; García-Ruiz *et al.*, 2011). Por otro lado, cuentan con infraestructuras de riego y elevados conocimientos sobre el manejo del agua, lo que facilita dotar de riego a cultivos tradicionalmente de secano, como el viñedo (Lasanta, 2009; Jlassi *et al.*, 2016). Nuestra hipótesis es que la diversidad de ambientes y su conocimiento, así como el riego, ofrecen oportunidades de adaptación local a la viticultura mediterránea, lo que puede ayudar a mitigar el cambio

climático y a mantener un sector socioeconómico fundamental para muchas regiones vitivinícolas (Lehmann *et al.*, 2013; Delay *et al.*, 2015).

El cambio climático es una realidad, por lo que es necesario explorar la capacidad de los viticultores para aprovechar su medio ambiente y gestionar un correcto manejo de las prácticas agrícolas que permiten adaptarse al CC. El objetivo de este trabajo pasa por aportar información sobre las primeras medidas de adaptación al CC que se están realizando en los viñedos de la Denominación de Origen Calificada Rioja (DOCa Rioja, en adelante). En concreto, se estudian: i) los cambios en la localización del viñedo entre 1977 y 2017, y ii) los cambios en las prácticas agronómicas relacionadas con el sistema de conducción de las cepas. Mostrar estos cambios tiene un elevado interés práctico para la propia región de la DOCa Rioja, donde el sector vitivinícola basado en el vino de calidad constituye uno de los motores fundamentales de la economía regional, y para otras áreas mediterráneas en las que la producción de vino de alta calidad ofrece beneficios económicos, sociales y ambientales, además de generar empleo y constituir un factor de sostenibilidad (Iglesias *et al.*, 2011; Burge *et al.*, 2015; Santillan *et al.*, 2019).

## 2. Materiales y métodos

### 2.1. Área de estudio

En este estudio se trabaja a tres escalas espaciales (regional, comarcal y municipal), en función de la información disponible y del tipo de cambio estudiado.

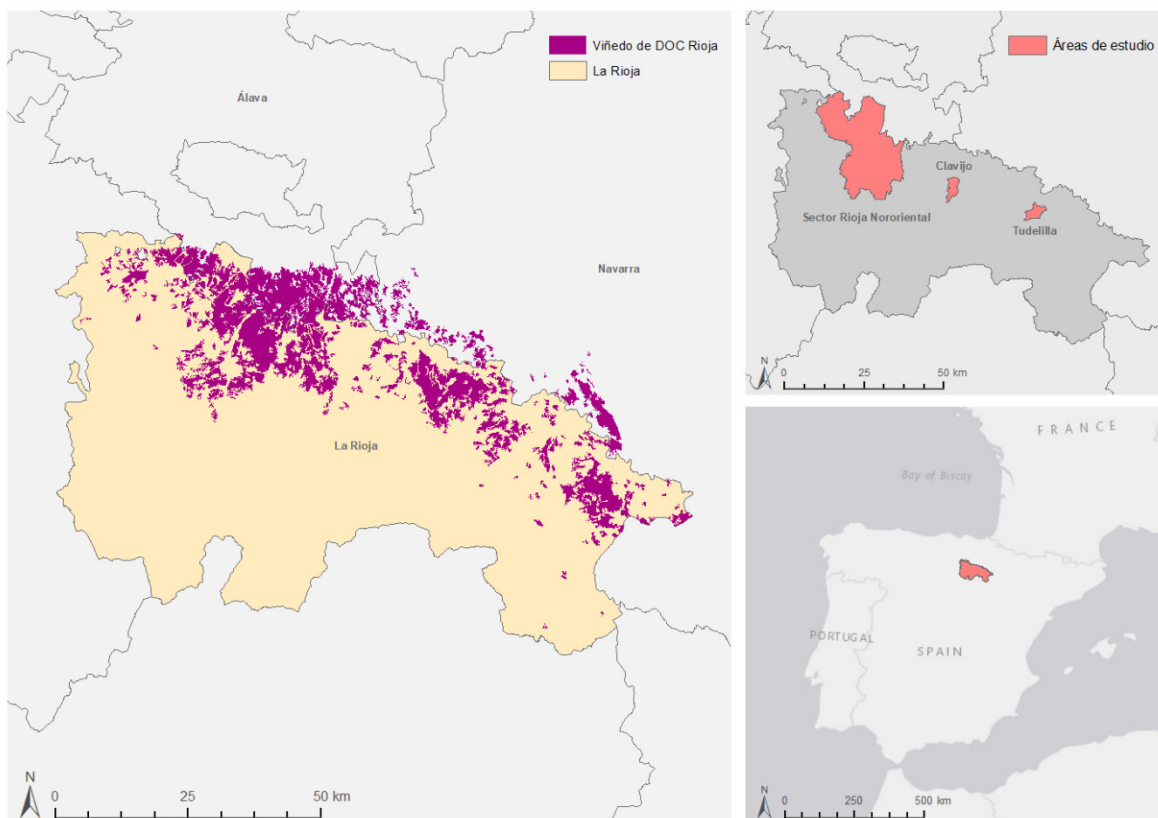
#### 2.1.1. Escala regional: El territorio de La Rioja

El vino de Rioja (España) procede de viñedos localizados en tres provincias: La Rioja (que aporta el 68,7% de la superficie), Álava (20,5%) y Navarra (10,7%) (Fig. 1). En este artículo, hablamos de Rioja para el conjunto de la DOCa Rioja, y nos referimos en otras ocasiones exclusivamente al territorio de La Rioja como provincia. A escala de la provincia de La Rioja, el sector vitivinícola tiene un destacado peso socioeconómico. Basta señalar que en 2017 el viñedo ocupaba 46.876 ha, es decir el 30% del espacio agrícola, siendo el segundo cultivo en extensión, después de los cereales con 50.674 ha, y un 32,4% de la superficie cultivada (Gobierno de La Rioja, 2020). Es el primero en aportación económica dentro del sector agrario, con un montante de 320,2 M. de euros en 2017, lo que equivale al 45,6% de la Producción Final Agraria. La producción de vino aportó, en la misma fecha, 692,3 millones de euros y 2.396 empleos (el 10,2% del empleo industrial). En conjunto, el sector vitivinícola representó el 12,3% del Producto Interior Bruto de La Rioja. La aportación económica fue aún mayor en las comarcas de Álava y Navarra, amparadas bajo en la DOCa Rioja, ya que la vitivinicultura es su pilar económico, en algunos municipios casi único (Lasanta, 2018).

El viñedo de Rioja se localiza en las llanuras de la Depresión del río Ebro, caracterizadas por una suave topografía y altitudes comprendidas entre 300 y 600 m s.n.m. (Fig. 1). En este sector, el relieve se resuelve en varios niveles de glacis y terrazas, que alternan con restos de plataformas estructurales (Gonzalo Moreno, 1981). Los glacis están formados por un sustrato rocoso de areniscas y margas terciarias, cubiertos por acumulaciones cuaternarias, donde la presencia de cantos es frecuente, especialmente en los niveles más altos. Las terrazas poseen suelos más profundos y fértiles que los glacis, si bien las más antiguas cuentan con abundantes cantos. Al norte y al sur del área de localización del viñedo, aparecen un conjunto de sierras incluidas en la Cordillera Cantábrica y el Sistema Ibérico, respectivamente, con altitudes superiores a los 800 m s.n.m. De cara al desarrollo de la vid y de la calidad del vino, los materiales de los suelos de La Rioja pueden clasificarse en tres órdenes: Alfisoles, Mollisoles e Inceptisoles, según la clasificación de la Soil Taxonomy (Martínez Vidaurre, 2017).

El clima de la DOCa Rioja es muy variado, con influencias atlánticas en el sector occidental y mediterráneas en el oriental, a lo que hay que unir los contrastes que crea el relieve, lo que origina un

mosaico de regímenes climáticos (Cuadrat y Vicente-Serrano, 2008). En el sector occidental, las precipitaciones superan los 500 mm, alcanzando su máximo en invierno y primavera. El balance hídrico es favorable y son pocos los meses con déficit de agua. Las temperaturas resultan suaves, con amplitud térmica moderada. En el sector oriental, las precipitaciones no alcanzan los 400 mm en la mayor parte de los observatorios, registrándose los máximos en otoño y primavera. Las temperaturas son más elevadas, con mayor oscilación térmica que en el sector más occidental, mostrando un carácter más continental. El déficit hídrico y la evapotranspiración potencial alcanzan valores elevados (Cuadrat y Vicente-Serrano, 2008). Tonietto y Carbonneau (2004) reconocen en el viñedo de Rioja unas condiciones climáticas especialmente adecuadas para la viticultura de calidad, con un nivel aceptable en restricciones climáticas, así como unas condiciones más ventajosas que en otros territorios vitivinícolas (Zhu *et al.*, 2014). Las proyecciones de diferentes escenarios de cambio climático en la región indican que las temperaturas se van a incrementar en torno a 4°C a finales del siglo XXI y las precipitaciones se reducirían alrededor de un 15%, considerando en ambos casos el escenario de emisiones de gases de efecto invernadero (RCP8.5) (<http://escenarios.adaptecca.es/>). Estos cambios suponen condiciones de mayor aridez climática, con un notable aumento de la frecuencia y severidad de los eventos de sequía (García-Valdecasas *et al.*, 2020).



*Figura 1. Área de estudio.*

### 2.1.2. Escala comarcal: La Rioja Alta y los municipios de Clavijo y Tudelilla

Para conocer los cambios en la distribución espacial del viñedo, se trabajó a dos escalas: comarcal y municipal. A escala comarcal, se seleccionó un sector de la Rioja Alta (Fig. 1), donde el viñedo ha constituido, desde hace más de un siglo, la matriz del paisaje (Galilea-Salvador, 2010). En este sector, el río Ebro recorre el área de estudio de Oeste a Este, recibiendo por su margen derecha las aguas de sus afluentes Oja-Tirón y Najerilla, mientras que por la izquierda desaguan una serie de barrancos de corto recorrido que descienden de la Sierra de Cantabria (Ollero Ojeda, 1996), por lo que

dominan glaciares y terrazas como formas de relieve, con una topografía de suaves pendientes y formas ligeramente alomadas o llanas (Gonzalo Moreno, 1981). El clima es de tipo mediterráneo con influencia atlántica, con una precipitación media de 500-600 mm y valores máximos en primavera e invierno. La temperatura media anual oscila entre los 12-13°C, registrándose una moderada amplitud térmica: 4-6°C en diciembre-enero y 20-21°C en julio-agosto (Cuadrat y Vicente-Serrano, 2008). Los suelos predominantes son Calcisoles, con textura franca y arenosa (Gómez Miguel, 2006).

