

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES OCEANOLÓGICAS
FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS

Doctorado en Medio Ambiente y Desarrollo

“Influencia del cambio climático en la viticultura de la zona de clima mediterráneo de Baja California”

TESIS

Para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de doctorado

Presenta:

Marilina Hernández García

Ensenada, Baja California, México

Junio, 2024

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES OCEANOLÓGICAS
FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS
FACULTAD DE CIENCIAS

**“Influencia del cambio climático en la viticultura de la zona de clima
mediterráneo de Baja California”**

Tesis que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el
grado de Doctor en Medio Ambiente y Desarrollo

Presenta

Marilina Hernández García

Aprobada por:



Dra. María Cristina Garza Lagler
Codirector



Dra. María Tereza Cavazos Pérez
Codirector



Dra. Martha Ileana Espejel Carbajal
Sinodal



Dra. Marisa Orta Reyes
Sinodal



Dr. Jesús Martín Robles Parra
Sinodal

Resumen

Se analizaron escenarios de cambio climático y sus posibles impactos en el rendimiento de la uva para vino en Baja California, principal productor en México. Se usaron modelos de regresión lineal para estimar el rendimiento actual en función de variables climáticas y económicas. Usando proyecciones futuras de las variables climáticas de dos modelos climáticos regionales (RegCM y RCA4), se evaluaron los posibles cambios en el rendimiento para los períodos de Futuro Cercano (NF: 2021-2040) y Futuro Intermedio (IF: 2041-2060), bajo escenarios de bajas (RCP2.6) y de altas (RCP8.5) emisiones de gases de efecto invernadero. Un modelo de regresión incluye las temperaturas máximas y mínimas (T_x y T_n) de la temporada de crecimiento del cultivo de la uva y la precipitación acumulada en invierno (Pre) y el otro, incluye además, el salario mínimo real y el precio de la uva para evaluar el costo operativo que pagan los productores. Los resultados muestran que el modelo de regresión lineal con las variables climáticas y económicas explica el 28% del rendimiento de la uva para vino, siendo T_x y T_n los que tuvieron mayor influencia. Los escenarios de cambio climático muestran que, durante la temporada de crecimiento de la uva, estas variables podrían aumentar más de 1°C en el NF y más de 2°C en el IF bajo el escenario RCP8.5. Estos últimos cambios de temperatura podrían reducir el rendimiento entre un 18% y un 35% en relación con el conjunto de datos climáticos observados de referencia (Livneh). Además, el rendimiento de la uva para vino es sensible a factores económicos, ya que la reducción del rendimiento aumenta al menos un 3% en todos los casos. Por lo tanto, es necesario implementar estrategias de adaptación en el sector vitivinícola desde diferentes enfoques para reducir los impactos futuros.

Palabras clave: uva para vino; cambio climático; viticultura de Baja California; calentamiento global

Abstract

We analyzed climate change scenarios and their possible impacts on winegrape yield in Baja California, the leading wine producer in Mexico. Linear regression models were used to predict the current yield based on climate and economic variables. Using future projections of the climate variables from two regional climate models (RegCM and RCA4), we evaluated the possible changes in yield for the Near Future (NF: 2021–2040) and Intermediate Future (IF: 2041–2060) periods under low (RCP2.6) and high (RCP8.5) greenhouse gas emissions scenarios. One regression model includes maximum and minimum temperatures (Tx and Tn) of the winegrape growing season and accumulated winter precipitation (Pre), and the other model also includes the real minimum wage and winegrape price to evaluate the operating cost paid by producers. The results show that the linear regression model with the climatic and economic variables explains 28% of the winegrape yield, and Tx and Tn had the greatest influence. The climate change scenarios show that during the winegrape growing season, these variables could increase more than 1°C in the NF and more than 2 °C in the IF under the RCP8.5 scenario. These latter temperature changes could reduce the yield between 18% and 35% relative to the reference observed climate dataset (Livneh). However, wine grape yield is sensitive to economic factors, as the yield reduction increases at least 3% in all cases. Thus, adaptation strategies need to be implemented in the viticulture sector to reduce future impacts.

Keywords: winegrape; climate change; Baja California viticulture; global warming

Dedicatoria

***"A mis padres,
ustedes son mis pilares y refugio para seguir adelante ... "***

Agradecimientos

Agradezco a la Universidad Autónoma de Baja California por brindarme la oportunidad y el espacio para continuar aprendiendo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo económico para realizar mis estudios de doctorado. No. de becario: 770216.

A la Fundación Río Arronte por su financiamiento a través del proyecto A-447.

A mis directoras la Dra. María Cristina Garza Lagler y la Dra. María Tereza Cavazos Pérez por su labor incansable, paciencia, apoyo incondicional y orientación para lograr este trabajo.

A la Dra. Martha Ileana Espejel Carbajal, por su apoyo y encaminarme al mundo de la interdisciplina. A la Dra. Marisa Orta Reyes y al Dr. Jesús Martín Robles Parra por sus valiosos comentarios y retroalimentación para mejorar el contenido de esta tesis.

A todos mis profesores por compartir sus conocimientos conmigo. A mis compañeros de posgrado por compartir buenos momentos durante el doctorado, en especial a Astrid, Liliana y Lupita. Y a todos aquellos que directa o indirectamente me apoyaron para continuar adelante.

A mis papás (Eugenia e Ignacio), que desde que tomé la decisión de estudiar, me han apoyado y alentado para llegar hasta aquí. Y por último, pero no menos importante, a mi compañero de vida José Luis. Siempre digo “tú me ayudas a ser una mejor persona”.

Tabla de contenido

Resumen.....	1
Abstract.....	2
Dedicatoria.....	3
Agradecimientos.....	4
Lista de figuras.....	7
Lista de tablas.....	10
Lista de acrónimo y símbolos.....	12
Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Antecedentes.....	2
1.2.1 Historia y características de la viticultura en Baja California.....	2
1.2.2 Cambio climático.....	7
1.3 Hipótesis.....	11
1.4 Objetivos.....	11
1.4.1 Objetivo general.....	11
1.4.2 Objetivos específicos.....	11
1.5 Zona de estudio.....	12
1.6 Alcance y organización de la tesis.....	14
Capítulo 2. Diagnóstico de las condiciones climáticas y desarrollo económico de las principales áreas de vitivinícolas de Baja California....	16
2.1 Introducción.....	16
2.2 Datos.....	16
2.2.1 Climáticos.....	16
2.3 Método.....	17
2.3.1 Clima.....	17
2.3.2 Economía.....	18

2.4 Resultados.....	22
2.4.1 Características climáticas.....	22
2.4.2 Análisis de la viticultura de Baja California.....	26
2.4.3 Matriz de similitud entre las variables y agrupamiento jerárquico..	28
2.5 Discusiones y conclusiones.....	32
Capítulo 3. Relación entre el rendimiento del cultivo de la uva para vino con el clima y la economía.....	35
3.1 Introducción.....	35
3.2 Datos.....	36
3.2.1 Climáticos.....	36
3.2.2 Modelos climáticos regionales: RCA y RegCM.....	36
3.2.3 Datos económicos.....	38
3.3 Método.....	38
3.4. Resultados.....	40
3.4.1 Modelos de regresión.....	40
3.5 Discusión y conclusiones.....	44
Capítulo 4. Rendimiento de la uva para vino bajo escenarios de cambio climático.....	47
4.1. Introducción.....	47
4.2. Datos y método.....	48
4.3 Resultados.....	49
4.3.1 Evaluaciones de RCMs.....	49
4.3.2. Escenarios regionales de cambio climático.....	51
4.3.3 Rendimiento de la uva para vino bajo escenarios de cambio climático.....	52
4.4. Discusión y conclusiones.....	54
Capítulo 5. Discusión y conclusiones generales.....	57
5.1. Resumen y discusiones.....	57
5.2. Conclusiones.....	60
5.3. Trabajo futuro.....	60

Literatura citada.....	62
Anexo A. Tabla del padrón de bodegas vitivinícolas entrevistadas.....	75
Anexo B. Grupos del dendograma de similitud.....	76

Lista de figuras

Figura		Página
1	Agrupaciones de clima-madurez de algunas variedades de uva por G. Jones, (2006), basadas en relaciones entre los requisitos fenológicos y las temperaturas promedio de la temporada de crecimiento para la producción de vino de calidad alta a superior en las regiones de los países más comunes del mundo donde se cultiva. La línea discontinua al final de las barras indica que pueden ocurrir algunos ajustes a medida que haya más datos disponibles, pero es muy poco probable que se produzcan cambios de más de $\pm 0,2-0,5^{\circ}\text{C}$ (G. Jones, 2006).	3
2	Influencias del tiempo y el clima sobre el desarrollo del cultivo de la uva para vino y las etapas de crecimiento fenológico (Crespin et al., 1987).	5
3	Regiones vitivinícolas a nivel mundial (color negro) y temperaturas promedio de la temporada de crecimiento de 12 a 22 °C (color gris). De abril a octubre en el Hemisferio Norte y octubre a abril en el Hemisferio Sur (G. V. Jones et al., 2012).	6
4	Área total y rendimiento de uva para uva en la región mediterránea del noroeste de Baja California durante 1980-2022. Fuentes de datos:: (SIAP, 2022).	7
5	Anomalía anual de temperatura a nivel de 2 metros (t2m) (base climatológica de referencia 1981-2010) para el Ártico (63N-90N), Antártico (63S-90S), latitudes medias en el Hemisferio Norte (23N-63N), región tropical (23S-23N). Datos: NCEP-NCAR Reanalysis 1. https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html .	9
6	Regiones vitivinícolas de Baja California utilizadas en el análisis (cuadros negros). El color gris muestra la topografía del área de estudio en km.	12

7	Ciclo anual promedio de temperatura y precipitación de la estación de Valle de Guadalupe durante el periodo 2009-2022. Fuente de datos: CICESE.	13
8	Ciclo anual promedio de temperatura máxima (color rojo), temperatura mínima (color azul) y precipitación (barras) de las regiones vitivinícolas de Baja California durante 1981-2013 utilizando observaciones de Livneh y valores de reanálisis ERA5 durante 1981-2022.	23
9	Temperatura de la temporada de crecimiento y precipitación invernal. (a) Temperaturas máximas y (b) mínimas (Tx, Tn) del período de crecimiento (abril-octubre) y (c) precipitación invernal (noviembre-abril). Las correlaciones (r) entre las observaciones de Livneh y las series temporales de reanálisis de ERA5 se encuentran a continuación en la figura. Todas las correlaciones son estadísticamente significativas con un nivel de confianza del 95%.	25
10	Análisis descriptivo de la viticultura en Baja California. (a) Año en que se fundó la empresa. (b) Líneas de producción. (c) Tipos de variedades basados en relaciones entre los requisitos fenológicos y las temperaturas promedio de la temporada de crecimiento (Jones, 2006). (d) Tamaño de la empresa. (e) Alcance de su mercado y (f) Servicios que ofrecen (f)	27
11	Matriz de similitud por pares entre variables según el coeficiente de Gower (Romero, 1996).	29
12	Dendrograma jerárquico de las 59 bodegas vitivinícolas consultadas.	30
13	Rendimiento anual de uva para vino para la región vitivinícola de Baja California. La línea negra representa las observaciones, la línea azul es para el modelo de regresión que usa las observaciones de Livneh (1981-2013) y la línea naranja es para ERA5 (1981-2022). Modelos de regresión con variables económicas y climáticas (izquierda) y modelos de regresión sólo con variables climáticas (derecha). Las correlaciones (r) entre las series de observación y reanálisis y la raíz del error cuadrático medio (RMSE) se encuentran en la parte inferior de la figura.	42

- 14** Similar a la Figura 13, pero para el RegCM (línea azul) y RCA (línea verde) forzados con ERA-Interim (EI) y la media del ensamble (ens) (línea magenta) forzado con los GCMs en el período base (1981-2005). **43**
- 15** Ciclo anual de (a) temperatura máxima y mínima y (b) precipitación del período 1981-2005 para las observaciones de Livneh, el reanálisis de ERA5 y el promedio del ensamble. Las líneas de color sólido representan el promedio del ensamble y las áreas sombreadas indican $\pm 1,5$ desviaciones estándar (σ) entre miembros del ensamble. La temporada de crecimiento de la uva para vino (abril-octubre) y la temporada de invierno (noviembre-abril) están marcadas con líneas verticales grises en (a) y (b), respectivamente. **50**
- 16** Cambios mensuales en el futuro cercano (NF) y el futuro intermedio (IF) relativos a la media del período de referencia (1981-2005) para (a) temperatura máxima (Tx), (b) temperatura mínima (Tn) y (c) precipitación (Pre). La temporada de crecimiento (abril-octubre) está marcada con líneas verticales grises en (a,b) y la temporada de invierno (noviembre-abril) en (c) **51**

Lista de tablas

Tabla		Página
1	Preguntas de la encuesta, criterios y nombre de las variables para el diagnóstico económico. El diseño y estructura de la encuesta es propia con base en los trabajos citados.	19
2	Valores del coeficiente de Gower para las variables y criterios propuestos en la Tabla 1.	20
3	Colores y características de similitud entre las bodegas encuestadas.	21
4	Estadísticas descriptivas de las características climáticas de las regiones vitivinícolas de Baja California durante 1981-2013 usando observaciones de Livneh (valores del reanálisis ERA5 entre paréntesis durante 1981-2022). El error de sesgo medio (MBE) es la diferencia de ERA5 en relación con Livneh. Las tendencias se calcularon usando la estimación de la pendiente de 'Sen'(Sen, 1968). Las tendencias que fueron significativas con un nivel de confianza del 95% están marcadas con un asterisco, obtenidas con la prueba de Mann-Kendall (Kendall, 1948).	24
5	Grupos y características de agrupamiento de 59 bodegas vitivinícolas encuestadas.	31
6	Modelos de regresión de rendimiento de uva para vino(ton/ha) para la región mediterránea de Baja California utilizando información climática estacional media (Tx, Tn y Pre) de Livneh (obs) y ERA5 (reanálisis), salarios anuales (W) y precios (P) de la producción de uva para vino durante 1981-2013. También se presentan los modelos de regresión para los modelos climáticos regionales (RegCM y RCA) forzados con ERA-Interim y la media del ensamble para la línea base (1981-2005).	41
7	Cambios en el rendimiento de uva para vino (%) durante los periodos NF e IF bajo los dos escenarios RCP según los modelos de regresión	53

climático y económico, y sólo climático. Los cambios porcentuales de la media del ensamble se obtuvieron en relación con el rendimiento promedio observado a partir del ajuste lineal, usando las bases de datos de Livneh (1981-2013) y ERA5 (1981-2022) como promedios históricos.