Por otro lado, para conocer los cambios del viñedo en altitud, se trabajó en dos municipios: Clavijo y Tudelilla (Fig. 1). Se eligieron estos dos municipios por: i) su localización en el sector central de La Rioja (clima de transición entre las condiciones más oceánicas del sector occidental y más mediterráneas del sector oriental); ii) ser municipios con marcado carácter de seco, por lo que los viñedos no pueden beneficiarse fácilmente del agua de riego y iii) ser representativos del piedemonte o somontano, lo que implica importantes diferencias de altitud entre las cotas extremas de ambos municipios. Además, uno de los municipios (Clavijo) tiene escasa tradición vitícola, mientras que el otro (Tudelilla) ha tenido el cultivo de la vid como principal actividad económica, al menos desde mediados del siglo XX.

### 2.1.3. El vino de Rioja

La diversidad de condiciones climáticas y edáficas da lugar a una gama de vinos muy amplia y variada, con buena aceptación en mercados diversos, en los que progresivamente ha ido adquiriendo nuevas cuotas de reconocimiento y posicionamiento. Así, en el quinquenio 1979-83 se comercializó una media de 99,24 Mlitros/año, de los que el 71,7% se destinó al comercio interior y el resto al comercio exterior. En el quinquenio 2013-17, se vendió una media de 281,75 Mlitros/año, de los que el 62,6% fue al mercado nacional y el resto se exportó a países de los cinco continentes, siendo Reino Unido, Alemania y EE.UU. los principales consumidores (Lasanta, 2018).

La producción de vino de Rioja está regulada y controlada desde 1926 por el Consejo Regulador (C.R.) de la DOCa Rioja, cuya misión es: i) delimitar el territorio del Rioja; ii) controlar el cultivo y las exigencias de elaboración para la obtención de un vino de calidad, haciendo uso del contenido de su Reglamento y de las Normas de Campaña; y iii) promocionar la imagen del Rioja y ayudar a los agentes del sector a buscar nuevos mercados. De cara a los objetivos de este trabajo conviene resaltar algunas cuestiones reguladas por el C.R. de la DOCa Rioja:

1. En 2018, el 90,85% del viñedo de Rioja (59.819 ha) eran variedades tintas y el 9,15% (6.022 ha) variedades blancas. Entre las variedades tintas, las más importantes son el *Tempranillo* (79,7% de la superficie total del viñedo) y la *Garnacha tinta* (6,9%). Otras variedades tintas están permitidas: *Graciano* (1,9%), *Mazuelo* (1,9%) y *Maturana Tinta*. Entre las variedades blancas, la más representativa es la *Viura* (6,3%). Recientemente, se han incluido otras variedades blancas: *Maturana Blanca*, *Tempranillo Blanco*, *Turruntés*, *Verdejo*, *Chardonnay* y *Sauvignon Blanc*, que están teniendo una buena acogida por parte de los viticultores, pero dada su reciente implantación todavía ocupan muy poca superficie en el conjunto de la DOCa Rioja. En definitiva, el Rioja presenta escasa diversidad varietal, ya que las tres variedades principales ocupan el 96,8% del viñedo de Rioja (C.R. de la DOCa Rioja, 2019).
2. Desde el año 2000 el C.R. de la DOCa Rioja limitó los rendimientos con el fin de ajustar la oferta a la demanda y mantener la calidad. En uvas tintas, el rendimiento máximo es de 6500 kg/ha y en blancas de 9000 Kg/ha, pudiéndose incrementar (o disminuir en su caso) un 10% más en función de las circunstancias de cada año.
3. En su momento y con los criterios de entonces, la Ley 25/1970, de 2 de diciembre, del Estatuto de la Viña, del Vino y de los Alcoholes prohibió el riego del viñedo para evitar la sobreproducción de vino, lo que plantearía problemas de comercialización en los mercados y la

pérdida de calidad ligada a la menor graduación alcohólica. Sin embargo, las frecuentes e intensas sequías durante los años noventa, aconsejaron suprimir dicha ley para asegurar las cosechas y en su caso una correcta maduración de la uva. A partir de la Ley 24/2003, de 10 de julio, de la Viña y del Vino, los viñedos pueden recibir riegos de apoyo durante el ciclo de cultivo, generalmente riego localizado por goteo, en las fechas y condiciones que la DOCa Rioja determina (Lasanta *et al.*, 2016).

4. El sistema tradicional de poda de la cepa ha sido el vaso. No obstante, desde 1991 el CR de la DOCa Rioja admitió el sistema de conducción apoyado en espaldera, manteniéndose de forma similar los criterios de densidad de plantación que regían para el sistema de poda en vaso. La admisión del sistema en espaldera obedece, entre otras cuestiones, a dos objetivos: i) aumentar el grado de mecanización de las explotaciones vitícolas, y ii) favorecer la instalación del riego localizado, con el apoyo de las estructuras de conducción del viñedo en espaldera, lo que puede contribuir a facilitar la instalación del riego y, en algunos casos, a economizar el gasto de agua (Rodríguez Rodrigo, 2000).

## 2.2. Fuentes de información y métodos

### 2.2.1. Cartografía del viñedo en La Rioja Alta y su relación con las formas de relieve

A escala comarcal, se estudió la evolución de la localización del viñedo entre 1977 y 2017 en la Rioja Alta. La metodología se apoyó en las fotografías aéreas de 1977 y de 2017. Se escanearon los fotogramas con la máxima resolución, se georreferenciaron y se cartografiaron con detalle las parcelas de viñedos, con la ayuda de un software SIG (Arc View). Las imágenes utilizadas cubrieron un total de 517,37 km<sup>2</sup>. Una vez generados los mapas, los datos se exportaron a un software SIG raster (ArcGIS 10.5), con el objetivo de poder analizar y visualizar los datos espacialmente. Para relacionar la distribución del viñedo, en ambas fechas, con un documento de síntesis de las condiciones ambientales, se utilizó un mapa geomorfológico, elaborado por Galilea-Salvador (2010), que incluye tanto formas de sedimentación (glacis y terrazas) como de vertientes (vertientes regularizadas) y áreas de erosión (badlands y rills).

### 2.2.2. Cartografía del viñedo y su relación con la altitud en Clavijo y Tudelilla

En el mismo sentido, se cartografió la distribución del viñedo en 1977 y en 2017 en Clavijo y Tudelilla. Como primer paso para elaborar la cartografía, se descargó la información disponible en la sede del catastro (<https://www.sedecatastro.gob.es>). Esta información, de tipo vectorial en formato *shapefile*, sirvió de base para determinar mediante técnicas de fotointerpretación las parcelas de viñedo. La información vectorial se modificó para ajustar los polígonos de las parcelas a la superficie cubierta por vid, ya que en algunos casos las parcelas cuentan con cultivos diferentes. Una vez identificadas todas las parcelas de interés, se exportó como una nueva capa vectorial, y se creó un campo en la tabla de atributos en el que se calculó la superficie de los polígonos (*Calculate Geometry*).

Para derivar la información de altitud y pendiente nos servimos del Modelo Digital del Terreno (MDT05) con paso de malla de 5 metros, disponible en el Centro de Descargas del Instituto Geográfico Nacional (<https://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas>). Los límites municipales de Tudelilla y Clavijo se obtuvieron de la Infraestructura de Datos Espaciales de La Rioja (IDE Rioja: [www.larioja.org](http://www.larioja.org)). Para ajustar el MDT05 a los límites municipales, se generó un buffer espacial de 200 metros con el perímetro de los municipios, y esa nueva capa sirvió para cortar el MDT. Posteriormente, se aplicó una paleta de color adecuada para la visualización de los sectores con mayor y menor altitud, medida sobre el nivel del mar.

Para conocer la altitud de las parcelas se optó por un proceso en varios pasos: (1) crear los centroides de cada parcela de viñedo – *Feature to point*, (2) superponer esta información con el modelo digital del terreno y extraer la información de la altitud en dichos centroides – *Extract Multivalued to points*, y (3) unir la información resultante con el archivo vectorial de las parcelas – *Join*.

Con el proceso descrito, se obtuvo una tabla de atributos de las parcelas de viñedo, con información sobre superficie y altitud en el centro de la parcela. La tabla de atributos constituyó la base de datos que puede exportarse en formato de texto para realizar los análisis y los gráficos oportunos.

### 2.2.3. Información sobre superficie de viñedo en regadío y sistema de conducción en La Rioja

La información sobre la evolución de la superficie de viñedo en La Rioja (periodo 1990-2018) se obtuvo del C.R. de la DOCa Rioja. Su distribución en secano y regadío, así como la información sobre la superficie reconvertida y reestructurada con subvención oficial para transformar la conducción de las cepas (periodo 2001-2015), se recopilaron del Registro Vitivinícola del Gobierno de La Rioja (RVGLR). Se trata de dos fuentes de información totalmente fiables, ya que se trabaja a escala de parcela y los técnicos del Gobierno de La Rioja comprueban en el campo la verosimilitud de la información.

## 3. Resultados

### 3.1. La distribución del viñedo en La Rioja Alta (1977-2017) en relación con las formas de relieve

La Tabla 1 incluye información sobre las formas de relieve en un sector de la Rioja Alta. El conjunto del área de estudio ocupa 517,2 Km<sup>2</sup>, donde dominan los glacis (170,3 Km<sup>2</sup>) y las terrazas aluviales (192,1 Km<sup>2</sup>), que constituyen formas de sedimentación muy favorables para el uso agrícola, al poseer suelos profundos, con frecuencia fértiles, de escasa pendiente, buen drenaje y abundancia de cantos rodados con matriz arenosa, cualidades muy positivas para el cultivo de viñedos (Tabla 1). Los cursos fluviales que recorren el área de estudio han generado un sistema de terrazas amplio, que incluye hasta 9 niveles. Los glacis, que ponen en contacto los bordes montañosos circundantes (Cordillera Cantábrica y Sistema Ibérico) con los fondos de valle, fueron originados por la acción erosiva de los cursos torrenciales no encauzados, que depositaron sus sedimentos en las zonas más deprimidas de los pies de la montaña. Presentan una pendiente relativamente suave (por debajo del 5%, generalmente), pudiendo identificarse en algunos sectores hasta 12 niveles (Galilea-Salvador, 2010). Algunos viñedos también ocupan otras formas de relieve: paleocanales, valles en cuna y vertientes regularizadas, mientras que el 28,4% del territorio, que hemos agrupado con el nombre genérico de dominios geológicos, no cuentan con viñedos (Tabla 1).

La Figura 2 muestra la distribución del viñedo en 1977 y en 2017 en la zona seleccionada de Rioja Alta. En los cuarenta años transcurridos entre ambas fechas, el viñedo se ha expandido de forma muy importante, pasando de ocupar 11.490 ha en 1977 (el 22,2% del área estudiada) a 18.961 ha en 2017 (el 36,6% del área estudiada), lo que representa un incremento del 65%. Todas las formas de relieve con viñedos han visto incrementada su superficie entre ambas fechas, si bien las terrazas medias y los glacis altos son las áreas que registraron un mayor incremento proporcional, con un 126% y 168,8%, respectivamente. En este sentido, es muy destacable el incremento que ha registrado el viñedo en los glacis altos: en 1977 ocupaba el 23,4% de la superficie cubierta por esta forma de relieve, y en 2017 el 63%. Esta evolución se observa también en los glacis medios, donde el viñedo ha pasado de ocupar el 38% en 1977 al 63,2% en 2017, en la Terraza 1, del 17,2% en 1977 al 28,6% en 2017, y en las terrazas bajas, del 22,7% en 1977 al 43,2% en 2017.



Tabla 1. Superficie ocupada por las formas de relieve en el sector estudiado de La Rioja Alta.

Formas de relieve	Superficie (Km <sup>2</sup> )	% sobre el total
<i>Formas con viñedos</i>		
Terrazas altas (6-9)	36	7
Terrazas medias (4-5)	23,4	4,5
Terrazas bajas (2-3)	58,6	11,3
Terraza holocena y lecho de inundación (1)	74,1	14,3
Glacis altos (6-12)	8,8	1,7
Glacis medios (4-5)	64,7	12,5
Glacis bajos (2-3)	71	13,7
Glacis y conos holocenos (1)	25,8	5
Paleocanales y valles en cuna	2,5	0,5
Vertientes regularizadas	4,2	0,8
Rills y badlands	1,2	0,2
<i>Formas sin viñedos</i>		
Dominios geológicos	146,9	28,4
Total	517,2	100

Elaboración propia a partir de Galilea-Salvador (2010).

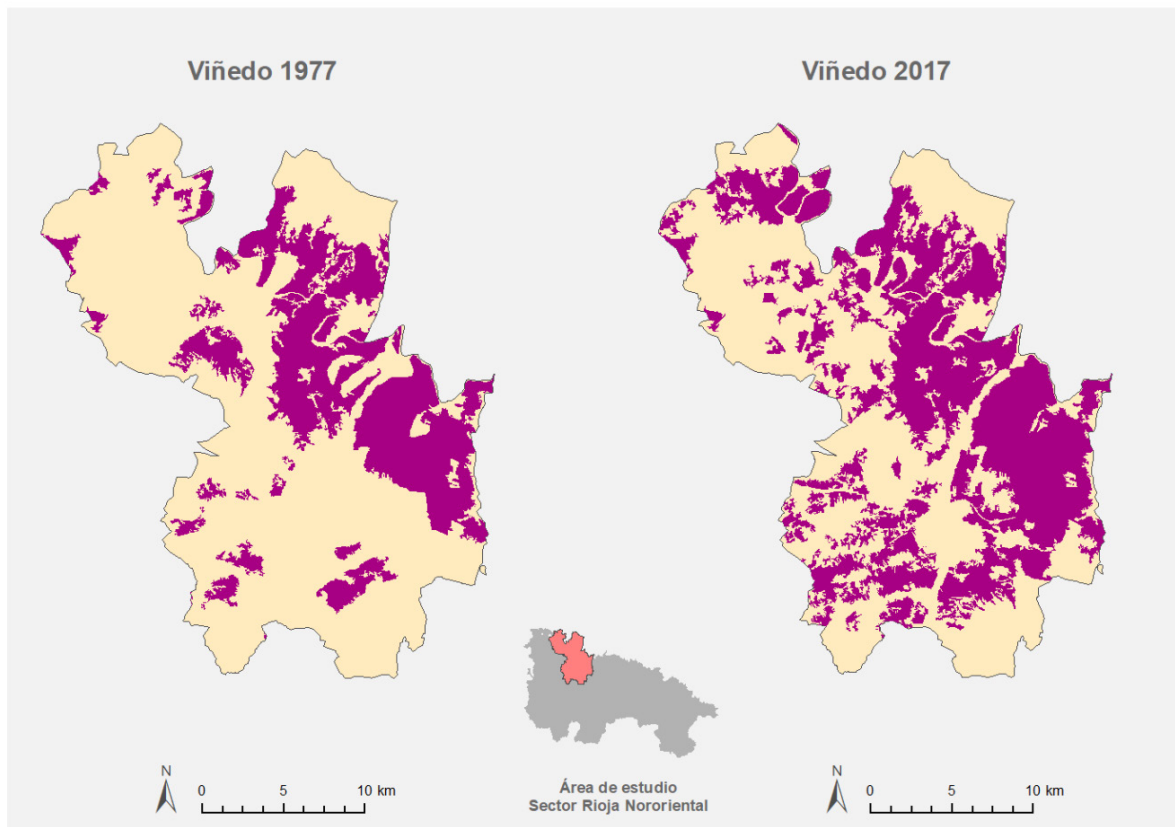


Figura 2. Cambios en la localización del viñedo en La Rioja Alta (1977-2017).

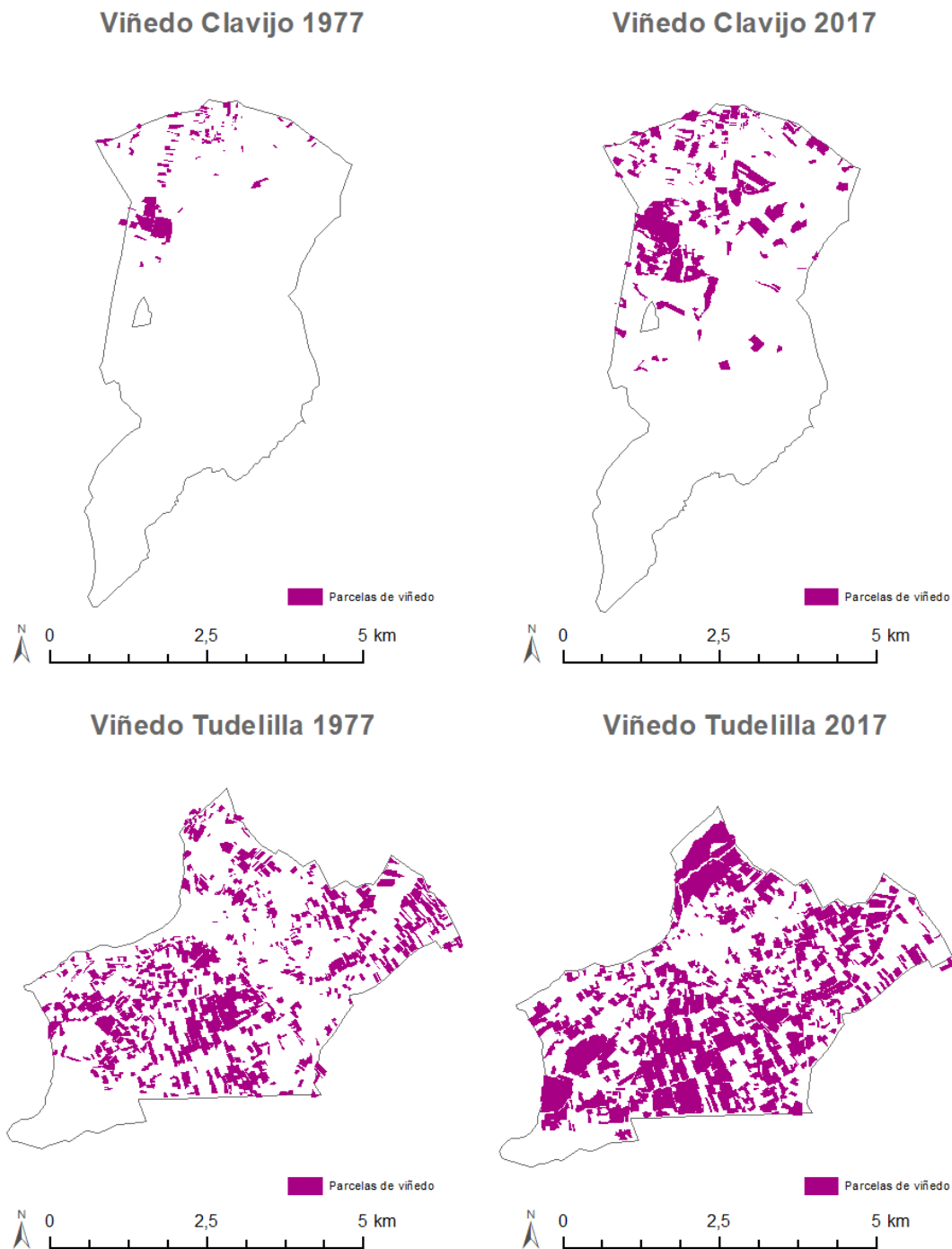
La Figura 3 recoge dos imágenes de viñedos junto al cauce del río Ebro. Tradicionalmente las terrazas y glacis bajos se dedicaron al cultivo de frutales, hortalizas, maíz, alfalfa, patatas y remolacha. Sin embargo, en las últimas décadas muchas de las huertas tradicionales han sido sustituidas por viñedos, aprovechando las infraestructuras de riego, al ser actualmente un cultivo más rentable que los anteriores.



Figura 3. Viñedos junto al río Ebro. a) San Asensio; b) El Cortijo.

### 3.2. El ascenso en altitud del viñedo en Clavijo y Tudelilla

La Figura 4 incluye la distribución del viñedo en los municipios de Clavijo y Tudelilla, en 1977 y en 2017. En Clavijo, el cultivo de la vid ocupaba muy poca extensión en 1977: 53 ha. En Tudelilla, por el contrario, el viñedo tenía mayor presencia, con 490 ha. Entre 1977 y 2017, los dos municipios registran la expansión del viñedo, alcanzando Clavijo 220 ha (se multiplica por cuatro respecto a 1977) y Tudelilla 800 ha (un incremento del 63%). Estos datos muestran cómo el viñedo se ha incrementado en Clavijo desde el 2,7% de su superficie en 1977 al 11,2% en 2017. Mientras tanto, en Tudelilla la ocupación del viñedo registra una evolución que va desde el 27,7% en 1977 al 42% en 2017.



*Figura 4. Localización del viñedo en Clavijo y Tudelilla (1977-2017).*

La expansión superficial del viñedo implica que en ambos municipios el viñedo ocupe más superficie, en cualquier rango de altitud, en 2017 que en 1977 (Fig. 5). No obstante, se observa que en 1977 en Clavijo no había viñedos por encima de los 650 m s.n.m., mientras que en 2017 los hay en 12 ha (el 5,45% de la superficie del viñedo). Por otro lado, es en el rango de 601 a los 650 ms.n.m. donde el incremento ha sido mayor, pasando de 24 ha a 88 ha, es decir, se ha visto multiplicado por 3,6. En Tudelilla, el viñedo por encima de 600 m s.n.m. ha pasado de representar el 21,4% en 1977 al 24,3% en 2017.