Lista de acrónimo y símbolos

CAM	América Central, El Caribe y México
CC	Cambio climático
CICESE	Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, B.C.
CMIP5	Climate Model Intercomparison Project phase 5
CORDEX	Coordinated Regional Downscaling Experiment
CMV	Consejo Mexicano Vitivinícola
ECMWF	The European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
ERA-Interim	ERA-Interim reanalysis data
ERA5	ECMWF Reanalysis data version 5
MBE	Error Absoluto Medio (por sus siglas en inglés)
FUNDA	Año en que se fundó la empresa
GCMs	General circulation models (por sus siglas en inglés)
GST	Temperatura de la temporada de crecimiento
GFDL-ESM2M	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory Earth System Model version 2
HadGEM2-ES	Hadley Center Global Environment Model version 2
ICTP	International Center for Theoretical Physics
IF	Intermediate Future (Abreviatura en inglés)
IPCC	Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático
LPRO	Líneas de producción de una empresa
MKD	Alcance del mercado de las bodegas vitivinícolas entrevistadas
MPI-ES	Max Planck Institute Earth System Model
NF	Near Future (Abreviatura en inglés)
P	Precios de la producción de uva para vino
Pre	Precipitación invernal
RCA	The Rossby Center Regional Climate Model
RCP	Representative Concentration Pathways

RegCM	Regional Climate Model
RCMs	Regional Climate Models
SER	Servicios que ofrecen las bodegas vitivinícolas entrevistadas
SIAP	Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera
SMHI	Swedish Meteorological and Hydrological Institute
TE	Tamaño de la bodega
TIVA	Varietales producidas por las bodegas
Tn	Temperatura mínima de la temporada de crecimiento
Tx	Temperatura máxima de la temporada de crecimiento
W	Salario mínimo

Capítulo 1. Introducción

1.1 Introducción

La viticultura es una de las actividades más antiguas del mundo que, en la actualidad se sigue practicando (Anderson et al., 2022; G. V. Jones, 2003). A nivel mundial, esta actividad aumentó de manera significativa en las últimas tres décadas. Factores como el aumento de exportaciones de vino y el mejoramiento de las técnicas tanto para su producción como para el cultivo de la uva, incentivaron un gran número de nuevos productores, lo que a su vez abrió nuevas regiones vitivinícolas (Anderson, 2022).

Hasta el 2014 la producción anual de uva a nivel mundial era de 65 millones de toneladas, de las cuales el 80% era usada para la producción de vino (Meraz Ruiz & Ruiz Vega, 2016), hecho que dio origen a que algunos países que antes de 1980 no se consideraban como naciones vitícolas, ahora se consideren como tales y compiten en los mercados internacionales con los productores natos (países europeos), como es el caso de Chile y Argentina (Palazzo et al., 2022).

Si bien México aún no es un competidor importante a nivel mundial, en los últimos años ha comenzado a posicionarse en el mercado internacional gracias a la calidad de sus productos (Anderson et al., 2022; Sánchez Zepeda &

Mungaray Lagarda, 2010). Un ejemplo es el estado de Baja California, en el que, a partir de la primera década del siglo XXI, la viticultura creció de manera importante. Mientras que en el año 2000 se contaba solo con ocho casas productoras de vino, en el 2015 se registraron 89, representando un incremento de la oferta vinícola del 1113% en quince años y un crecimiento promedio anual del 74% (Reyes-Orta et al., 2016).

Esta evolución se originó a partir de cambios en la producción desde un punto de vista endógeno, a través de la mejora de la mano de obra y la innovación de las empresas (Sánchez Zepeda & Mungaray Lagarda, 2010), pero principalmente debido a la creación de programas y políticas públicas para el apoyo de este sector (PEACC-BC, 2012). Esto último, además contribuye a que Baja California se posicione como el segundo productor de uva para vino en México (Castillo et al., 2023).

1.2 Antecedentes

1.2.1 Historia y características de la viticultura en Baja California

La uva para vino es uno de los cultivos más antiguos. Se tienen registros que se domesticó por primera vez en la antigua Persia y pronto se extendió a Asiria, Babilonia y las costas del Mar Negro, dando origen a la viticultura ya como una actividad económica (G. V. Jones, 2003). Posteriormente, los asirios, fenicios, griegos y romanos impulsaron esta actividad y la vinicultura (el proceso de fermentar las uvas para obtener vino) difundiendo sus conocimientos por regiones de Palestina, Egipto, el norte de África, la Península Ibérica y por toda Europa, hasta el norte de las Islas Británicas (Unwin, 2005).

Durante la edad media, los monjes cristianos fueron los encargados de preservar la viticultura e hicieron mejoras en las técnicas de conservación. Además, por medio de las exploraciones del nuevo mundo, éstos trajeron el

cultivo de la uva y ayudaron a establecer la industria en regiones bien adecuadas para el vino, por ejemplo, en Baja California (Loubère, 1990).

Existen varios factores que influyen en el crecimiento de la uva y en la composición del vino. Entre ellos se puede destacar el clima, el suelo y la disponibilidad de agua (Jackson & Lombard, 1993). Cada variedad de la uva tiene sus características específicas (Figura 1), pero los tres elementos mencionados determinan en gran parte el resultado final (Pérez Reyes, 2017). Este cultivo tiene gran sensibilidad al clima, ya que cada una de las principales etapas fenológicas de la uva se rigen por influencias climáticas (Schwartz, 2003).

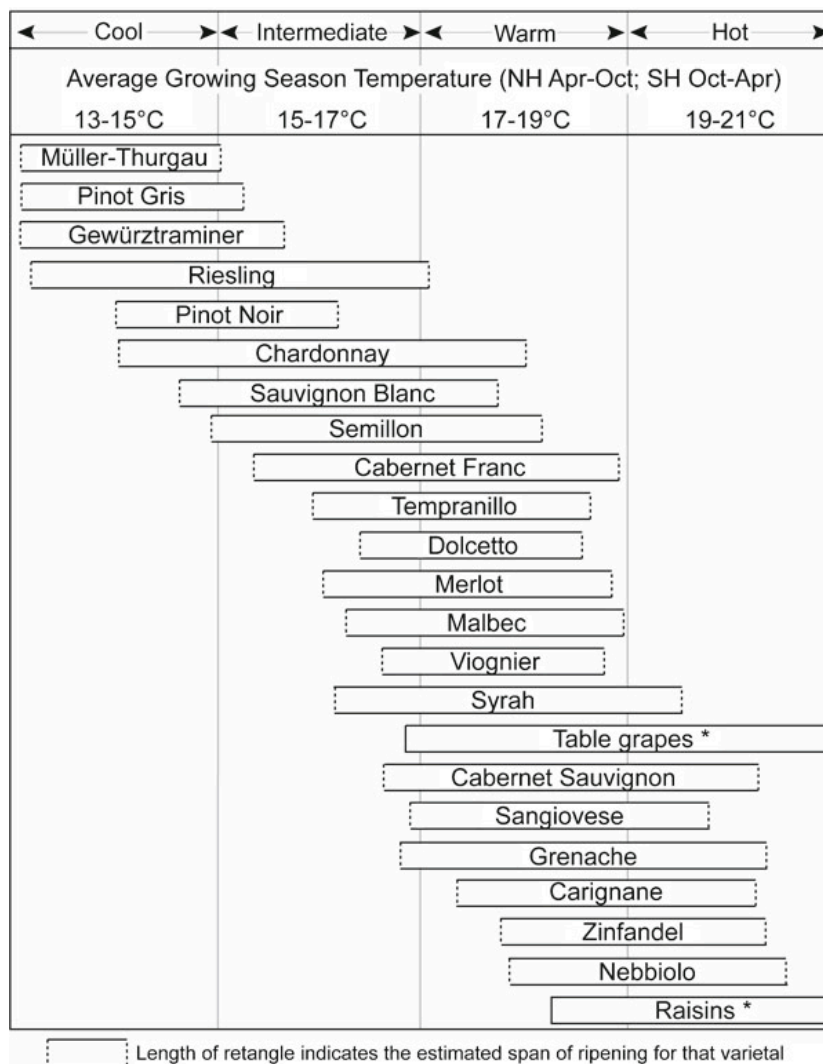


Figura 1. Agrupaciones de clima-madurez de algunas variedades de uva por G. Jones, (2006), basadas en relaciones entre los requisitos fenológicos y las temperaturas promedio de la temporada de crecimiento para la producción de vino de calidad alta a superior en las regiones de los países más comunes del mundo donde se cultiva. La línea discontinua al final de las barras indica que pueden ocurrir algunos ajustes a medida que haya más datos disponibles, pero es muy poco probable que se produzcan cambios de más de $\pm 0,2-0,5^{\circ}\text{C}$ (G. Jones, 2006).

Por ejemplo, durante el ciclo de crecimiento la humedad afecta gravemente a las vides y las bayas (ya sea en forma de humedad y lluvia). La humedad acelera la aparición de enfermedades fúngicas que pueden causar defoliación, reducción de la acumulación de azúcar y reducción de la resistencia al frío del invierno (Amerine & Winkler, 1944). Mientras que el estrés hídrico originado por valores altos de temperatura máxima puede manifestarse en pérdida de hojas, reducciones severas en el metabolismo de la vid y daño o pérdida de frutos, originando menores rendimientos y baja calidad de la fruta (Schwartz, 2003).

Además, los fenómenos meteorológicos extremos como las tormentas y granizo, aunque son raros en la mayoría de las regiones vitivinícolas pueden ser extremadamente perjudiciales al dañar las hojas, los zarcillos y las bayas (Figura 2). Si ocurren en la etapa de maduración, pueden partir las uvas, provocando oxidación, fermentación prematura y una severa reducción en el volumen y la calidad del rendimiento del cultivo (Winkler, 1974). Aunque no existe un límite superior de la cantidad de precipitación necesaria para un crecimiento y producción óptimos del cultivo, su variabilidad parece estar limitada a regiones con acumulados de lluvia anual inferiores a 600-750mm (Gladstones, 1992).

		VEGETATION DEVELOPMENT				BERRY DEVELOPMENT					DORMANT STAGE		
		FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC	JAN
		← Sap Bleeding		← Bud Break		← Bloom		← Berry Growth		← Maturation/Harvest		← Leaf Fall	
						Berry Set		Véraison				Full Dormancy	
Temperature	Negative Influence	Tmin < -2.5°C		Prolonged Period with Tmax < 10°C		Abnormally Cool during Bloom		Heat Stress with Tmax > 35°C		Tmin < -5 to -20°C Damage to Latent Buds (depending on cultivar)			
	Positive Influence			Tavg > 10°C Favors Plant Growth		Sufficient Heat Accumulation to drive Berry Growth		Appropriate Diurnal Range to Synthesize Tannins and Sugars		Sufficient Chilling Units to insure Full Dormancy			
Insolation	Low Amount	Cloudy/Cool/Wet - Couleure Failure to Flower Completely											
	High Amount					Good for Flower Differentiation and Berry Set		Good for Accumulation of Sugars					
Wind	Negative Influence	Breaks Small Branches, Tendrils, Shoots, etc.								Dessicates the Berries			
Precipitation	Wet Periods					Reduces or Retards Bloom		Promotes Fungus and Diseases		Dillutes Berries		Necessary for Soil Moisture Recharge	
	Dry Periods							Favors Optimum Photosynthesis		Favors Optimum Ripening and Balance			
	Thunderstorms Heavy Rain or Hail					Damages Young Shoots, Tendrils, Leaves, Flowers and Berries		Promotes Fungus and Diseases		Can Burst Grape Clusters - Ruin Crop		Heavy Rain Events can lead to Soil Erosion	
Soil Moisture*	Positive Influence	Soil Moisture Recharge important for Early Season Growth								Adequate Soil Moisture Reduces Heat Stress			
	Negative Influence					High Soil Moisture Drives too much Vegetative Growth				High Soil Moisture Limits Ripening and Delays Leaf Fall			

Figura 2. Influencias del tiempo y el clima sobre el desarrollo del cultivo de la uva para vino y las etapas de crecimiento fenológico (Crespin et al., 1987).

El cultivo de la uva para vino se desarrolla principalmente en regiones de clima templado, y en climas de tipomediterráneo con inviernos fríos y húmedos y veranos calurosos y secos (G. V. Jones et al., 2012). Este tipo de clima se localiza entre los 30° y 45° de ambos hemisferios y se encuentran entre las isothermas anuales de 10°C y 20°C a nivel mundial (G. V. Jones, 2007) o entre las isothermas de 12° y 22°C de la temporada de crecimiento de la uva (Figura 3), incluyendo Australia, Chile, Sudáfrica, California en USA y Baja California en México (Viers et al., 2013). Aunque también se ha adaptado a climas húmedos de latitudes medias como en el estado de Washington en Estados Unidos (G. V. Jones, 2007), así como en el Altiplano Mexicano donde dominan los climas semiáridos continentales, pero frescos en una gran parte del año por la elevación (Castillo et al., 2023).

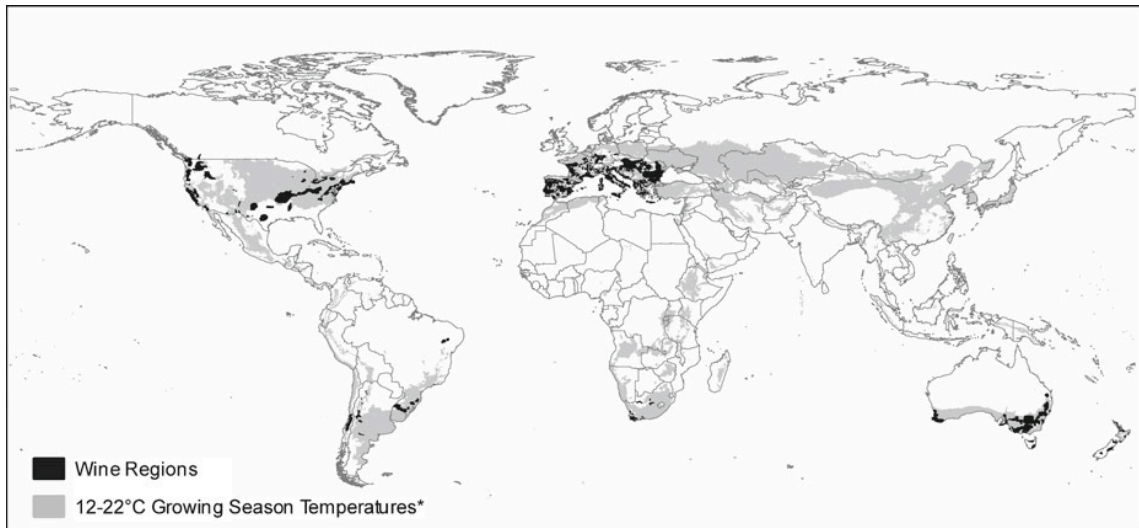


Figura 3. Regiones vitivinícolas a nivel mundial (color negro) y temperaturas promedio de la temporada de crecimiento de 12 a 22 °C (color gris). De abril a octubre en el Hemisferio Norte y octubre a abril en el Hemisferio Sur (G. V. Jones et al., 2012).

En México, Baja California es el segundo productor de uva para vino después de Zacatecas (SIAP, 2021) y el único estado de México con clima mediterráneo. Según el Consejo Mexicano de Vitivinicultura, alrededor del 75% de la producción nacional de vino (CMV, 2018) y el 33.6% de la producción nacional de uva para vino se concentran en este estado (SIAP, 2021). Las actividades vitivinícolas contribuyen a la economía local y han atraído sinergias con otros sectores como restaurantes, hoteles y turismo (Sánchez Zepeda & Mungaray Lagarda, 2010).

En el 2021 el cultivo de uva para vino generó un beneficio económico de 397 millones de pesos en Baja California (SIAP, 2022), aproximadamente 20 millones de dólares. Sin embargo, en las últimas décadas los efectos de la de la variabilidad del clima como el aumento de temperatura y disminución de precipitación (Cavazos et al., 2020) y las sequías (Andrade-Gómez & Cavazos, 2024), además de cambios en la economía regional, dan como resultado que el rendimiento y las áreas agrícolas destinadas a la siembra de uva para vino, disminuyeran considerablemente en Baja California (IPCC, 2021; SIAP, 2022).

El registro total de áreas destinadas al cultivo de uva en Baja California durante el periodo de 1982 al 2022 (Figura 4) muestra que en 1984 la superficie destinada para producción de uva para vino era de 6039 ha, mientras que en el año 2022 había un 33% menos de superficie destinada para este fin (SIAP, 2022). El área mínima destinada al cultivo se registró en los años 2005 y 2006, superando ligeramente las 2 mil hectáreas y después del año 2006 el área destinada al cultivo ha aumentado, aunque ligeramente. Por otro lado, se observa que el mayor rendimiento regional fue de ~13.5 toneladas/ha en 1982, sin embargo, este ha disminuido un 52% en los últimos años (Figura 4); esta tendencia es más notoria a partir de 1996 y podría continuar, ya que se espera que el cambio climático produzca más incertidumbre interanual en la región (Castillo et al., 2023).

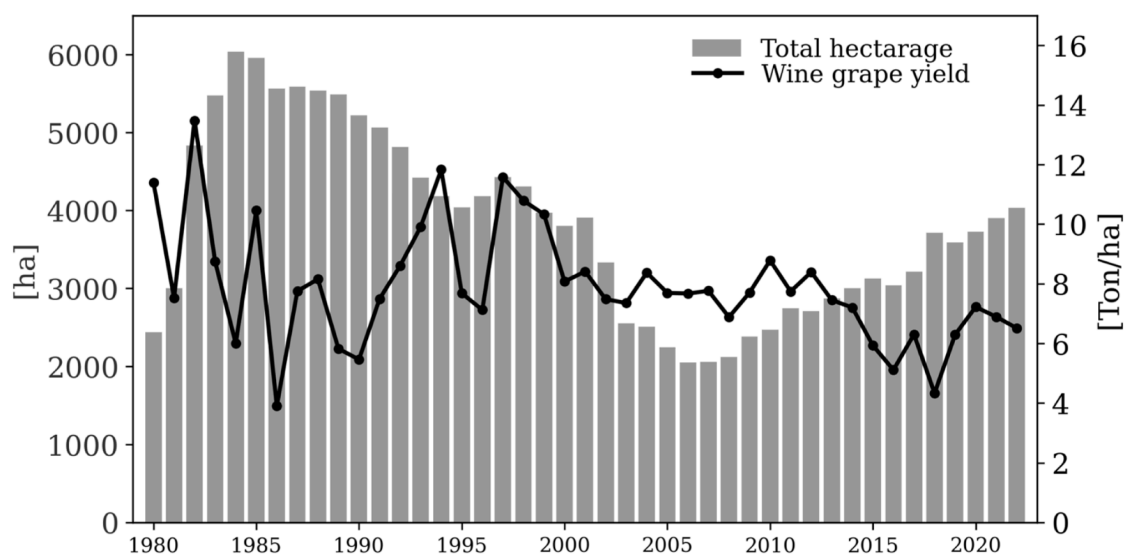


Figura 4. Área total y rendimiento de uva para uva en la región mediterránea del noroeste de Baja California durante 1980-2022. Fuentes de datos: (SIAP, 2022).

1.2.2 Cambio climático

La Organización Meteorológica Mundial (OMM) define al clima como el conjunto de condiciones atmosféricas en un lugar determinado durante un

periodo largo de tiempo (mínimo 30 años). Depende de la interacción de distintas variables como temperatura, precipitación, presión atmosférica, viento, humedad, evaporación y radiación solar. También existen otros factores que influyen en el clima como la latitud, altitud, corrientes oceánicas, relieve y oscilaciones atmosféricas y oceánicas (OMM, 2011).

El cambio climático (CC) se entiende como un fenómeno global, debido a que sus efectos impactan de manera directa o indirecta en la sociedad y los ecosistemas del planeta (IPCC, 2021). El Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), define al cambio climático como la variación del clima atribuido directa o indirectamente a las actividades humanas que alteran la composición de la atmósfera global, sumado a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables.

Su principal causa es el calentamiento del sistema climático (calentamiento global) debido a las emisiones de gases de efecto invernadero originadas por las actividades antropogénicas, en gran medida como resultado del crecimiento económico y demográfico a nivel mundial (IPCC, 2023). Desde 1950 se ha observado un aumento de la temperatura media de la atmósfera (Figura 5) y del océano, una disminución del volumen de hielo, aumento en el nivel medio del mar, variación en los patrones de precipitación y cambios en los fenómenos meteorológicos y climáticos extremos (IPCC, 2021).

Anomalía de temperatura a 2m base 1981-2010

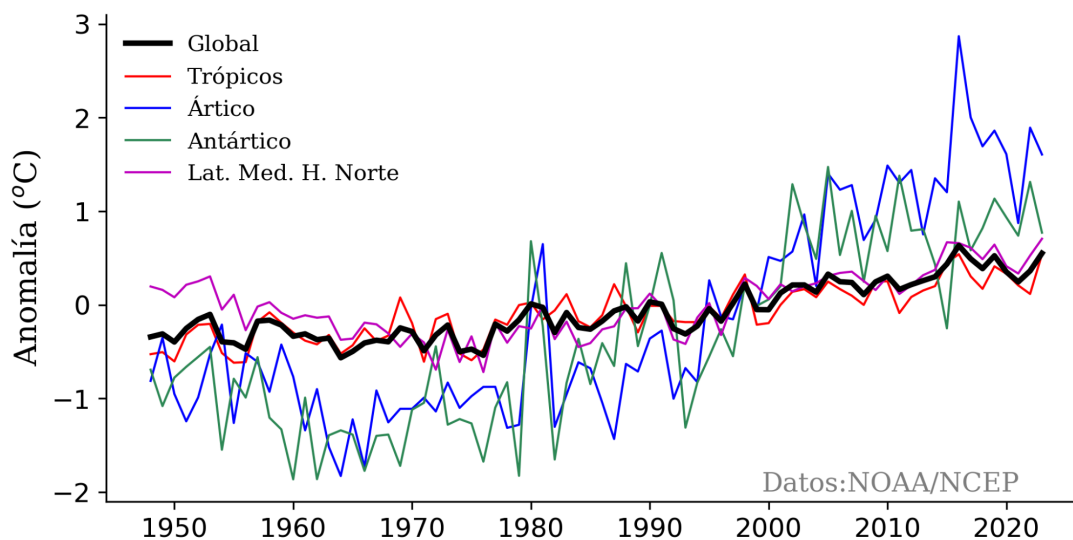


Figura 5. Anomalía anual de temperatura a nivel de 2 metros (t2m) (base climatológica de referencia 1981-2010) para el Ártico (63N-90N), Antártico (63S-90S), latitudes medias en el Hemisferio Norte (23N-63N), región tropical (23S-23N). Datos: NCEP-NCAR Reanalysis 1. <https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html>.

Estos efectos tienen consecuencias en las actividades humanas, siendo la agricultura una de las más vulnerables. Los impactos del clima de los últimos años difieren según los cultivos y las regiones, pero en la mayoría de los casos, afecta negativamente en el rendimiento y calidad de los cultivos (IPCC, 2021). Además, el cambio climático en relación al suministro de alimentos tiene efectos de cascada, es decir, propicia un aumento en el uso de insumos, lo que a su vez se refleja en un incremento en los precios de los alimentos, impactando negativamente a los ingresos económicos de los hogares, la seguridad alimentaria y la nutrición de los grupos vulnerables (IPCC, 2021).

Se ha observado que las variables climáticas y económicas están bien correlacionadas con el rendimiento de los cultivos, incluida la viticultura (Asatryan et al., 2022; Markopoulos et al., 2023; OECD/FAO, 2023), ya que uno de los cultivos más sensibles al clima es la uva para vino (G. V. Jones et al., 2012; G. V. Jones & Goodrich, 2008; Riekötter & Hassler, 2022; Trejo-Pech

et al., 2012; Winkler, 1974), Si bien el clima determina la idoneidad del cultivo, la variabilidad climática tiene un efecto dominante en las variaciones de una cosecha a otra, tanto en el rendimiento y calidad de la uva como en la producción del vino (Fraga et al., 2020; G. V. Jones et al., 2012; Vaudour, 2002).