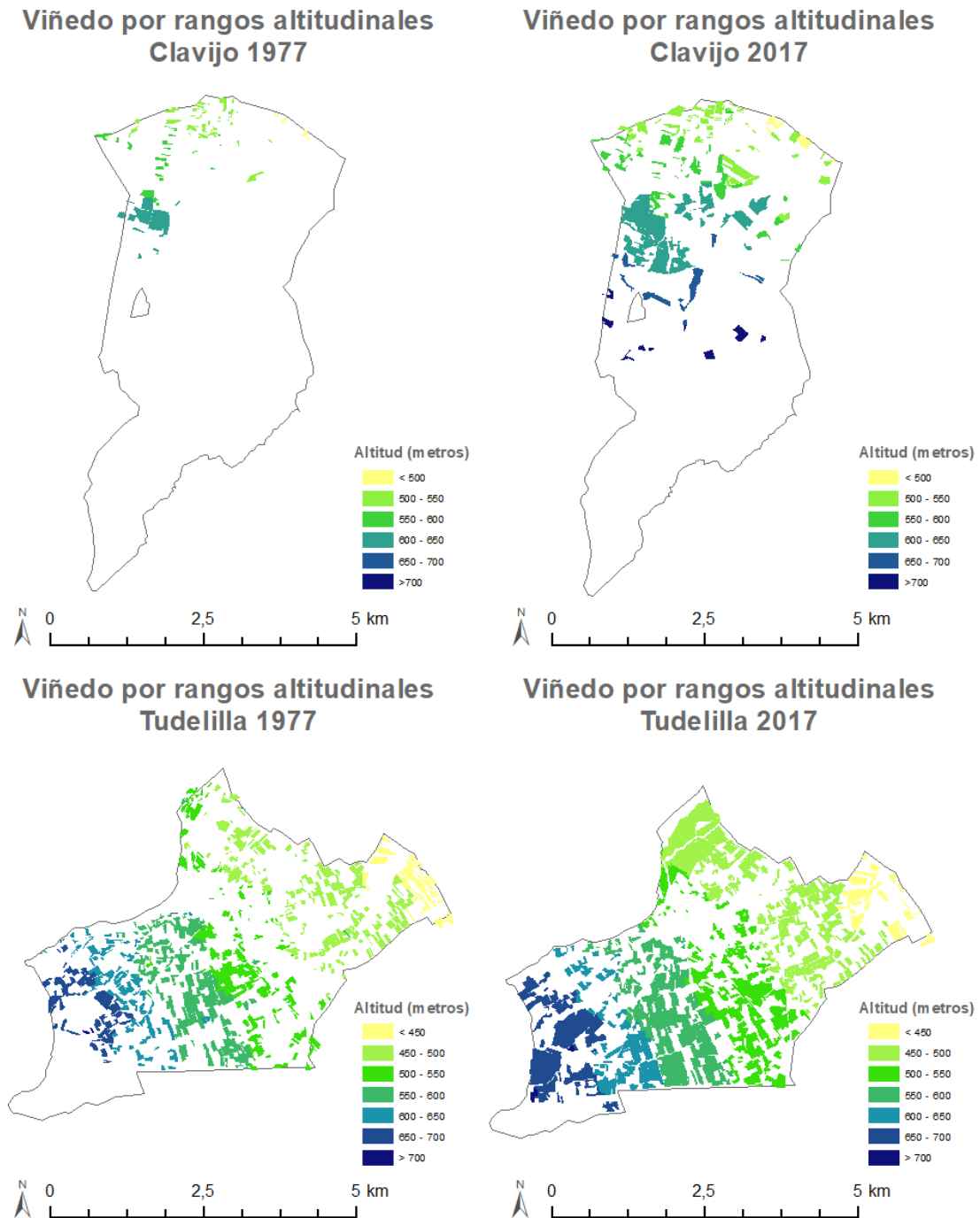


Figura 5. Superficie de viñedo por rangos altitudinales en Clavijo y Tudelilla (1977-2017).

La Figura 6 aporta dos imágenes de viñedos jóvenes plantados en cotas elevadas. La imagen 6a hace referencia a viñedos en Clavijo, donde una bodega ha recuperado campos abandonados cubiertos por matorrales (*Tymus vulgaris*, *Rosmarinus officinalis*, *Genista scorpius*, *Rosa sp.*, *Buxus sempervirens*, *Crataegus monogyna*, *Juniperus communis*,...) para llevar a cabo la plantación de vid. La recuperación trata de mantener el paisaje, conservando los bosquetes y árboles aislados en los márgenes de los campos (*Quercus ilex sp. Ballota* y *Quercus pyrenaica*, fundamentalmente), así como los antiguos bancales y los límites de los campos. El viñedo llega a alcanzar cotas superiores a los 850 m s.n.m. La imagen 6b corresponde a viñedos de altitud en Tudelilla. En este caso, se ha desmontado parcialmente un bosque de carrascas con suelos muy pedregosos para la plantación de los viñedos.





Figura 6. Viñedos de altitud. a) viñedos en antiguos campos abandonados en Clavijo. b) Viñedos entre carrascas en Tudelilla.

### 3.3. El incremento del viñedo en regadío en La Rioja

La Figura 7 revela que la superficie de viñedo en regadío se ha visto incrementada considerablemente en los últimos 28 años. Aunque el riego estuvo prohibido hasta 2003, las viñas no desaparecieron totalmente de los polígonos de regadío, si bien no se regaban, al menos legalmente hablando. En 1991, el viñedo en regadío ocupaba 1.319 ha (el 3,7% de la superficie total), iniciando un ascenso moderado hasta 2002 (4.060 ha). A partir de esta fecha, la superficie de viñedo en regadío se ha multiplicado por 3,5, hasta ocupar 14.324 ha en 2018 (el 30,3% de la superficie total), mientras que el de secano se contraía el 15,7%, pasando de 39.019 ha en 2003, a 32.836 ha en 2018. Estos cambios en la distribución espacial y en el manejo del riego del viñedo, han contribuido al incremento de los rendimientos y de la producción de uva. No obstante, la variabilidad interanual de la producción es elevada, circunstancia directamente ligada a la variabilidad climática (heladas, sequías, tormentas), que influye en la productividad y en el estado sanitario del viñedo. En el periodo 1990-2018, el rendimiento medio en regadío fue de 8.084 Kg de uva por hectárea, con un valor máximo de 11.362 kg/ha y un mínimo de 6.499 kg/ha, mientras que los rendimientos medios en secano fueron en el mismo periodo de 6.319 kg/ha, situándose en una horquilla de 9.562 kg/ha y 4.213 kg/ha, lo que representa un 22% menos que en regadío.

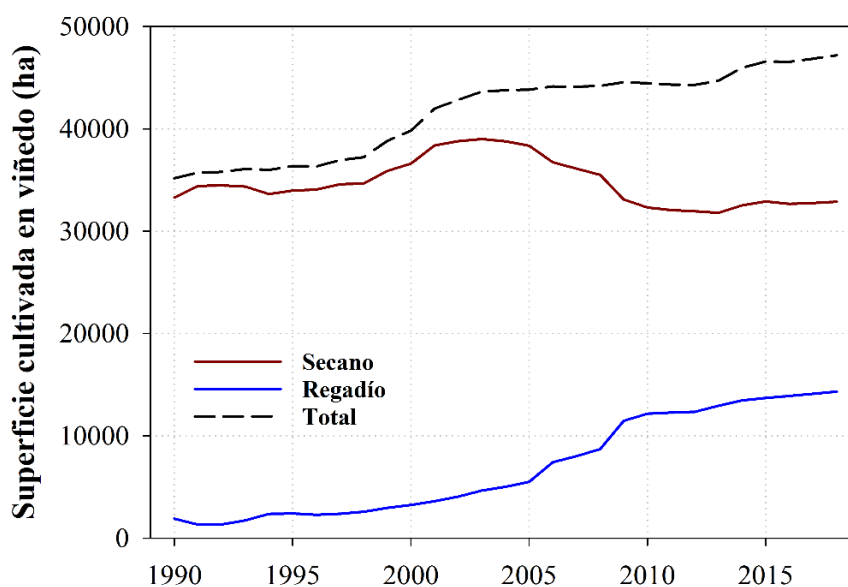


Figura 7. Distribución del viñedo en secano y regadío en La Rioja (1990-2018).

### 3.4. Modificaciones en el sistema de conducción: El incremento del viñedo en espaldera

Se considera que el sistema de conducción del viñedo es un agente modulador del bioclima de la cepa, habida cuenta de su influencia en el microclima de la cepa y en su fisiología. El sistema de conducción engloba, en sentido amplio, la densidad de plantación, el marco de plantación, la altura del tronco, la distribución de la vegetación anual, el tipo de poda, la carga y su distribución, así como el conjunto de operaciones en verde. De todos estos aspectos, el cambio reciente de mayor relieve registrado en la DOCa Rioja tiene que ver con el sistema de conducción, con una evolución de las formas libres a las apoyadas. Hasta finales del pasado siglo, la mayor parte de los viñedos se cultivaban con el sistema de conducción en vaso. Sin embargo, desde el año 2000, las nuevas plantaciones se dirigen a espaldera. Incluso, ha sido frecuente la transformación de cepas conducidas en vaso a la espaldera. Entre 2000 y 2015, la superficie transformada con ayudas públicas fue de 12.065 ha (el 28,8% del viñedo de La Rioja), lo que supuso una subvención total de más de 66 millones de euros. A esta superficie hay que añadir el viñedo transformado por los viticultores con financiación propia, estimándose que más del 50% del viñedo de La Rioja se cultiva en la actualidad en espaldera (RVGLR, 2016; Lasanta *et al.*, 2016).

La Figura 8a muestra un viñedo joven conducido en espaldera y con riego localizado. Muchas parcelas cultivadas tradicionalmente con frutales, localizadas en glacis y terrazas bajas, se cultivan hoy con viñedo. En su caso, el riego tradicional se aplicaba por gravedad, con todos los inconvenientes que esta modalidad de riego conlleva. Actualmente, una parte importante del viñedo riojano utiliza el riego localizado, apoyándose para ello en la estructura de postes y alambres que conducen la cepa. La Figura 8b corresponde a un viñedo antiguo, localizado en un glacis medio, conducido antes en vaso y ahora en espaldera, al que se le ha dotado recientemente de riego.



Figura 8. Ejemplos de cambios en la conducción del viñedo como medidas de adaptación al cambio climático.