En las últimas décadas los efectos del cambio climático han sido evidentes con un aumento de la temperatura a escala global (Cramer et al., 2018; IPCC, 2023) y nacional (Cavazos et al., 2020). Desde hace años distintas instituciones gubernamentales y académicas a nivel mundial se han dedicado a investigar los posibles efectos del cambio climático en esta actividad económica (Adams et al., 1998) y se ha demostrado que en inviernos y primaveras más cálidos, las temporadas de cultivo y cosecha de la uva se adelantan entre 18 y 24 días (Nemani et al., 2001). En el caso de Baja California, también se espera este inicio temprano de la temporada de crecimiento que puede producir cambios negativos en la calidad del vino (Cabello-Pasini et al., 2017; Castillo et al., 2023).

Si a lo anterior se le suman los efectos de los cambios en la economía regional y nacional, como el incremento en los precios de los insumos para la producción de uva en cada región dedicada a la viticultura (Covarrubias & Thach, 2015; Romero Azorin & Garcia Garcia, 2020; Santillán et al., 2019, 2020), el cambio climático se convierte en un gran desafío para la producción de uva para vino (Riekötter & Hassler, 2022).

1.3 Hipótesis

Con el aumento de temperatura y disminución de la precipitación proyectadas en los escenarios de cambio climático (CC), se puede esperar una disminución en el rendimiento del cultivo de la uva hacia mediados de este siglo.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Evaluar la influencia del Cambio Climático (CC) en la viticultura de clima mediterráneo de Baja California.

1.4.2 Objetivos específicos

1. Realizar un diagnóstico histórico climático y económico a escala regional asociado a las actividades vitivinícolas de la región de estudio.
2. Desarrollar un modelo de regresión para determinar la relación entre el rendimiento del cultivo con el clima y la economía de la región.
3. Generar escenarios de CC con salidas de dos modelos climáticos regionales (RegCM4.7 y RCA).
4. Analizar el rendimiento del cultivo de la uva en las principales zonas de producción de BC bajo escenarios de CC.

1.5 Zona de estudio

El estudio se realizó en la región mediterránea del noroeste de Baja California que incluye a las principales regiones productoras de vino en el estado: el Valle de Guadalupe y Ojos Negros (la nueva ruta del vino) al norte, y Santo Tomás y San Vicente al sur en la antigua ruta del vino de Baja California. Estas regiones se representan en dos áreas rectangulares ($32.13^{\circ}\text{N} - 31.87^{\circ}\text{N}$ y $116.60^{\circ}\text{W} - 116.20^{\circ}\text{W}$; $31.55^{\circ}\text{N} - 31.30^{\circ}\text{N}$ y $116.40^{\circ}\text{W} - 116.16^{\circ}\text{W}$) que se muestran en la Figura 6.

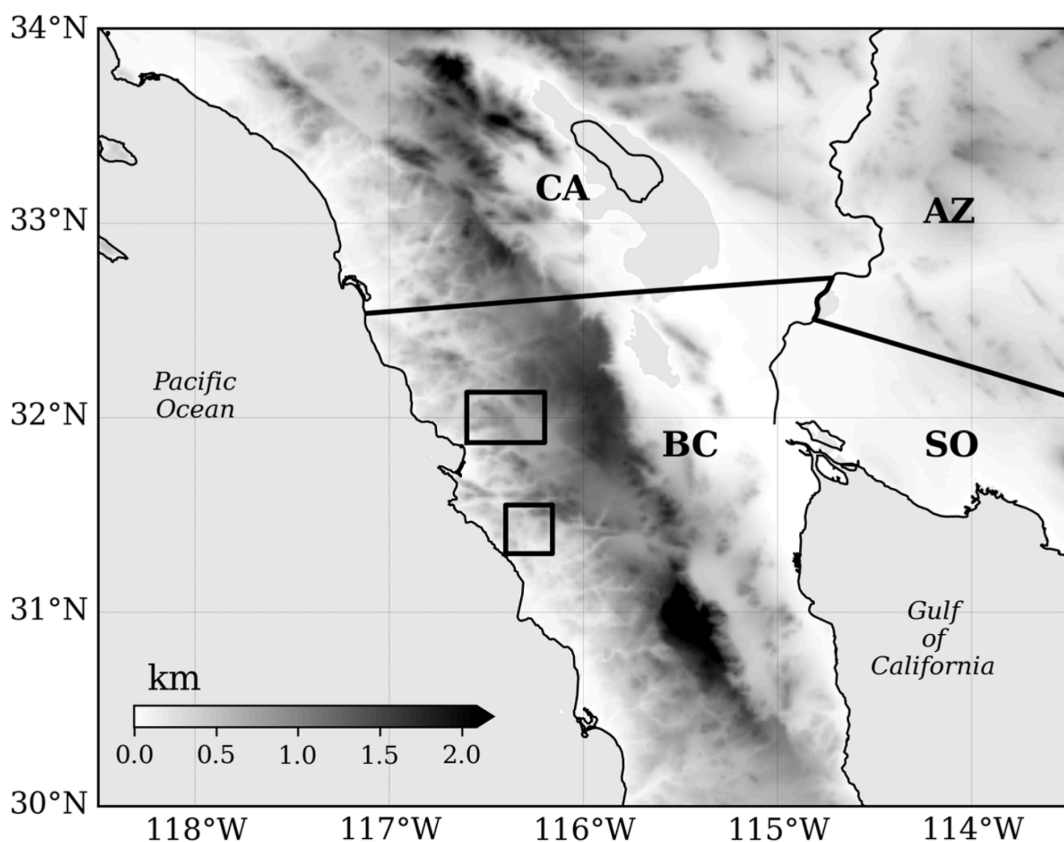


Figura 6. Regiones vitivinícolas de Baja California utilizadas en el análisis (cuadros negros). El color gris muestra la topografía del área de estudio en km.

Estos valles vitivinícolas se ubican entre 100 metros y 530 metros de altura sobre el nivel del mar y producen el 99% de la producción de uva para vino en Baja California en aproximadamente 2160 ha (SEFOA, 2015). Los dominios seleccionados se caracterizan por tener un clima mediterráneo (Figura 7), con

una temperatura media anual entre 12 °C y 18 °C y precipitación acumulada entre 100 mm y 300 mm al año (CONAGUA, 2015). Cabe mencionar que la precipitación máxima ocurre durante el invierno (noviembre-abril) y está asociada con el paso de sistemas frontales (Arriaga-Ramírez & Cavazos, 2010), la posición de la corriente en chorro subtropical y ríos atmosféricos (Cavazos & Rivas, 2004; Luna-Niño et al., 2021).

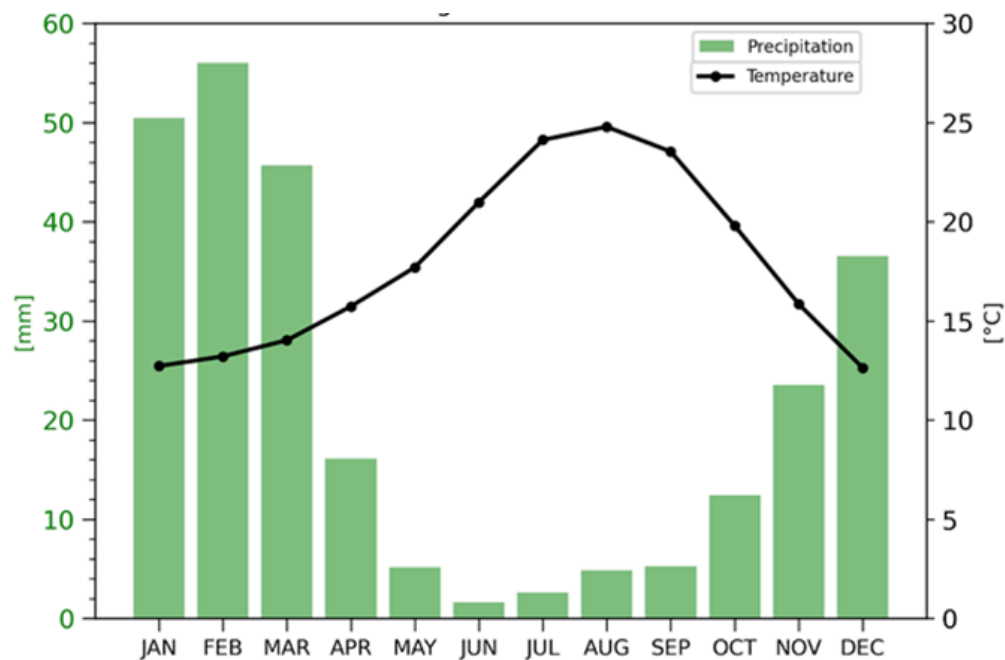


Figura 7. Ciclo anual promedio de temperatura y precipitación de la estación de Valle de Guadalupe durante el periodo 2009-2022. Fuente de datos: CICESE.

En estas regiones se cultivan más de 40 variedades de uva para vino, de las cuales Cabernet Sauvignon es la más representativa para vino tinto (20% del área plantada en Baja California), con un rendimiento promedio de 5 toneladas/ha. Al mismo tiempo, Chenin Blanc es la principal variedad para vinos blancos (6,77% del área plantada), con un rendimiento de 8 toneladas/ha (SEFOA, 2015).

1.6 Alcance y organización de la tesis

La influencia que puede tener el cambio climático en la viticultura es de gran interés científico debido a que es una actividad económica importante a nivel mundial y en este caso a nivel regional (González Andrade, 2015; G. V. Jones & Goodrich, 2008). En este trabajo se presenta una estimación de los impactos del CC en el rendimiento de la uva para vino en Baja California durante 2021-2040 (NF) y 2041-2060 (IF) para dos trayectorias de concentración representativas de bajas (RCP2.6) y altas (RCP8.5) emisiones de gases de efecto invernadero o escenarios de forzamiento radiativo. A continuación se hace una descripción breve de cada capítulo que compone este trabajo.

El siguiente escrito se encuentra compuesto por cinco capítulos, cada uno integrado por una breve introducción para mostrar el objetivo del capítulo, y su respectivo desarrollo. En el Capítulo 1 se describe la importancia y la situación actual de la viticultura a nivel mundial y regional. Además, se introduce el contexto de cómo las variaciones climáticas pueden relacionarse con la fenología de la uva y cómo podría afectar el cambio climático en la viticultura en un futuro. En el Capítulo 2 se realiza un diagnóstico histórico y económico, además de mostrar las condiciones del clima de la región de estudio y el desarrollo de la viticultura como actividad económica en Baja California.

En el capítulo 3 se analiza la relación entre el rendimiento de la uva con variables climáticas y económicas. Esta relación se determina con dos modelos de regresión lineal para el período histórico 1981-2022. El primero con variables económicas y climáticas, y el segundo usando solo variables climáticas. Ambos modelos se compararon con el rendimiento anual observado de uva para vino en la región vitivinícola de Baja California.

Posteriormente en el Capítulo 4, se usaron proyecciones climáticas de modelos climáticos regionales para determinar los cambios en temperatura (máxima y mínima) y precipitación en Baja California, que luego se utilizaron para evaluar

el impacto del cambio climático en los rendimientos de uva para vino durante dos periodos de un futuro cercano (2021-2040) y un futuro intermedio (2021-2060).

Parte de los resultados descritos en el Capítulo 3 y 4 se encuentran publicados en la revista MDPI Climate como:

Hernandez Garcia, M., Garza-Lagler, M. C., Cavazos, T., and Espejel, I. (2024). Impacts of Climate Change in Baja California Winegrape Yield. *Climate*, 12(2), 14. <https://doi.org/10.3390/cli12020014>

Por último, en el Capítulo 5 se presenta un resumen y una breve discusión de lo encontrado en este trabajo, así como las conclusiones generales. Además de señalar la necesidad de incrementar el monitoreo y estudios regionales relacionados con la producción de uva y vino para Baja California. Al final del documento se lista la literatura citada y se muestran los anexos del trabajo.

Capítulo 2. Diagnóstico de las condiciones climáticas y desarrollo económico de las principales áreas de vitivinícolas de Baja California

2.1 Introducción

La viticultura de Baja California se caracteriza por una combinación única de factores que contribuyen a la producción de vinos de alta calidad, como son el clima de tipo mediterráneo, los distintos tipos de suelos, las variedades que se cultivan y la dinámica económica de las casas vitivinícolas (Miranda et al., 2022). Con el fin de realizar un análisis del desarrollo de la viticultura en la región de clima mediterráneo del estado de Baja California en las últimas tres décadas, se analizaron las características climáticas y económicas de las dos zonas de producción vitivinícola durante el período (1981-2022).

2.2 Datos

2.2.1 Climáticos

Los datos climáticos de las regiones vitivinícolas del estado de Baja California se caracterizan por la falta de observaciones in situ en los últimos años, por lo que en este trabajo se tomaron como aproximación las bases de datos de reanálisis y observaciones en malla para representar los indicadores climáticos, así como la revisión de estudios anteriores (Castillo et al., 2023). Se usaron

datos mensuales de temperatura mínima (Tn), temperatura máxima (Tx) y precipitación (Pre) de las siguientes bases de datos:

Livneh. Una base de datos en malla que incluye observaciones diarias con una resolución espacial de $1/16^\circ$ (~6 km) para 1950-2013 (Livneh et al., 2015). Está disponible en línea en <https://psl.noaa.gov/data/gridded/> (consultado el 10 de julio de 2023). La información que proporciona se utiliza como referencia para este estudio. Cabe destacar que, esta misma fuente se ha empleado en estudios recientes como el de Castillo et al. (2023), en el que abordaron el análisis del cambio climático en las regiones vitivinícolas de México.

ERA5. Quinta generación de datos de reanálisis atmosférico del Centro de Pronósticos Meteorológicos a Mediano Plazo (ECMWF, por sus siglas en inglés), que combina datos de pronóstico de modelos numéricos globales con observaciones de todo el mundo. La resolución espacial es de $0,25^\circ$ de latitud y longitud. Los datos están disponibles desde 1979 hasta tres meses antes en tiempo real (Hersbach et al., 2020; Muñoz-Sabater et al., 2021). Consultados en línea en <https://www.ecmwf.int/>, consultado el 17 de julio de 2023.

ERA-Interim. Los datos del reanálisis provisional de ERA (Dee et al., 2011) con una resolución temporal de 3 horas y una resolución espacial de aproximadamente 75 km es usado como condiciones de frontera para forzar los RCMs durante el período de evaluación, como se explica en las siguientes secciones. Está disponible en <https://www.ecmwf.int> (consultado el 17 de julio de 2023).

2.3 Método

2.3.1 Clima

Se calculó la climatología de los ciclos anuales de temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación de la región durante el periodo histórico de 1981- 2013 con los datos obtenidos de Livneh y de 1981-2022 con los datos de

ERA5 para las dos regiones (indicadas en la Figura 6). Posteriormente se calculó la temperatura estacional de la temporada de crecimiento de la uva para vino (de abril a octubre) y la precipitación acumulada en invierno (de noviembre a abril). Por último, se aplicó un promedio ponderado por área para obtener series de tiempo para ambas regiones de la siguiente manera:

$$S = \frac{\sum_{i,j}^n \sum_{i,j}^m X_{ij} \cdot a_{ij}}{A}. \quad (1)$$

Donde S representa la serie de tiempo de cada uno de los dos dominios de temperatura o precipitación, los subíndices i y j son valores que corresponden a la posición de latitud y longitud de cada punto de la malla con tamaños n y m ; X_{ij} es la temperatura estacional o precipitación con dimensiones de tiempo, longitud y latitud, a_{ij} es el área de la malla correspondiente y A es el área total para cada región vitivinícola en la Figura 6. Dado que las dos regiones se caracterizan por un clima mediterráneo, los resultados en este trabajo también se obtienen como un promedio de las dos regiones como $(S_1 + S_2)/2$.

2.3.2 Economía

Para describir las características de la viticultura en Baja California se definieron seis variables descritas en la tabla 1, que sirven para clasificar las empresas dedicadas a la producción de vino. Estas variables son sugeridas por dependencias de seguimiento al desarrollo económico regional o definidas en trabajos previos relacionados con el desarrollo y competitividad de las empresas vitivinícolas de Baja California (González Andrade, 2015; González Andrade & Fuentes Flores, 2013; Sánchez Zepeda & Mungaray Lagarda, 2010). Para obtener esta información se diseñó una encuesta propia dirigida a las empresas de interés en este trabajo, ya que desafortunadamente no se encontró esa información en las dependencias o instancias correspondientes, gubernamentales o de sociedad civil. Considerando como población objetivo a

los productores vitivinícolas de la región se realizó un muestreo por medio de una encuesta a 59 bodegas vitivinícolas (Anexo 1). La encuesta estuvo compuesta por seis reactivos que satisfacen a las variables definidas en este trabajo y fue realizada vía telefónica a los encargados (o en su defecto al propietario) de cada bodega.

Tabla 1. Preguntas de la encuesta, criterios y nombre de las variables para el diagnóstico económico. El diseño y estructura de la encuesta es propia con base a los trabajos citados

Pregunta	Criterio	Definición de la variable	Variable
Año en que se fundó la empresa	Años practicando esta actividad	Secretaría de Turismo de Baja California	FUNDA
Líneas de producción	Tipo de infraestructura	Modo de elaboración, embotellado y almacenamiento. Adaptado de (González Andrade, 2015).	LPRO
Tipos de variedades	Temperatura promedio para desarrollo de variedades de uva	Clasificación de algunas variedades de uva según la temperatura de la temporada de crecimiento. Adaptado de (G. Jones, 2006).	TIVA
Tamaño de la empresa	Producción en cajas/año	Clasificación sugerida por (Meraz Ruiz & Maldonado Radillo, 2016).	TE
Alcance de su mercado	Alcance del mercado	Secretaría de Economía	MKD
Servicios que ofrecen	Tipos de servicios que ofrecen al público	Secretaría de Turismo de Baja California	SER

Con los datos obtenidos de las encuestas se realizó una caracterización mediante agrupamiento jerárquico con base a la similitud de variables (Romero, 1996) usando el coeficiente de Gower.

$$W_j = \frac{(1/r_j)}{\sum_{i=1}^n (1/r_j)}. \quad (2)$$

Donde r_j es el lugar o posición que ocupa el criterio j -ésimo en la clasificación establecida anteriormente (Tabla 1) y n es el número total de objetos

analizados. W_j es el coeficiente de Gower con valores entre 0 y 1, donde 0 indica mínima similitud y 1 indica máxima similitud entre los objetos.

El coeficiente de Gower se calcula considerando los criterios de las variables de cada par de objetos y calculando el promedio ponderado de sus similitudes, dando como resultado una matriz de similitud que representa las similitudes/diferencias por pares entre los objetos en el conjunto de datos y un agrupamiento jerárquico de los objetos analizados (Romero, 1996). En este trabajo, para calcular el coeficiente de Gower los objetos son las bodegas vitivinícolas entrevistadas (Tabla 2).

Tabla 2. Valores del coeficiente de Gower para las variables y criterios propuestos en la Tabla 1


Variable	Niveles	Rango	W
FUNDA	Antigua	Antes de 1990	0.55
	Madura	Entre el 1990 y 2010	0.27
	Joven	Después de 2010	0.18
LPRO	Gran reserva	Más de 24 meses en barrica	0.39
	Gran reserva y reserva		0.19
	Gran reserva, reserva y joven		0.13
	Gran reserva y joven		0.10
	Reserva		0.08
	Reserva y joven	De 18 a 24 meses en barrica	0.06
	Joven	Hasta 12 meses en barrica	0.05
TIVA		15-17°C	0.39
		15-17 y 17-19°C	0.19
		15-17, 17-19 y 19-24°C	0.13
		15-17 y 19-24°C	0.10
		17-19°C	0.08
		17-19 y 19-24°C	0.06
TE	Grande	P > 50000 cajas	0.48
	Mediana	P de 25,000 a 50,000	0.24
	Chica	P de 5,000 a 25,000	0.16

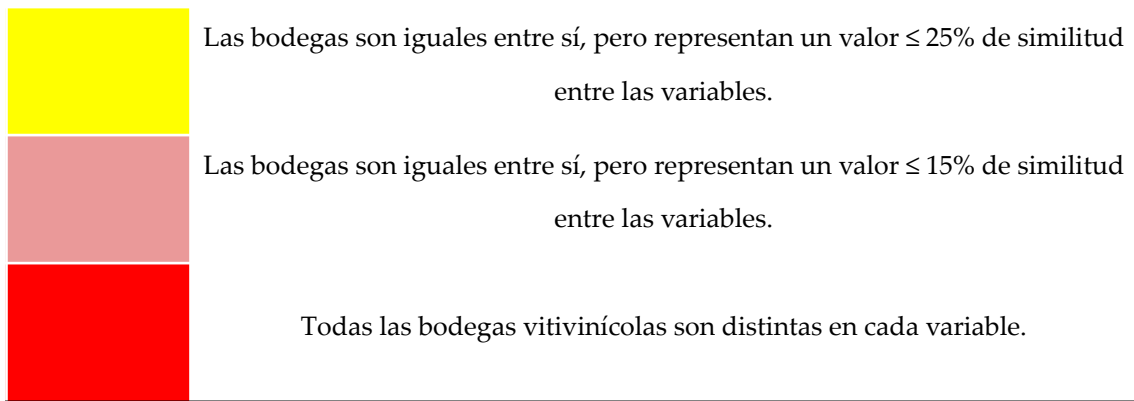
	Micro	P <5000 cajas	0.12
MKD	Internacional		0.48
	Nacional		0.24
	Regional		0.16
	Local		0.12
SER	Tradicional	Tradicional	0.39
		Tradicional y Complementario	0.19
		Tradicional, Complementario y Alternativo	0.13
		Tradicional y Alternativo	0.10
	Complementario	Complementario	0.08
		Complementario y Alternativo	0.06
	Alternativo	Alternativo	0.05

En el caso de la variable SER (servicios que ofrecen), los clasificados como tradicionales se refieren solo a servicios de cata, degustación y venta de vinos. Los complementarios, son aquellos que ofrecen además de cata, degustación y venta también ofrecen gastronomía, hospedaje, servicio para reuniones privadas, entretenimiento y aventura. Por último, los servicios complementarios ofrecen mercado orgánico y ganadería (más la cata, degustación y venta de vino).

Para determinar el agrupamiento jerárquico de las bodegas considerando su grado de similitud con respecto a las variables antes mencionadas (representado por un dendrograma), se usó el método de análisis colorimétrico (Camelo-Méndez et al., 2012) que se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Colores y características de similitud entre las bodegas encuestadas

Color	Características
	Todas las bodegas o la mayoría son iguales en cada variable.



Donde el color verde representa que todas las bodegas o la mayoría son iguales en cada variable, el amarillo y el rosa indican que las bodegas son iguales entre si, pero no son la mayoría en cada variable. Por último, el color rojo representa que todas las bodegas son distintas en cada variable. En el anexo B se muestran las tablas de similitud de cada grupo del dendrograma.

2.4 Resultados

2.4.1 Características climáticas

La figura 8 muestra los ciclos anuales de temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación a partir de las dos bases de datos usadas, Livneh, considerada como observación o referencia en este trabajo y el reanálisis ERA5 como una base extra. Se puede observar que las dos bases tienen ciclos anuales parecidos, aunque con algunas diferencias. Las dos muestran los valores máximos de temperatura en verano y los mínimos en invierno, mientras que la precipitación es mayor durante la temporada invernal (de noviembre a abril), característica del clima mediterráneo.

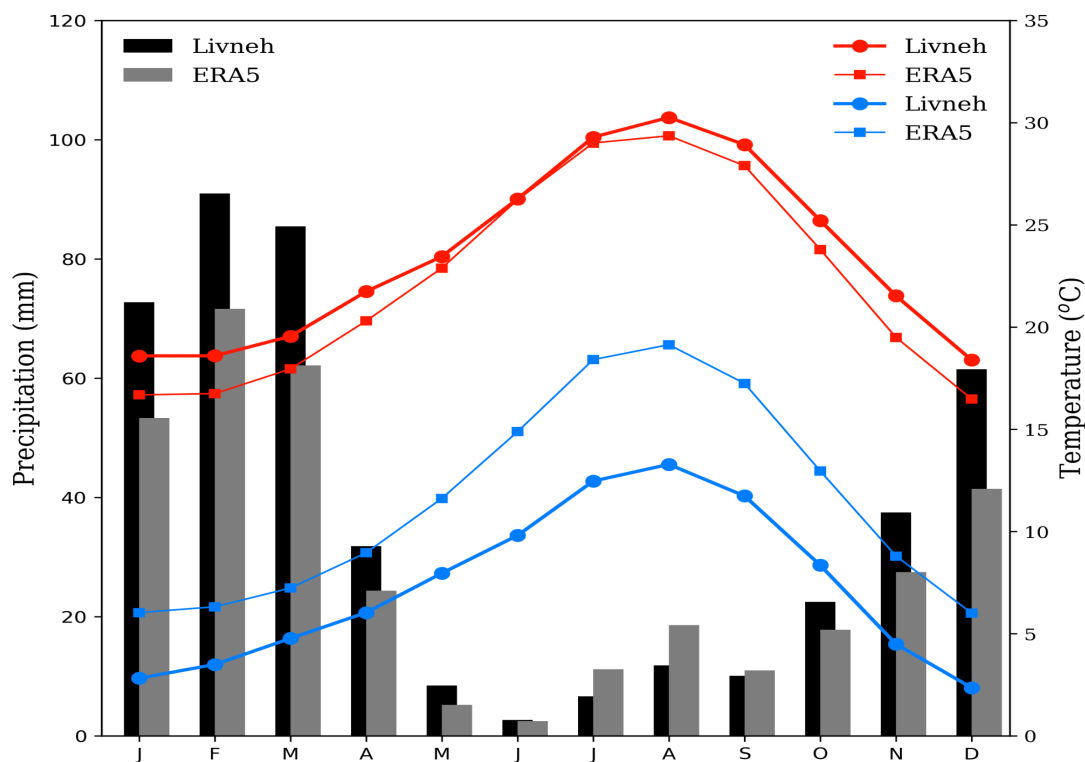


Figura 8. Ciclo anual promedio de temperatura máxima (color rojo), temperatura mínima (color azul) y precipitación (barras) de las regiones vitivinícolas de Baja California durante 1981-2013 utilizando observaciones de Livneh y valores de reanálisis ERA5 durante 1981-2022.