El uso del riego y la implantación del viñedo en suelos muy fértiles (terrazas y glacis bajos) implica un elevado desarrollo vegetativo de las cepas, del crecimiento de la masa foliar y de la productividad del viñedo, asociado por lo general a una mayor carga y, por tanto, de un mayor número de racimos, más pesados y con bayas de mayor volumen, lo que sin duda representa una amenaza potencial para la calidad de la uva, y supone un mayor riesgo de ataque de enfermedades. Ante esta tesitura, el viticultor trata de superar tales inconvenientes jugando adecuadamente con los factores que determinan el sistema de conducción en su conjunto (Fig. 8a y b), decantándose progresivamente por la conducción en espaldera, viéndose más limitado el uso del tradicional en vaso (Fig. 8c). Con esta decisión, el viticultor habrá de elegir razonablemente la estructura de la espaldera y realizar un manejo de la vegetación que le permita acceder a un adecuado microclima de hojas y racimos. En algunos viñedos se busca una mejora del microclima con la eliminación tardía de las hojas basales, ya senescentes, para incrementar la insolación, si bien controlando que no se produzca una sobreexplotación de los racimos (Fig. 8d).

Por otro lado, y sobre todo en suelos fértiles, cada vez es mayor el número de viñedos en los que se emplea una cubierta vegetal (sembrada o espontánea), como alternativa al laboreo tradicional (Fig. 9). No obstante, entre las consecuencias de la cubierta vegetal se incluye la competencia con las cepas por el agua y los nutrientes, especialmente por el nitrógeno, reduciendo su disponibilidad, el vigor y la superficie foliar total y expuesta de la planta, lo que afecta a la capacidad fotosintética y a la composición y calidad de la uva (Martín *et al.*, 2018).



*Figura 9. Imágenes de viñedos con cubierta vegetal.*

#### 4. Discusión

El incremento de las temperaturas y el estrés hídrico, derivados del cambio climático, influyen de forma determinante en el desarrollo y actividad de la vid: menor rendimiento, contención del crecimiento vegetativo y de la superficie foliar, así como en la activación de procesos de senescencia prematura de las hojas. Por otro lado, se modifica la actividad fisiológica dando lugar a un incremento de la respiración y a la disminución de la fotosíntesis, como consecuencia del aumento de la evapotranspiración y del estrés hídrico. Todo ello contribuye a crear un microclima de la cepa desfavorable para la calidad de la uva (color, aroma, azúcares, acidez...), por el exceso de exposición de los racimos a los rayos solares (Iglesias *et al.*, 2010; Ramos, 2017; García-Escudero, 2018). Por lo tanto, la calidad de la uva y del vino pueden verse comprometidos, afectando especialmente al atributo de tipicidad, ligado al *Terroir* y, consecuentemente, al mercado del vino (van Leeuwen y Seguin, 2006; Bernetti *et al.*, 2012; Mozell y Thach, 2014; Delay *et al.*, 2015).

Para combatir los efectos del CC en la vid, los viticultores de diferentes regiones del mundo están poniendo en marcha distintas medidas de adaptación. Parte de la estrategia a seguir pasa por cambios en el material vegetal (portainjertos, variedades de uva y clones) y en los sistemas de conducción de la cepa, con medidas tales como la elevación de la altura del tronco, el mantenimiento de una adecuada relación entre el área de la hojas y la carga de cosecha o el retraso del momento de la poda..., todo ello con el fin de que no se adelante o se acorte la fenología de la vid y que la cosecha de la uva se realice en el periodo óptimo de maduración para cada entorno vitícola, lo que se sitúa con frecuencia a finales de septiembre o principios de octubre en la cuenca mediterránea. Si se adelanta la fecha de la vendimia, para evitar un grado alcohólico elevado y disminuir la acidez, se corre el riesgo de no alcanzar niveles suficientes de color y aroma. Si, por el contrario, se retrasa la vendimia es muy posible que haya un exceso de azúcar (alto grado alcohólico del vino) y escasa acidez (problemas para envejecer el vino). Además, es muy probable que se incrementen los problemas fitosanitarios de la uva (García-Escudero, 2018).

Contra la sequía, se trata de luchar utilizando material vegetal más resistente o tolerante al déficit hídrico y con mayor eficiencia en el uso del agua, disminuyendo en su caso la densidad de cepas, trasladando los viñedos a suelos con mayor capacidad de retención de agua y con posibilidades de riego. Frente a la mayor radiación solar y a los riesgos de sobreexposición, se busca que la cepa ofrezca mayor protección de las hojas y de los racimos, incrementando su densidad (manteniéndose a la vez porosa), cambiando la exposición de las cepas y, por lo general, con una buena gestión en conjunto de los sistemas de conducción (van Leeuwen y Destrac-Irvine, 2017; van Leeuwen *et al.*, 2019; Del Pozo *et al.*, 2019).

Los efectos acumulativos de las adaptaciones señaladas pueden ser suficientes hasta mediados del siglo XXI (Brison y Levraut, 2010), pero a partir de la segunda mitad del siglo XXI es posible que se requieran cambios más profundos, como la introducción de variedades no locales y buscar nuevas áreas para el viñedo que retrasen la maduración (van Leeuwen y Destrac-Irvine, 2017). Ello puede llevar a la aparición de nuevas regiones vitícolas, mientras que las actuales, incluso las que podríamos considerar históricas, podrían volverse inadecuadas (Fraga *et al.*, 2016b). Jones *et al.* (2005) estudiaron veintisiete regiones vinícolas de alta calidad, comprobando un aumento de las temperaturas de 1,3°C en invierno y de 1,4°C en verano desde 1950. Por otro lado, los escenarios de CC indican que las regiones vitivinícolas se deberán extender hacia los polos y hacia altitudes más elevadas, para intentar mantener las actuales características de sus vinos (Moriondo *et al.*, 2013; Irimia *et al.*, 2018). Investigaciones recientes señalan que las zonas vitícolas se desplazarán de 150 a 300 km hacia el polo para 2049, y unos 12 a 25 Km más para 2099, en un escenario medio de emisiones de gases efecto invernadero (Mills-Novoa *et al.*, 2016). Hannah *et al.* (2013) señalan que en las cinco regiones más importantes en producción de vino, el área adecuada para producir vino de calidad se reducirá entre el 25% y el 73% para 2050. En regiones vitivinícolas en las que las restricciones de cultivo y de elaboración de vino son



importantes, como es el caso de la estricta reglamentación de la DOCa Rioja, mantener la calidad y especificidad del vino no será tarea sencilla si las condiciones ambientales cambian.

Frente al escenario del cambio climático, los viticultores de la DOCa Rioja en su momento tendrán, si cabe, la opción de adaptarse cambiando la localización de los viñedos, el sistema de conducción de la cepa y utilizando el riego entre otras medidas paliativas que puedan garantizar unas vendimias similares. En este trabajo, hemos comprobado que los viticultores siguen principalmente dos estrategias, en función de los condicionantes ambientales locales. Con el objetivo de cambiar la localización del viñedo: i) desplazar viñedos hacia zonas de regadío, y ii) ubicarlos a mayor altitud. En el sector estudiado de la Rioja Alta, el viñedo ocupaba 2.605 ha en las terrazas 1, 2 y 3 en 1977, mientras que lo hacía con 4.652 ha en 2017, es decir, un incremento del 78,6%. Llama la atención la expansión incluso en la terraza 1 (1.277 ha en 1977 y 2.122 ha en 2017), donde los viñedos están expuestos a inundaciones periódicas y a una humedad edáfica elevada, de forma permanente. Es en las terrazas bajas y glacis bajos donde el viñedo aprovecha las infraestructuras de riego. De hecho, en La Rioja este tipo de viñedo ha pasado de ocupar 1.893 ha a 14.324 ha entre 1990 y 2018, para asegurar las producciones y mitigar el estrés hídrico. Galilea *et al.* (2015) señalan que el mayor atractivo económico del viñedo en las últimas décadas ha supuesto que muchos viñedos se hayan instalado en áreas de regadío, utilizando suelos muy fértiles, ocupados anteriormente por frutales, hortalizas, maíz y alfalfa, haciendo que estos cultivos experimenten un fuerte retroceso desde los años ochenta del pasado siglo (Lasanta, 2010), por lo que han dejado de ser la base económica de muchas explotaciones. Sin embargo, en el actual contexto de CC, el riego del viñedo comienza a ser necesario para estabilizar el rendimiento y mantener el vino de calidad (Fraga *et al.*, 2018; Wenter *et al.*, 2018).

Sin embargo, la expansión por tierras fértiles y de regadío plantea algunos problemas, como el mayor riesgo de heladas en días con inversión térmica, el incremento de la productividad por unidad de superficie, con una posible pérdida de la calidad de la uva, un mayor desarrollo vegetativo, induciendo una mayor densidad de vegetación en la cepa, lo que favorece la aparición de enfermedades, que a su vez exigen tratamientos fitosanitarios más frecuentes, y compromete la maduración de la uva (Teixeira *et al.*, 2013; Ponti *et al.*, 2018; Sgubin *et al.*, 2018; Carroquino *et al.*, 2020). Los inconvenientes planteados por el cultivo del viñedo en suelos fértiles y de regadío trata de superarlos el viticultor con la elección del sistema de conducción del viñedo más adecuado, destacando como ya se ha indicado una tendencia a la conducción en espaldera, donde busca aunar ventajas culturales, calidad y adaptación al CC. Con financiación privada o pública, más del 50% del viñedo de La Rioja se cultiva en la actualidad mediante el sistema en espaldera, mientras que antes del año 2000 la mayoría del viñedo se disponía en vaso. Con la espaldera se busca, además de un incremento de la producción y de un mayor rendimiento económico, mecanizar determinados trabajos de cultivo, procurar modular el microclima de la cepa, mejorando una adecuada recepción de la radiación solar, lo que contribuye a la maduración y mejora de la calidad de la uva (van Leeuwen y Darriet, 2016). Sin embargo, algunos autores sostienen que es más eficaz la poda en vaso (*gobelet*) que la conducción en espaldera para combatir la sequía, ya que la poda en vaso favorece una superficie de hoja moderadamente baja, lo que reduce la transpiración de la vid (Santesteban *et al.*, 2017; van Leeuwen y Destrac-Irvine, 2017).

Por otro lado, el laboreo tradicional del suelo se está sustituyendo por el cultivo con cubierta vegetal (natural o sembrada) en las calles, incluso a nivel de la fila. Con ello, el viticultor trata de limitar el crecimiento de las vides, que resulta excesivo en muchos nuevos viñedos plantados en suelos fértiles, como los de las terrazas y glacis bajos. La cubierta vegetal tiene, además, otras ventajas desde una perspectiva de agricultura sostenible: disminuye la erosión del suelo y la transferencia de agroquímicos a las aguas, e incrementa la captura de CO<sub>2</sub> y la biodiversidad (Lasanta y Sobrón, 1988; Biddoccu *et al.*, 2015). Además, las cubiertas vegetales contribuyen a mejorar las interacciones de la agricultura con el medio ambiente, limitando el uso de herbicidas y plaguicidas, compitiendo por los nutrientes con el viñedo, mejorando la estructura del suelo y el contenido de materia orgánica, a la vez que mejora el color de los vinos (Ibáñez-Pascual *et al.*, 2011; Martín *et al.*, 2018). Desde una perspectiva paisajística contribuye en primavera a aumentar los contrastes con los viñedos próximos, cuando el verde de las

herbáceas alterna con el marrón o los colores rojizos de la tierra arada (Lasanta y Ruiz-Flaño, 2014). De cualquier modo, es importante el manejo racional de las cubiertas vegetales, jugando con su intensidad de cobertura, con las especies que la conforman y con su temporalidad, para así no impactar negativamente en el desarrollo normal del cultivo (Martín *et al.*, 2018).