En el caso de la temperatura máxima, las observaciones (Livneh) y los datos de reanálisis (ERA5) muestran el mismo comportamiento durante los meses de verano, sin embargo, durante los meses de invierno ERA5 tiene valores más altos que Livneh, sin que estos valores pudieran afectar el periodo de dormancia de la uva (G. V. Jones et al., 2012). Livneh muestra valores mayores durante el invierno, mientras que ERA5 sobrestima ligeramente la precipitación durante el verano, lo que pudiera afectar en la etapa de crecimiento y la maduración de la uva (Crespin et al., 1987).

Como se mencionó anteriormente, las condiciones favorables para la producción de uva para vino se caracterizan por una temperatura media de la temporada de crecimiento (GST, por sus siglas en inglés) entre 12° y 22°C, como en los estudios de Castillo et al. (2023) y G. V. Jones & Goodrich (2008). En la Tabla 4 se indica que la GST en Baja California varía entre 17° y 20.2°C

según las observaciones de Livneh; Mientras tanto, ERA5 es aproximadamente 1°C más cálido, aunque sigue siendo adecuado para la viticultura.

Tabla 4. Estadísticas descriptivas de las características climáticas de las regiones vitivinícolas de Baja California durante 1981-2013 usando observaciones de Livneh (valores del reanálisis ERA5 entre paréntesis durante 1981-2022). El error de sesgo medio (MBE) es la diferencia de ERA5 en relación con Livneh. Las tendencias se calcularon usando la estimación de la pendiente de 'Sen' (Sen, 1968). Las tendencias que fueron significativas con un nivel de confianza del 95% están marcadas con un asterisco, obtenidas con la prueba de Mann-Kendall (Kendall, 1948)

Variable	Mean	MBE	Std	Min	Max	Trend/Decadal
Growing season maximum temperature (Tx, °C)	26.5 (25.9)	-0.8	0.9 (0.7)	24.8 (24.5)	28.5 (27.6)	0.10 (0.31 *)
Growing season average temperature (T, °C)	18.3 (19.9)	1.0	0.7 (0.6)	16.8 (18.7)	20.1 (21.4)	0.04 (0.23 *)
Growing season minimum temperature (Tn, °C)	10.4 (14.9)	4.7	0.8 (0.5)	8.4 (13.8)	12.8 (16.2)	-0.06 (0.23 *)
Winter precipitation (Pre, mm/season)	364.1 (261.4)	-97.2	194.9 (132.16)	91.9 (69.6)	852.2 (620.4)	-21.65 (-19.72)

El sesgo más grande entre las dos bases de datos se observa en la temperatura mínima, donde Livneh presenta valores de 10.4°C y ERA5 presenta una diferencia positiva de ~4°C (Figura 9b). Para el periodo de crecimiento en el área de estudio se observa una tendencia positiva de la temperatura máxima, que es más apreciable en los datos de ERA5 con una tasa de incremento en la temperatura máxima de 0.31°C por década (Tabla 4 y Figura 9a). Lo mismo se observa para la temperatura media y mínima, aunque en este caso la tendencia es menor y en los datos de Livneh es muy baja o incluso negativa. En el caso de la precipitación invernal ambas bases de datos muestran una disminución (Tabla 4 y Figura 9c) para sus respectivos períodos, aunque en las dos series no se encontró ninguna tendencia que fuera estadísticamente significativa posiblemente efecto de la alta dispersión de los

datos (132.1 mm para Livneh y 194.9 mm para ERA5), además la serie de datos es corta.

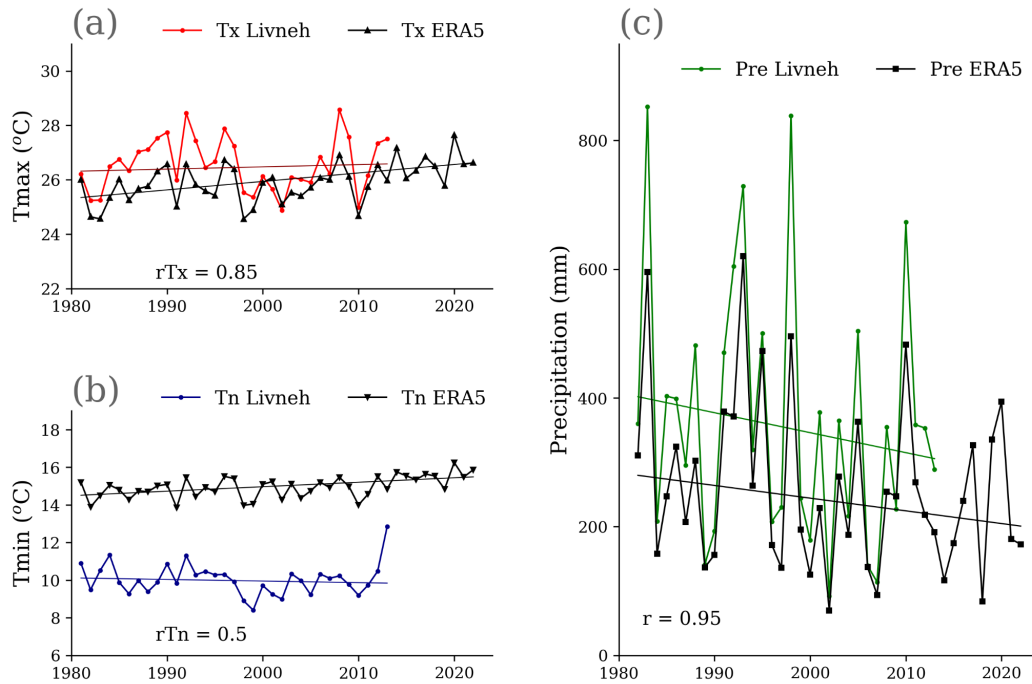
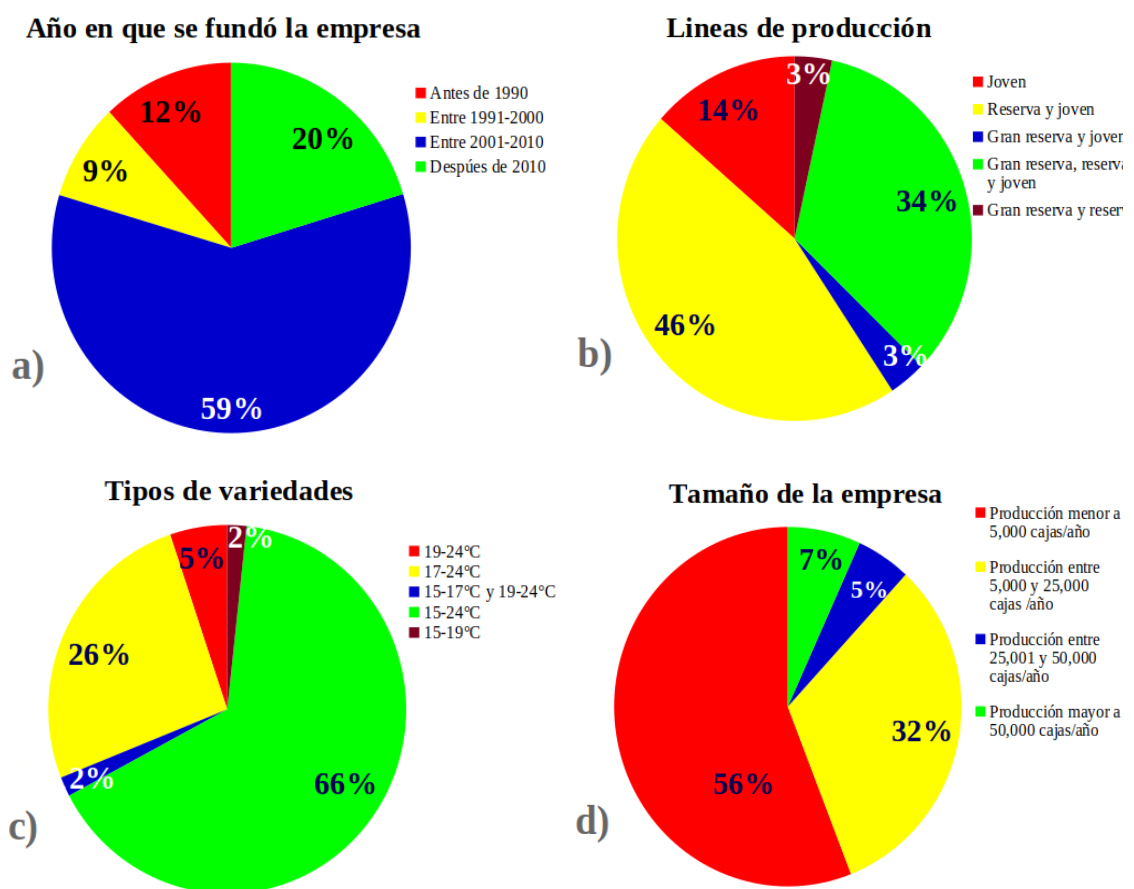


Figura 9. Temperatura de la temporada de crecimiento y precipitación invernal. (a) Temperaturas máximas y (b) mínimas (Tx, Tn) del período de crecimiento (abril-octubre) y (c) precipitación invernal (noviembre-abril). Las correlaciones (r) entre las observaciones de Livneh y las series temporales de reanálisis de ERA5 se encuentran a continuación en la figura. Todas las correlaciones son estadísticamente significativas con un nivel de confianza del 95%.

La temporada de invierno se caracteriza por un promedio de 364 mm de precipitación acumulada (Tabla 4, Figura 9c). El nuevo análisis presenta un déficit de ~100 mm, pero ambos conjuntos de datos muestran tendencias similares (-20mm/década, no significativo). Es importante mencionar que el período de las observaciones de Livneh es nueve años menor que el del reanálisis, y esto podría tener implicaciones para la diferencia en las tendencias estadísticas en ERA5, pero no para los modelos de regresión, ya que también interesan las variaciones interanuales.

2.4.2 Análisis de la viticultura de Baja California

Además de los factores ambientales descritos anteriormente, la productividad de la uva para vino también está influenciada por la dinámica económica regional (Miranda et al., 2022). La Figura 10 muestra el análisis descriptivo elaborado a partir de las encuestas realizadas a las empresas vitivinícolas de Baja California.



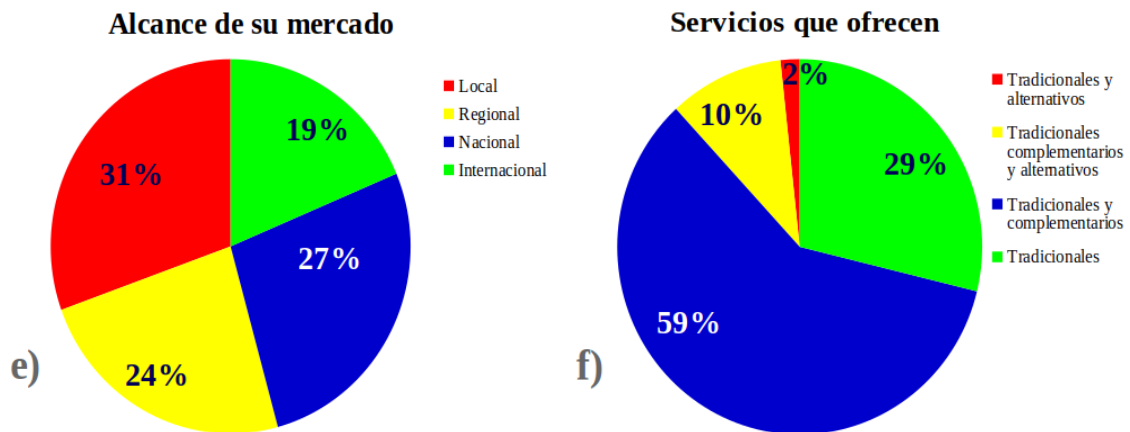


Figura 10. Análisis descriptivo de la viticultura en Baja California. (a) Año en que se fundó la empresa. (b) Líneas de producción. (c) Tipos de variedades basados en relaciones entre los requisitos fenológicos y las temperaturas promedio de la temporada de crecimiento (Jones, 2006), (d) Tamaño de la empresa. (e) Alcance de su mercado y (f) Servicios que ofrecen (f).

Examinando las variables para entender la dinámica económica y su impacto en la industria del vino se puede observar en la Figura 10a que el 59% de las bodegas encuestadas se fundaron entre 2001 y 2010. Un 20% se fundaron después de 2010, 9% entre 1991 y 2000 y 12% antes de 1990. Por su parte, las líneas de producción de vino (Figura 10b) con mayor presencia en Baja California son reserva y joven con un 46%, seguido de gran reserva, reserva y joven (34%) y un 14% de línea de producción joven.

Considerando la clasificación de algunas variedades de uva según la temperatura de la temporada de crecimiento (G. Jones, 2006), aquellas con mayor presencia en la región, son las que mejor se adaptan a temperatura media de 15°C - 24°C y constituyen un 66% (Figura 10c), por ejemplo: Chardonnay, Sauvignon Blanc y Chenin Blanc (variedades blancas) y Cabernet Sauvignon, Grenache y Nebbiolo (variedades tintas). Mientras que el segundo tipo de variedades más representativas en la región de estudio (representan un 26%) son Tempranillo, Merlot y Syrah, cuya temperatura durante la temporada de crecimiento oscila entre 17°C-24°C.

Por otro lado, al analizar el tamaño de las bodegas de acuerdo con las cajas producidas por año (Figura 10d), se encontró que el 56% tienen una capacidad

para producir menos de 5,000 cajas por año; 32% son empresas chicas con una producción entre 5,000 a 25,000 cajas por año y solo el 7% son empresas grandes cuya producción supera las 50,000 cajas por año, como por ejemplo L.A. Cetto y Bodegas de Santo Tomás. Con respecto al alcance de mercado (Figura 10e), existe una distribución casi uniforme; el mercado local tiene un porcentaje de 31% en tanto que el mercado regional, nacional e internacional representan un 24%, 27% y 19%, respectivamente.

Por último, en el caso de los servicios que ofrecen se encontró que el 59% ofrecen servicios tradicionales y alternativos, el 29% solo ofrecen servicios tradicionales y el 10% ofrecen servicios de los tres tipos: tradicionales, complementarios y alternativos.

2.4.3 Matriz de similitud entre las variables y agrupamiento jerárquico

La Figura 11 muestra la matriz de similitud por pares entre variables según el coeficiente de Gower (Romero, 1996). Cada celda de la matriz contiene un valor de similitud entre dos variables analizadas, que va de 0 (completamente diferente) a 1 (completamente similar).

Al comparar por pares las variables se pudo observar que existe una correlación positiva y estadísticamente significativa más alta entre el tamaño de la empresa (TE) y el año de fundación (FUNDA), con un coeficiente de correlación de 0.64. También la relación es fuerte entre el tamaño de la empresa y el alcance del mercado (MKD), donde se obtuvo un coeficiente de 0.60. De las variables analizadas también se observó que el año de fundación de las empresas tiene correlación con el alcance de mercado y las líneas de producción, esto es, entre más antigua es una empresa tiene mayor alcance en su mercado y sus líneas de producción son mayores.

En la matriz de correlación también se pueden obtener aquellas variables que no tienen mayor correlación con sus pares, un ejemplo claro es la variable que representa los servicios ofrecidos por las empresas encuestadas. La relación estadística más fuerte se encontró entre SER y el año de fundación de las empresas (negativo y no significativo), lo que implicaría que las empresas más consolidadas ofrecen menos servicios al público.

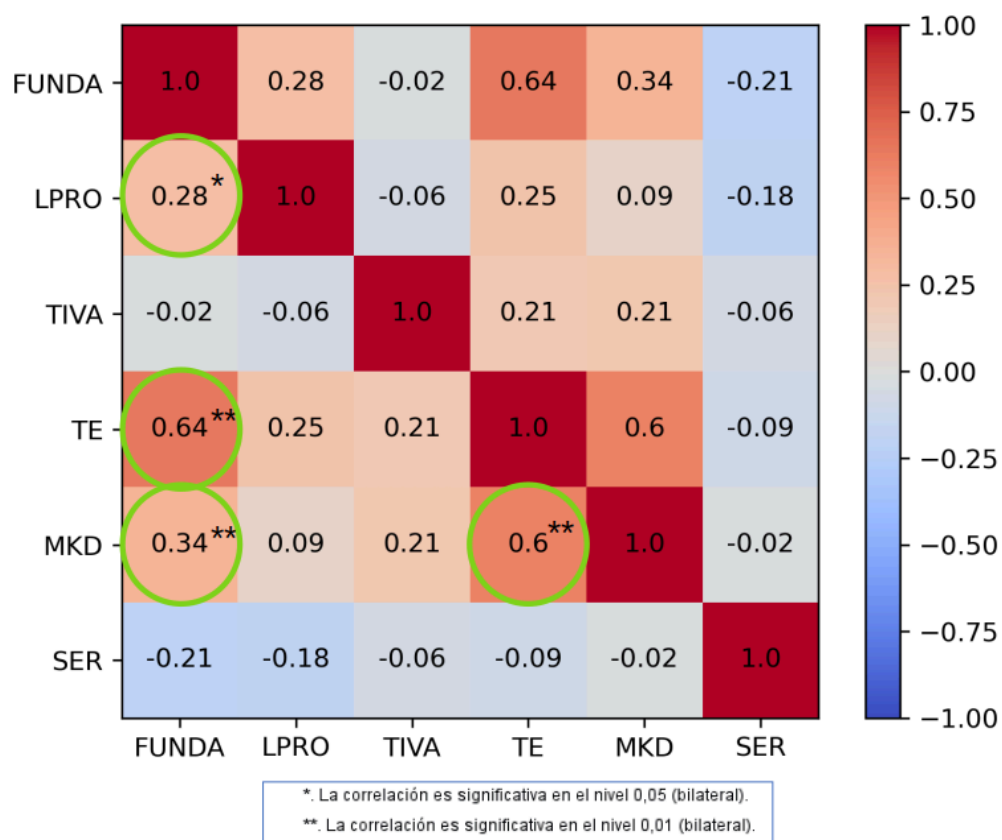


Figura 11. Matriz de similitud por pares entre variables según el coeficiente de Gower (Romero, 1996).

Con los índices de Gower obtenidos se realizó un agrupamiento jerárquico (Figura 12) que implica formar grupos a partir de la matriz de similitud que contiene las distancias entre los distintos elementos a agrupar (García et al., 2021). En este caso, la similitud viene dada a partir de los indicadores que se definieron en la Tabla 2, dando como resultado el agrupamiento de las bodegas

en un dendograma (Figura 12) según patrones de similitud entre las variables establecidas.

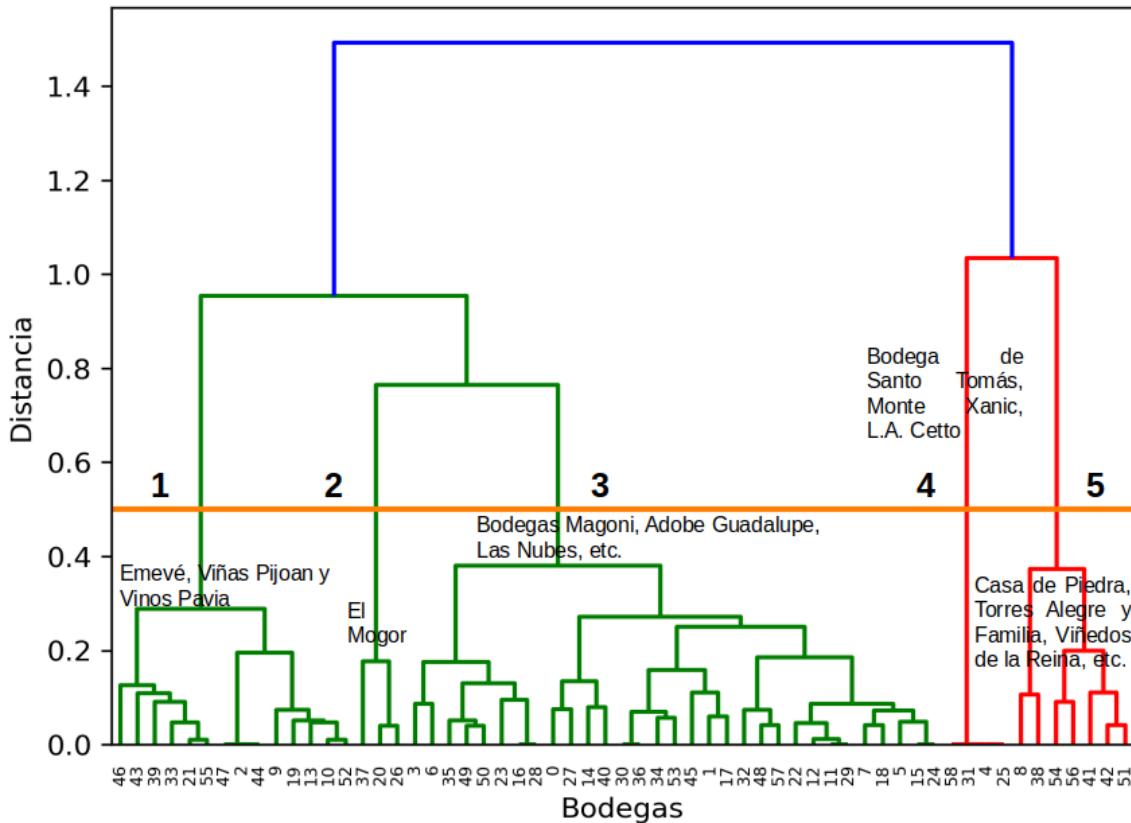


Figura 12. Dendrograma jerárquico de las 59 bodegas vitivinícolas consultadas.

En el dendograma se puede observar que, a partir de los índices antes descritos, el comportamiento estratégico de las bodegas vitivinícolas analizadas se expresa en cinco agrupamientos principales que se resumen en la Tabla 5. El primer grupo está constituido por 14 bodegas cuya principal característica, según indica el análisis, es que el 100% de ellas solo ofrecen servicios tradicionales y la mayoría se fundaron entre 2001 y 2010, son empresas muy jóvenes, entre ellas se encuentran Emevé, Viñas Pijoan y Vinos Pavía. El segundo grupo cuenta con tres bodegas, las cuales se fundaron antes de 1990 y su producción es menor a 5,000 cajas por año (Santo Domingo, El Mogor y La Casa de Doña Lupe).

Tabla 5. Grupos y características de agrupamiento de 59 bodegas vitivinícolas encuestadas

Grupo	Bodegas	FUNDA	LPRO	TIVA	TE	MKD	SER
1	14	92% de las vinícolas se fundaron entre 2001-2010	57% Reserva y joven	57% cultivan variedades tintas y blancas (15°C-24°C)	64% son microempresas (p<5,000 cajas/año)	42% nacional	100% ofrecen servicios tradicionales
2	3	100% de las vinícolas se fundaron antes de 1990	66% producen vinos de gran reserva, reserva y joven	66% cultivan variedades tintas (17°C-24°C)	100% son microempresas (p<5,000 cajas/año)	Su alcance de mercado nacional, regional y local	66% ofrecen servicios tradicionales y complementarios
3	31	55% de las vinícolas se fundaron entre 2001-2010.	45% Reserva y joven. 32% Gran reserva, reserva y joven.	70% Varietales tintas y blancas (15°C-24°C)	65% son microempresas (p<5,000 cajas/año).	42% Mercado local, resto mercado regional y nacional.	87% Ofrecen servicios tradicionales y complementarios.
4	4	100% de las vinícolas se fundaron antes de 1990	100% producen vinos de gran reserva, reserva y joven	100% cultivan variedades blancas y tintas (15°C-24°C)	100% son empresas grandes (p<50,000 cajas/año)	100% Su alcance de mercado internacional	100% ofrecen servicios tradicionales y complementarios
5	7	71% de las vinícolas se fundaron entre 2001 y 2010	57% producen vinos de reserva y joven	43% cultivan variedades blancas y tintas (15°C-24°C) 43% cultivan tintas (17°C-24°)	85% son empresas chicas (p entre 5,000 y 25,000 cajas/año)	100% su alcance de mercado internacional	57% ofrecen servicios tradicionales y complementarios 43% ofrecen servicios tradicionales

El tercer grupo es el más nutrido, ya que lo conforman 31 bodegas; su principal característica entre ellas es que la mayoría ofrece servicios tradicionales y

complementarios. Algunas bodegas que conforman este grupo son: Las Nubes, Bodegas Magoni y Adobe Guadalupe, entre otros) . El cuarto grupo lo forman cuatro casas vitivinícolas que coinciden en todas las variables. Es decir, son grandes empresas (L.A Cetto, Santo Tomás, Monte Xanic y Pedro Domec) que se fundaron antes de 1990 y su producción es mayor a 50,000 cajas/año, cultivan variedades de uvas blancas y tintas, el alcance de mercado es internacional y ofrecen servicios tradicionales y complementarios. Por último, el quinto grupo está constituido por siete bodegas, cuyas principales características son que el alcance de su mercado es internacional y la mayoría son empresas chicas con una producción entre 5,000 y 25,000 cajas/año (Torres Alegre y Familia, Casa de Piedra y Viñedos de la Reina, entre otras).