Otros viñedos, por el contrario, se han desplazado hacia los glaciares medios y altos. Concretamente, 4.644 ha en 2017 frente a 2.665 ha en 1977 en La Rioja Alta, buscando los beneficios de la altitud y poner más terrenos en explotación en un periodo de expansión de la vid. En este sentido, en Clavijo y Tudelilla los viñedos más altos no superaban los 600 m s.n.m. de altitud en 1977, mientras que en 2017 llegan a cotas próximas a los 900 m. El desplazamiento hacia espacios más elevados implica volver a cultivar viñedos en áreas vitícolas tradicionales, cuando el vino era un producto alimenticio más, y cuando se reservaba para el viñedo los terrenos más pobres, donde otros cultivos más exigentes encontraban serias limitaciones, bien por ausencia de agua, o bien por pendientes elevadas o presencia de abundantes piedras (Arnáez *et al.*, 2006). Galilea *et al.* (2015) señalan que el 15% del viñedo, del sector de La Rioja Alta considerado en este trabajo, ya se cultivaba por encima de los 600 m s.n.m. de altitud en 1956. La plantación de viñedos en cotas altas se ha convertido en un aval de calidad y en una respuesta al CC, con el fin de evitar el adelanto de la maduración, los niveles elevados de alcohol y la disminución de la acidez, características con las que los vinos pierden frescura y capacidad de envejecimiento (Teixeira *et al.*, 2013; Carroquino *et al.*, 2020). Por otro lado, los viñedos sufren menos estrés térmico e hídrico, un menor acoso de enfermedades y plagas y la maduración de la uva es más pausada (Jones, 2006; Ramos, 2017). Los viñedos en altitud dan lugar a vinos con menos graduación, mayor carga aromática, color más estable y mayor acidez, que los posiciona más cerca de los vinos tradicionales de calidad, con tipicidad propia ligada a un determinado *Terroir*, a partir de lo cual entrarían en un nicho determinado de mercado (van Leeuwen y Seguin, 2006; Hinnewinkel, 2010; Delay *et al.*, 2015).

Hasta muy recientemente, se consideraba que las áreas de montaña presentaban fuertes desventajas para el cultivo del viñedo, por sus limitaciones ambientales (heladas tardías, tormentas frecuentes, laderas muy pendientes, ciclos insuficientes...). Sin embargo, en el actual contexto de cambio climático es obligado preguntarse si será la montaña mediterránea una solución de adaptación de la viticultura para producir uva de calidad. En este sentido, Vigl *et al.* (2018) señalan que algunas regiones de los Alpes se consideran cada vez más como una solución prometedora para el cultivo de viñedos. Delay *et al.* (2015) sugieren que la montaña puede ser un activo para que el viñedo se adapte al cambio climático, ya que, junto a la complejidad local de ambientes, capaz de acoger una amplia gama de variedades, se suma el menor estrés térmico que el registrado en altitudes más bajas. La viticultura podría ser, además, una alternativa económica en zonas de media montaña mediterránea, que se añadiría a las pocas vías de futuro que hay en la actualidad (ganadería extensiva y producción de madera), dadas sus escasas aptitudes para actividades industriales y turísticas frente a las montañas alpinas (Conti & Fagarazzi, 2005; Sancho-Reinoso, 2013; Lasanta *et al.*, 2019).

No obstante, hay algunas cuestiones a considerar: i) los modelos climáticos pronostican una fuerte variabilidad interanual y eventos extremos más frecuentes, cuestiones que probablemente sean más acusadas en áreas de montaña (Caffarra y Eccell, 2011; Sherreret *et al.*, 2016; Vigl *et al.*, 2018; Wenter *et al.*, 2018); y ii) la conservación del suelo y su manejo es un parámetro importante para la sostenibilidad de los viñedos, ya que es el uso agrícola que causa mayor pérdida de suelo (Tropeano, 1984; Tarolli *et al.*, 2015; Galilea Salvador, 2015). Por ello, es esencial aplicar medidas de conservación del suelo y del agua, entre las que destaca el cultivo en terrazas, ya que éstas favorecen la infiltración, disminuyen la escorrentía y la erosión del suelo (Cots-Folch *et al.*, 2006, 2009; Tarolli *et al.*, 2015; Arnáez *et al.*, 2015; Rodrigo-Comino, 2018). En uno de los municipios estudiados (Clavijo), se aprovechan antiguos bancales para la instalación de los nuevos viñedos, manteniéndose además las encinas en los márgenes de los campos y los pequeños bosquetes próximos. Los viticultores deben, por tanto, tener en cuenta estas limitaciones ambientales de la montaña, además de considerar las exigencias del mercado y las expectativas del consumidor por productos específicos y de fuerte tipicidad. En

cualquier caso, en la DOCa Rioja esta posibilidad no existe en la actualidad, ya que la montaña queda excluida de las áreas amparadas bajo dicha denominación. En este sentido, la iniciativa privada está tratando de ampliar la delimitación de la DOCa Rioja, o bien que se les permita establecer otro sello o marca de calidad.

## **5. Conclusiones**

Este trabajo intenta proporcionar información sobre estrategias adecuadas que los viticultores de la DOCa Rioja pueden desarrollar para adaptarse al cambio climático, mitigando los efectos en las vides del aumento de las temperaturas y de los periodos de sequía. Se ha señalado que en la Rioja Alta el viñedo se ha expandido entre 1977 y 2017 por todas las formas de relieve, al tratarse de un cultivo económicamente muy rentable en las últimas décadas, y por su buena aceptación en mercados exigentes en vinos de elevada calidad. En este contexto, los glacis altos y las terrazas bajas, incluida la T1, registran incrementos notables en la superficie ocupada por viñedos. En los glacis altos, los nuevos viñedos buscan las ventajas bioclimáticas que proporciona su mayor altitud respecto a otras formas de relieve. Hacia las terrazas bajas se han desplazado los viñedos buscando las infraestructuras de riego, que hasta los años ochenta se utilizaron para el cultivo de frutales y hortalizas. Lo cierto es que la superficie de viñedo en regadío se ha multiplicado por 3,5 en La Rioja entre 2003 y 2018, mientras que en secano se contraía el 15,7% entre ambas fechas. En los municipios de piedemonte estudiados (Clavijo y Tudelilla), los nuevos viñedos ascienden en altitud, superando los 700 m s.n.m., una cota impensable hace tres décadas. Por otro lado, los cambios también se han dirigido hacia el sistema de conducción, sustituyendo progresivamente el sistema en espaldera al de vaso. Antes del año 2000, casi todo el viñedo de la DOCa Rioja se conducía en vaso, mientras que en la actualidad se estima que más del 50% se dirige en espaldera. Con ello, y estableciendo actuaciones que mejoren el microclima de hojas y racimos, se puede alcanzar una correcta maduración de la uva, se reducen costes de cultivo, y se facilitan y mejoran muchas faenas de cultivo, así como las aplicaciones fitosanitarias.

Los cambios señalados en el cultivo del viñedo deben hacernos reflexionar sobre los límites o conceptos agronómicos que se asumían como inmutables, considerando cuáles tienen vigencia hoy y/o tendrán en el futuro. Los nuevos escenarios, como consecuencia del CC, están dando lugar a nuevos retos a los que el viticultor, el agrónomo y el enólogo deben enfrentarse. Para ello, ha de pensarse en soluciones como la búsqueda de material vegetal adaptado, diferentes sistemas de cultivo, u opciones, como las señaladas en este trabajo: los cambios de localización del viñedo (plantación en altitud y en suelos de regadío) para evitar el estrés hídrico y térmico, y los cambios de conducción. Del mismo modo, debe contemplarse la modificación o flexibilización de la normativa vitivinícola, que permita el encaje de soluciones que en estos momentos no se contemplan. En este sentido, la reglamentación de la DOCa Rioja, por lo general muy estricta y comprometida con la calidad, puede plantearse de cara al futuro la introducción de nuevos materiales vegetales, ya sean nuevas variedades o clones de variedades ya autorizadas, así como la apertura a nuevas localizaciones del viñedo.

La capacidad de los productores para adaptarse a un clima cambiante es limitada por las circunstancias sociales, económicas y políticas, incluyendo el capital económico, la educación, los arreglos institucionales y las capacidades de organización. Es necesario abordar estas circunstancias para que los productores se adapten eficazmente en el futuro.

## **Agradecimientos**

Este trabajo ha contado con el apoyo financiero del proyecto LIFE MIDMACC (LIFE18 CCA/ES/001099), financiado por la Unión Europea, y MANMOUNT (PID2019-105983RB-I00/AEI/10.13039/501100011033), financiado por la Agencia Estatal de Investigación. Ha contado, además, con la ayuda del grupo de investigación “Procesos Geoambientales y Cambio Global”

(E02\_17R), financiado por el Gobierno de Aragón y la Fundación Social Europea. Agradecemos también las enseñanzas recibidas y la ayuda permanente de Rubén Sáenz (Depadre, viñedos de montaña S.L), Aritz Espinosa y Luis Ángel García (Bodegas Vivanco).

## Referencias

- Albisu, L.M. 2014. Reflexiones en torno a la dinámica innovadora del sector del vino. *Cuadernos de Estudios Agroalimentarios* 6, 141-152.
- Arnáez, J., Ortigosa, L.M., Ruiz-Flaño, P., Lasanta, T. 2006. Distribución espacial del viñedo en la Comunidad Autónoma de La Rioja: influencia de la topografía y las formas de relieve. *Polígonos. Revista de Geografía* 16, 11-34. <https://doi.org/10.18002/pol.v0i16.409>
- Arnáez, J., Lana-Renault, N., Lasanta, T., Ruiz-Flaño, P., Castroviejo, J. 2015. Effects of farming terraces on hydrological and geomorphological processes. A review. *Catena* 128, 122-134. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.01.021>
- Barco Royo, E. 2018. *Análisis de un sector: Rioja 4.0*. Gobierno de La Rioja, Logroño, 443 pp.
- Bernetti, I., Menghini, S., Marinelli, N., Sacchelli, S., Alampi Sottini, V. 2012. Assessment of climate change impact on viticulture: economic evaluations and adaptation strategies analysis for the Tuscan wine sector. *Wine Economics and Policy* 1, 73-86. <http://doi.org/10.1016/j.wep.2012.11.002>
- Biasi, R., Brunori, E., Ferrara, C., Salvati, L. 2019. Assessing impacts of climate change on phenology and quality traits of *Vitis vinifera* L.: The contribution of local Knowledge. *Plants* 8, 121. <https://doi.org/10.3390/plants8050121>
- Biddoccu, M., Ferraris, E., Opsi, F., Cavallo, E. 2015. Effects of soil management on long-term runoff and soil erosion rates in sloping vineyards. In: G. Lollino, A. Manconi, J. Clague, W. Shan, M. Chiarle (Eds.), *Engineering Geology for Society and Territory*. Springer, Cham, vol. 1, pp. 159-163. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-09300-0\\_30](https://doi.org/10.1007/978-3-319-09300-0_30)
- Brison, N., Levraut, F. 2010. *Le Livre Vert du projet CLIMATOR*. Ademe, 334 pp.
- Burge, M., Hsiang, S.M., Miguel, E. 2015. Global non-linear effect of temperature on economic production. *Nature* 527, 235-239. <https://doi.org/10.1038/nature15725>
- Caffarra, A., Eccel, E. 2011. Projecting the impacts of climate change on the phenology of grapevine in a mountain area. *Australian Journal Grape Wine Research* 17, 52-61. <http://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2010.00118.X>
- Carroquino, J., García-Casarejos, N., Gargallo, P. 2020. Classification of Spanish wineries according to their adoption of measures against climate change. *Journal of Clearer Production* 244, 118874. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118874>
- Constantini, E.A.C., Lorenzetti, R., Malorgio, G. 2016. A multivariate approach for the study of environmental drivers of wine economic structure. *Land Use Policy* 57, 53-63. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2016.05.015>
- Conti, G., Fagarazzi, L. 2005. Forest expansion in mountain ecosystems: “environmentalist’s dream” or societal nightmare? *Planum* 11, 1-20.
- Cots-Folch, R., Martínez-Casasnovas, J.A., Ramos, M.C. 2006. Land terracing for new vineyard plantations in the north-western Spanish Mediterranean region: landscape effects of the EU Council Regulation policy for vineyards’ restructuring. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 115, 88-96. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.11.030>
- Cots-Folch, R., Martínez-Casasnovas, J.A., Ramos, M.C. 2009. Agricultural trajectories in a Mediterranean mountain region (Priorat, NE Spain) as a consequence of vineyard conversion plants. *Land Degradation and Development* 20, 1-13. <https://doi.org/10.1002/ldr.856>
- C.R. de la DOCa Rioja, 2019. *Estadísticas 2018. El Rioja en cifras*. [www.riojawine.com](http://www.riojawine.com)

- Cuadrat, J.M., Vicente-Serrano, S.M. 2008. Características espaciales del clima en La Rioja modelizadas a partir de Sistemas de Información Geográfica y técnicas de regresión espacial. *Zubía. Monográfico* 20, 119-142.
- Delay, E., Piou, C., Querol, H. 2015. The mountain environment, a driver for adaptation to climate change. *Land Use Policy* 48, 51-62. <http://doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.05.08>
- De Luis, M., González-Hidalgo, J.C., Longares, L.A., Stepanék, P. 2009. Seasonal precipitation trends in the Mediterranean Iberian Peninsula in second half of 20<sup>th</sup> century. *International Journal of Climatology* 29, 1312-1323. <http://doi.org/10.1002/joc.1778>.
- Del Pozo, A., Brund-Saldías, N., Engler, A., Ortega-Farías, S., Acevedo-Opazo, C., Lobos, G.A., Jara-Rojas, R., Molina-Montenegro, M.A. 2019. Climate change impacts and adaptation strategies of agriculture climate regions (MCRs). *Sustainability* 11, 2769. <https://doi.org/10.3390/su11102769>
- Domínguez-Castro, F., Vicente-Serrano, S.M., Tomás-Burguera, M., Peña-Gallardo, M., Beguería, S., El Kenawi, A., Luna, Y., Morata, A. 2019. High spatial resolution climatology of drought events for Spain: 1961-2014. *Journal of Climatology* 39, 5046-5062. <https://doi.org/10.1002/joc.6126>
- Fraga, H., Santos, J.A., Moutinho-Pereira, J., Carlos, C., Silvestre, J., Eiras-Dias, J., Mota, T., Marheiro, A.C. 2016a. Statistical modelling on grapevine phenology in Portuguese wine regions: observed trends and climate change projection. *Journal Agriculture Science* 154(5), 795-816. <https://doi.org/10.1017/S0021859615000933>
- Fraga, H., García de Cortazar Atauri, I., Malheiro, A.C., Santos, J.A. 2016b. Modelling climate change impacts on viticultural yield, phenology and stress conditions in Europe. *Global Change Biology* 22, 3774-3788. <https://doi.org/10.1111/gcb.13382>
- Fraga, H., García de Cortazar Atauri, I., Santos, J.A. 2018. Viticultural irrigations demands under climate change scenarios in Portugal. *Agricultural Water Management* 196, 66-74. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.10.023>
- Galilea, I., Arnáez, J., Lasanta, T., Ortigosa, L. 2015. Evolución y desfragmentación del paisaje del viñedo en La Rioja Alta (España) en el periodo 1956-2000. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles* 69, 315-331. <https://doi.org/10.21138/10.21138/bage.1899>
- Galilea Salvador, I. 2010. *Evolución del paisaje del viñedo en el sector nororiental de La Rioja Alta (1956-2000)*. Universidad de La Rioja, 137 pp.
- Galilea-Salvador, I. 2015. *Erosión de suelos y laderas en el espacio agrícola de La Rioja. Aplicación y cartografía del modelo RUSLE*. Tesis Doctoral, Universidad de La Rioja, 405 pp., Logroño.
- García-Escudero, E. 2018. Consideraciones sobre el cambio climático y la viticultura. *Vida Rural* 449, 38-44.
- García-Ruiz, J.M., López-Moreno, J.I., Vicente-Serrano, S., Lasanta, T., Beguería, S. 2011. Mediterranean water resources in a Global Change scenario. *Earth Science Reviews* 105 (3-4), 121-139. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2011.01.006>
- García-Valdecasas Ojeda, M., Yeste, P., Gámiz-Fortis, S.R., Castro-Díez, Y., Esteban-Parra, M.J. 2020. Future changes in land and atmospheric variables: An analysis of their couplings in the Iberian Peninsula. *Science of the Total Environment* 722, 137902. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137902>
- Gobierno de La Rioja. 2020. Estadística Agraria Regional, 2017. Gobierno de La Rioja, 118 pp., Logroño. [www.larioja.org](http://www.larioja.org)
- Gómez Miguel, V. 2006. Mapa de unidades taxonómicas principales de la denominación de origen calificada La Rioja (escala 1:50.000). *Atlas Nacional de España: geología, geomorfología y edafología* (Sánchez-Ortiz Rodríguez, M.P., Coord.). Centro Nacional de Información Geográfica, 195 pp., Madrid.
- Gonzalo Moreno, A.N. 1981. *El relieve de La Rioja. Análisis de Geomorfología estructural*. Instituto de Estudios Riojanos, 2 vols., Logroño.
- Hannah, L., Roehrdanz, P., Ikegami, M., Shepherd, A.V., Shaw, M.R., Tabor, G., Xhi, L., Marquet, P., Hijmans, R. 2013. Climate change, wine, and conservation. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 110 (17), 6907-12. <https://doi.org/10.1073/pnas.1210127110>

- Hinnewinkel, J.C. 2010. *Faire vivre le terroir*. Centre d' Études et de Recherche sur la Vigne et le Vin - Université de Bordeaux, 231 pp.
- Ibáñez-Pascual, S., Pérez, J.L., Peregrina, F., Chávarri, J.B., García-Escudero, E. 2011. Cubierta vegetal en viñedo. Un sistema de mantenimiento del suelo capaz de mejorar el color de los vinos. *Cuaderno de Campo* 47, 30-34.
- Iglesias, A., Mougou, R., Moneo, M. 2011. Towards adaptation of agriculture to climate change in the Mediterranean. *Regional Environmental Change* 11, 159-166. <https://doi.org/10.1007/s10113-010-0187-4>
- Iglesias, A., Quiroga, S., Schlickerrieder, J. 2010. Climate change and agricultural adaptations: assessing management uncertainty for four crop types in Spain. *Climate Research* 44 (1), 83-94. <http://dx.doi.org/10.3354/cr00921>
- IPCC. 2014. Climate Change 2014, synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Core writing team R. Pachauri and L. Meyer Eds. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 p.
- Irimia, L.M., Latiche, C.V., Quenol, H., Sfica, L. 2018. Shifts in climate suitability for wine production as a result of climate change in a temperature climate wine region of Romania. *Theoretical Applied Climatology* 131, 1069-1081. <https://doi.org/10.1007/s00704-017-2033-9>
- Jlassi, W., Nadal-Romero, E., García-Ruiz, J.M. 2016. Modernization of new irrigated lands in a scenario of increasing water scarcity: from large reservoirs to small ponds. *Cuadernos de Investigación Geográfica* 42 (1), 233-259. <https://doi.org/10.18172/cig.2918>
- Jones G.V. 2006. Climate and terroir: impacts of climate variability and change on wine. In: Macqueen R.W., Meinert L.D. (eds) *Fine wine and terroir-the geoscience perspective*. Geoscience Canada reprint series no. 9, Geological Association of Canada. St. John's, Newfoundland, 247p.
- Jones, G.V., White, M.A., Cooper, O.R., Storchmann, K. 2005. Climate change and global wine quality. *Climatic Change* 73 (3), 319-343. <https://doi.org/10.1007/s10584-005-4704-2>
- Jones, G.V., Alves, F. 2012. Impact of climate change on wine production: a global overview and regional assessment in the Douro valley of Portugal. *International Journal Global Warming* 4, 383-406. <https://doi.org/10.1504/IJGW.2012.049448>
- Lasanta, T. 2009. Functional changes in the irrigation at the Ebro basin: a survey of the role of irrigation through time. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles* 50, 385-388.
- Lasanta, T. 2010. Evolución regional y dinámica del paisaje en La Rioja (1950-2010). *Zubía* 28, 49-88.
- Lasanta, T. 2018. El Rioja: cambios locales para acceder a un mercado global. En: *Sistemas productivos con anclaje territorial*. Juan Antonio Márquez Domínguez (Director Edición). Editorial: Universidad de Huelva, 137-152 pp. ISBN: 978-84-17288-97-6
- Lasanta, T., Inarejos, V.C., Arnáez, J., Pascual-Bellido, N.E., Ruiz-Flaño, P. 2016. Evolución del paisaje vitícola en La Rioja (2000-2015). Un análisis del papel de los programas de reconversión y reestructuración del viñedo. *Investigaciones Geográficas* 66, 9-25. <https://doi.org/10.14198/INGEO2016.66.01>
- Lasanta, T., Nadal-Romero, E., García-Ruiz, J.M. 2019. Clearing shrubland as a strategy to encourage extensive livestock farming in the Mediterranean mountains. *Cuadernos de Investigación Geográfica* 45 (2), 487-513. <http://doi.org/10.18172/cig.3616>
- Lasanta, T., Ruiz-Flaño, P. 2014. Los paisajes del viñedo en La Rioja: tradición y renovación. *Berceo* 167, 13-38.
- Lasanta, T., Sobrón, I. 1988. Influencia de las prácticas de laboreo en la evolución hidromorfológica de suelos cultivados con viñedo. *Cuadernos de Investigación Geográfica* 14, 81-97. <https://doi.org/10.18172/cig.966>
- Lehmann, N., Briner, S., Finger, R. 2013. The impact of climate and price risks on agricultural land use and crop management decisions. *Land Use Policy* 35, 119-130. <http://doi.org/10.1016/j.landusepol.2013.05.008>
- López-Bustins, J.A., Pla, E., Nadal, M., de Herralde, F., Savé, R. 2014. Global change and viticulture in the Mediterranean region: a case study in north-eastern Spain. *Spanish Journal of Agricultural Research* 12 (1), 78-88. <https://doi.org/10.5424/sjar/2014121-4808>

- Martín, I., Martínez, J., Domínguez, N., López, D., García-Escudero, E. 2018. Influencia del viñedo en la cubierta vegetal espontánea. *Vida Rural* 449, 30-37.
- Martínez Vidaurre, J.M. 2017. *Influencia del tipo de suelo en el estado nutricional de la vid, el desarrollo vegetativo, la producción, la composición de la uva y de los vinos de la variedad Tempranillo tinto* (Vitis vinífera L.) en el ámbito de la D.O.Ca Rioja. Tesis Doctoral, Universidad de la Rioja.
- Mills-Novoa, M., Pszcólkowski, P., Meza, F. 2016. The impact of climate change on the viticultural suitability of Maipo Valley, Chile. *The Professional Geographer* 68(4), 561-573. <https://doi.org/1080/00330124.2015.1124788>
- Moriondo, M., Jones, G.V., Bois, B., Dibari, C., Ferrise, R., Trombi, G., Bindi, M. 2013. Projected shifts of wine regions in response to climate change. *Climate Change* 119 (3), 825-839. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0739-y>
- Mozell, M.R., Thach, L. 2014. The impact of climate change on the global wine industry: challenges & solutions. *Wine Economics and Policy* 3, 81-89. <https://doi.org/10.1016/j.wep.2014.08.001>
- Nogués-Bravo, D. 2006. Assessing the effects of environmental and anthropogenic factors in land cover diversity in a Mediterranean mountain environment. *Area* 38 (4), 432-444. <https://doi.org/10.1111/j.1475-4762.2006.00709.x>
- Ollero Ojeda, A. 1996. Las riberas naturales del Ebro en La Rioja. *Zubia. Monográfico* 8, 123-136.
- Peña-Angulo, D., Vicente-Serrano, S.M., Domínguez-Castro, F., Murphy, C., Reig, F., Trambly, Y., Trigo, R.M., Luna, M.Y., Turco, M., Noguera, I., Aznárez-Balta, M., García-Herrera, R., Tomás-Burguera, M., El Kenawi, A. 2020. Long-term precipitation in southwestern Europe reveals no clear trend attributable to anthropogenic forcing. *Environmental Research Letters* 15 (9), 094070. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab9c4f>
- Ponti, L., Gutiérrez, A., Boggia, A., Neteler, M. 2018. Analysis of grape production in the face of climate change. *Climate* 6, 20. <https://doi.org/10.3390/cli6020020>
- Priori, S., Pellegrini, S., Perria, R., Puccioni, S., Storchi, P., Valboa, G., Costantini, E.A.C. 2019. Scale effect of terroir under three contrasting vintages in the Chianti Classico area (Tuscany, Italy). *Geoderma* 334, 99-112. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.07.048>
- Ramos, M.C. 2017. Projection of phenology response to climate change in rainfed vineyards in north-east Spain. *Agricultural and Forest Meteorology* 247, 104-115. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.07.022>
- Rodríguez Rodrigo, C., 2000. *El sistema de conducción del viñedo. Análisis ecofisiológico, agronómico y económico de cinco sistemas de conducción*. Universidad de La Rioja, Logroño, 208 pp.
- Rodrigo-Comino, J. 2018. Five decades of soil erosion research in “terroir”. The state-of-the-art. *Earth-Science Reviews* 179, 436-447. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.02.014>
- Romero, P., Gil-Muñoz, R., Fernández-Fernández, J.L., del Amor, F.M., Martínez-Cutillas, A., García-García, J. 2015. Improvement of yield and grape and wine composition in field-grown *Monastrell* grapevines by partial root zone irrigation, in comparison with regulated deficit irrigation. *Agriculture Water Management* 149, 55-73. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.10.018>
- RVGLR. 2016. Reconversiones de viñedo y reestructuraciones con espaldera (2001-2015). Gobierno de La Rioja. Informe.
- Sancho-Reinoso, A. 2013. Land abandonment and the dynamics of agricultural landscapes in Mediterranean mountain environments: The case of Ribagorça (Spanish Pyrenees). *Erdkunde* 67 (4), 289-308. <https://doi.org/10.3112/erdkunde.2013.04.01>
- Santesteban, L.G., Miranda, C., Urrestarazu, J., Loidi, M., Royo, J.B. 2017. Severe trimming and enhanced competition of laterals as a tool to delay ripening in Tempranillo vineyards under semi-arid conditions. *OENO ONE: Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin* 51 (2), 191-203. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2017.51.2.1583>
- Santillan, D., Iglesias, A., La Jeunesse, I., Garrotte, L., Sotés, V. 2019. Vineyard in transition: A global assessment of the adaptation needs of grape producing regions under climate change. *Science of the Total Environment* 657, 839-852. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12079>

- Schultz, H. 2000. Climate change and vitiviniculture: a European perspective on climatology, carbon dioxide and UV-B effects. *Australian Journal Grape Wine Research* 6, 2-12. <https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2000.tb00156.x>
- Serra, P., Pons, X., Saurí, D. 2008. Land-cover and land-use change in a Mediterranean landscape: a spatial analysis of driving forces integrating biophysical and human factors. *Applied Geography* 28 (3), 189-209. <http://doi.org/10.1016/j.apgeog.2008.02.001>
- Sgubin, G., Swingendouw, D., Dayon, G., García de Cortázar-Atauri, I., Ollart, N., Pagé, C., van Leeuwen, C. 2018. The risk of tardive frost damage in French vineyards in a changing climate. *Agricultural and Forest Meteorology* 250 (251), 226-242. <https://doi.org/10.1016/J.AGRFORMET.2017.12.253>
- Sherrer, S.C., Fischer, E.M., Rossell, R., Liniger, M.A., Groci-Maspoli, M., Knutti, R. 2016. Emerging trends in heavy precipitation and hot temperature extremes in Switzerland. *Journal Geophysical Research: Atmosphere* 121, 2626-2637. <https://doi.org/10.1002/2015JD024634>
- Tarolli, P., Sofia, G., Galligaro, S., Prostocimi, M., Preti, F., Dalla Fontana, G. 2015. Vineyards in terraced landscapes: new opportunities from Lidar data. *Land Degradation and Development* 26, 92-102. <https://doi.org/10.1002/ldr.2311>
- Teixeira, A., Eiras-Dias, J., Castellarin, S.D., Gerós, H. 2013. Berry phenolics of grapevine under challenging environments. *International Journal of Molecular Sciences* 14, 18711-18739. <https://doi.org/10.3390/ijms140918711>
- Tonietto, J., Carbonneau, A. 2004. A multicriteria climatic classification system for grape-growing worldwide. *Agricultural and Forest Meteorology* 24, 81-97. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2003.06.001>
- Tropeano, D. 1984. Rate of soil erosion processes on vineyards in central Piedmont (NW Italy). *Earth Surface Processes and Landforms* 9, 253-266. <https://doi.org/10.1002/esp.3290090305>
- Van Leeuwen, C., Darriet, P. 2016. Impact of climate change on viticulture and wine quality. *Journal Wine Economics* 11, 150-167. <https://doi.org/10.1017/jwe.2015.21>
- Van Leeuwen, C., Destrac-Irvine, A. 2017. Modified grape composition under climate change conditions requires adaptations in the vineyard. *Oeno One* 51 (2), 147-154. <https://doi.org/10.20870/oenone.2017.51.2.1647>
- Van Leeuwen, C., Destrac-Irvine, A., Dubznet, M., Duchêne, E., Gowdy, M., Marguerit, E., Pieri, P., Parker, A., de Rességuier, L., Ollat, N. 2019. An update on the impact of climate change in viticulture and potential adaptations. *Agronomy* 9, 514. <https://doi.org/10.3390/agronomy9090514>
- Van Leeuwen, C., Seguin, G. 2006. The concept of terroir in viticulture. *Journal Wine Research* 17 (1), 1-10. <https://doi.org/10.1080/09571260600633135>
- Vaudour, E. 2002. The quality of grapes and wine in relation to geography: notions of terroir at various scales. *Journal Wine Research* 13, 117-141. <https://doi.org/10.1080/0957126022000017981>
- Vaudour, E., Constantini, E.A.C., Jones, G.V., Mocali, S. 2015. An overview of the recent approaches to terroir functional modelling, footprinting and zoning. *Soil* 1, 287-312. <https://doi.org/10.5194/soil-1-287-2015>
- Wenter, A., Zanotelli, D., Montagnani, L., Tagliavini, M., Andreotti, C. 2018. Effect of different timings and intensities of water stress on yield and berry composition of grapevine (Cv Sauvignon blanc) in a mountain environment. *Scientia Horticulturae* 236, 137-145. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.03.037>
- Vigl, L.E., Schmid, A., Moser, F., Balotti, A., Gartner, E., Katz, H., Quendier, S., Ventura, S., Raifer, B. 2018. Upward shifts in elevation -a winning strategy for mountain viticulture in the context of climate change? E35 Web of Conferences 50.02006 (2018). *XX Congreso Internacional Terroir*. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20185002006>
- Zhu, X., Moriondo, M., Lerland van, E.C., Trombi, M. 2014. A model-based assessment of adaptation options for Chianti wine production in Tuscany (Italy) under climate change. *Regional Environmental Change* 16, 86-96. <http://doi.org/10.1007/s10113-04-0622-2>