2.5 Discusiones y conclusiones

En este capítulo se realizó el análisis de las condiciones climáticas de las últimas décadas en las principales zonas de producción de uva para vino del estado de Baja California. Además, se diseñó y aplicó una encuesta dirigida a 59 empresas vitivinícolas en la región de estudio, cuyos resultados sirvieron para describir el desarrollo de la viticultura regional usando un método agrupamiento jerárquico de las empresas que contestaron la encuesta.

Los resultados mostraron que durante la temporada de crecimiento de la uva para vino en el período de 1981 al 2022 las principales regiones vitivinícolas de Baja California se caracterizan por tendencias positivas en la temperatura, como lo encontrado en trabajos anteriores (Cavazos et al., 2020; Pavia et al., 2009; Wang et al., 2018); en los resultados aquí presentados esta tendencia es más clara en la temperatura máxima con los datos obtenidos de ERA5. La precipitación mostró tendencias negativas con las dos bases de datos usadas, aunque al igual que trabajos previos esta tendencia no fue estadísticamente significativa (Cavazos et al., 2020; Wang et al., 2018). Si se comparan estos datos en el mismo periodo con las observaciones del rendimiento de la uva

para vino se observa una reducción del 52% en las últimas décadas. En el siguiente capítulo se mostrará que las tendencias observadas, principalmente en temperatura, están relacionadas con el rendimiento de la uva para vino.

De los resultados de la encuesta se observó que las variedades sembradas más comunes en la región son aquellas que se adaptan a temperaturas medias durante la etapa de crecimiento de 15°C a 24°C (chardonnay, sauvignon blanc, chenin blanc, cabernet sauvignon, tempranillo y merlot), con 66% de los cultivos, y un 26% que se adaptan al rango de temperatura media de 17°C a 24°C, como por ejemplo, syrah, grenache, nebbiolo y malbec. Es decir, 92% de las variedades en Baja California desarrollan su fruto donde el tope superior del rango de temperatura media ideal para el crecimiento es de 24°C, y, como se mencionó anteriormente, temperaturas altas pueden generar un desarrollo prematuro del fruto, así que el incremento de la temperatura media registrada en el periodo de estudio puede tener efectos en el rendimiento de las plantas (G. Jones, 2006).

Por otro lado, de los resultados del agrupamiento jerárquico se observó que sólo un 12% de las empresas se fundaron antes de 1990 (Grupo 2 y Grupo 4), mientras que el 59% de estas se establecieron entre 2001 y 2010, incluso las empresas fundadas en las últimas dos décadas representan el 89.9% de las bodegas entrevistadas. Este crecimiento de la última década coincide con la integración del enoturismo en la región (Reyes Orta et al., 2018). Usando el coeficiente de Gower se observó que también el año de fundación es el que más se relaciona con los otros criterios que se formularon para las bodegas. Por ejemplo, la correlación más fuerte entre el año de fundación fue con el tamaño de la empresa, ya que aquellas de creación más antigua también fueron las que tenían un tamaño más grande. Además, se encontró una correlación grande entre el año de fundación y las líneas de producción, además del alcance de su mercado.

A lo anterior se puede agregar que el alcance del mercado es muy diverso, ya que existen bodegas que cuentan con una producción chica y el alcance de su mercado es internacional, consistente con el trabajo de Sánchez Zepeda & Mungaray Lagarda (2010). Además, ante la disminución de la producción de uva en Baja California en la década de los 2000, las nuevas empresas que se están incorporando en Baja California resaltan en cuanto a la diversificación de servicios, acorde a Reyes-Orta et al. (2016). Esto sugiere que la economía regional también juega un papel en la productividad de la uva en Baja California, de acuerdo con otros trabajos, como González Andrade, (2015), y los realizados en otras regiones, como el de Riekötter & Hassler. (2022).

En resumen, en este capítulo se encontró que la región de estudio se caracteriza por el incremento de la temperatura media y máxima con una tendencia negativa de la precipitación en el periodo de estudio. Del agrupamiento de las empresas entrevistadas se encontró que un gran porcentaje de las variedades de uvas para vino en las regiones vitivinícolas de Baja California requieren que su temperatura media máxima no supere los 24°C durante la etapa de crecimiento, por lo que el incremento en la temperatura puede estar relacionado con una disminución del rendimiento. Además, se encontró que el año de fundación (variable FUNDA) es la variable que más influye en el tamaño de la empresa, las líneas de producción, oferta de servicios y el alcance del mercado que tienen las bodegas vitivinícolas de Baja California.

Capítulo 3. Relación entre el rendimiento del cultivo de la uva para vino con el clima y la economía

3.1 Introducción

El rendimiento del cultivo de la uva está estrechamente relacionado con el clima y la dinámica económica de la región de estudio (G. Jones, 2006; Sánchez Zepeda & Mungaray Lagarda, 2010). Por un lado, la temperatura y la precipitación son factores importantes para el crecimiento, maduración, salud, cantidad y calidad del cultivo (G. V. Jones, 2003). Mientras que los factores económicos, como los costos de mano de obra y las condiciones económicas de la región, pueden afectar los precios de la uva y la rentabilidad de los productores (González Andrade, 2015; Sánchez Zepeda & Mungaray Lagarda, 2010). Es decir, el clima determina las condiciones básicas para el crecimiento y la calidad de la uva, mientras los factores económicos impactan a la rentabilidad del cultivo para los productores.

Algunos estudios han usado modelos relacionados con el clima para predecir el rendimiento agrícola y la influencia de algunas variables climáticas en las regiones aptas para la plantación de uva (De Orduna, 2010; Mori et al., 2007; White et al., 2006). Otros trabajos se han centrado en evaluar el efecto de las variaciones de temperatura durante la etapa de crecimiento de la uva y, en consecuencia, el efecto sobre su rendimiento (Camps & Ramos, 2012; Cook & Wolkovich, 2016; De Orduna, 2010; Duchêne et al., 2010; Ferrise et al., 2016; Hannah et al., 2013; G. Jones et al., 2005; Santillán et al., 2019; Schultz & Jones, 2010; Van Leeuwen & Darriet, 2016).

En este capítulo se hace un análisis de la relación entre el rendimiento de la uva para vino con el comportamiento de variables climáticas y económicas de la región. Para lo anterior se realizaron regresiones lineales usando temperatura de la etapa de crecimiento, precipitación invernal y variables económicas que influyen en el rendimiento de la uva como el salario mínimo estatal y el valor precio de la uva.

3.2 Datos

3.2.1 Climáticos

Al igual que en el capítulo anterior para las evaluaciones climáticas se usaron datos mensuales de temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación obtenidas de las bases de datos de Livneh y el reanálisis ERA5, al igual que lo descrito en la sección 2.2.1.

3.2.2 Modelos climáticos regionales: RCA y RegCM

Se obtuvieron datos mensuales de precipitación y temperatura máxima y mínima para en el periodo de 1981 al 2005 (periodo total disponible) de las evaluaciones históricas de los modelos climáticos regionales RCA y RegCM. Estos modelos han sido evaluados para la región estudiada (Castillo et al.,

2023; Cavazos et al., 2020). A continuación se da una breve introducción a cada uno de ellos, posteriormente en la sección 4.2 se describirán características complementarias correspondientes al siguiente capítulo.

RegCM4. Modelo Climático Regional versión 4.7 (Giorgi et al., 2012). Este es un modelo regional de código abierto desarrollado y actualizado por el Earth System Physics of the International Center for Theoretical Physics (ICTP por sus siglas en inglés) en Trieste, Italia. La versión hidrostática a 25 km (latitud y longitud) de resolución horizontal, está disponible para el dominio CORDEX-CAM en <https://gforge.ictp.it/gf/project/regcm/frs> (consultado el 12 de junio de 2022) que cubre la región de estudio de interés en este trabajo.

RCA4. The Rossby Center Regional Climate Model (RCA, por sus siglas en inglés) es un modelo regional del Instituto Meteorológico e Hidrológico Sueco (SMHI; www.smhi.se, consultado el 11 de diciembre de 2023). Es un modelo hidrostático basado en el modelo numérico de predicción meteorológica HIRLAM (Samuelsson et al., 2011). Este modelo se ha corrido para diferentes dominios con el proyecto CORDEX (Giorgi et al., 2009; Giorgi & Gutowski Jr, 2015) con una resolución espacial horizontal de 50 km (latitud, longitud). Disponible en <https://gforge.ictp.it/gf/project/regcm/frs> (consultado el 12 de junio de 2022)

Las condiciones de frontera de los modelos descritos anteriormente son obtenidas de los siguientes modelos globales del Proyecto de Intercomparación de Modelos Climáticos Fase 5 (CMIP5, por sus siglas en inglés):

HadGEM2-ES. Hadley Center Global Environment Model version 2 (Collins et al., 2011).

MPI-ES. Max Planck Institute Earth System Model (Giorgetta et al., 2013).

GFDL-ESM2M. Geophysical Fluid Dynamics Laboratory Earth System Model (Dunne et al., 2012).

3.2.3 Datos económicos

Los datos económicos usados en este trabajo consisten en el salario mínimo y el precio de la uva. A continuación se proporciona información sobre los datos:

El salario mínimo real para Baja California fue obtenido de la Comisión Nacional del Salario Mínimo (CONASAMI), disponible en línea en <https://www.gob.mx/conasami/documentos/tabla-de-salarios-minimos-generales-y-profesionales-por-areas-geograficas> (consultado el 9 de octubre de 2023).

El precio de la uva para vino se obtuvo del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), disponible en línea en <https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/produccion-agricola-33119> (consultado el 16 de octubre de 2023).

Cabe mencionar que tanto los salarios como los precios corresponden al período de 1981 a 2022 y están deflactados al 2018 como año base.

3.3 Método

Se realizaron dos modelos generales de regresión lineal: uno se usa para estimar la relación entre el clima y la economía sobre el rendimiento anual de la uva para vino (Ecuación 3) y el otro, sólo considera el efecto del clima sobre el rendimiento del cultivo (Ecuación 4). Las funciones lineales integran la principal influencia climática y factores determinantes económicos que aproximan el rendimiento esperado de uva para vino en Baja California.

La temporada de crecimiento (abril-octubre) es una etapa importante dentro de la fenología de la uva, ya que coincide con el crecimiento y maduración de las bayas y la cosecha de la uva, mientras que las precipitaciones invernales (noviembre-abril) favorecen la disponibilidad de agua para el siguiente ciclo de cultivo (G. V. Jones et al., 2012). Se ha demostrado que los modelos de regresión lineal se ajustan adecuadamente para modelar la respuesta del rendimiento de la uva (Lobell et al., 2006). Después de probar la contribución de las variables individualmente, los dos modelos de rendimiento de uva para vino se establecieron de la siguiente manera:

$$Y = F(T_x, T_n, Pre, W, P) \quad (3)$$

$$Y = F(T_x, T_n, Pre). \quad (4)$$

En las ecuaciones (3) y (4), Y representa el rendimiento de la uva para vino en función (F) de T_x y T_n , que son las temperaturas máximas y mínimas promedio durante la temporada de crecimiento de la uva para vino; Pre es la precipitación invernal antecedente a la etapa de crecimiento. Mientras que, las variables económicas en la ecuación (3) son el salario mínimo anual (W) y el precio de la uva (P) para el estado de Baja California durante el período de estudio. La importancia de la ecuación (4) es que para los escenarios futuros no se tienen datos económicos, por lo que sólo se analiza el impacto climático.

En el caso de las variables económicas se tomó el salario mínimo real y el precio de la uva como las variables más representativas de los costos de producción y las interacciones en el mercado respectivamente. Los costos laborales representan más del 50% de los costos operativos totales y el esquema de bajos precios de la uva influye en la calidad de la uva para vino (González Andrade, 2015; González Andrade & Fuentes Flores, 2013; Riekötter & Hassler, 2022; Romero Azorin & Garcia Garcia, 2020). Todas las variables son positivas y es importante mencionar que antes de desarrollar los

modelos de regresión, las variables fueron normalizadas con respecto a su valor máximo.

Incluir demasiadas variables puede conducir fácilmente a una precisión de predicción inadecuada (por ejemplo, sobreestimación de la varianza), lo que dificulta la interpretación del modelo (Gay et al., 2006; Lobell et al., 2006). Por esta razón es necesario seleccionar adecuadamente las variables predictoras en el desarrollo de los modelos de regresión. Las variables más relevantes para el cultivo se eligieron mediante regresiones independientes entre el rendimiento de la uva y las variables climáticas y económicas, al igual que otros estudios (González Andrade & Fuentes Flores, 2013). Además, se hicieron pruebas de multicolinealidad para evitar el sobreajuste (Gay et al., 2006; Shrestha, 2020).

Por último, es importante mencionar que los modelos de regresión presentados en este trabajo se obtuvieron sin eliminar la tendencia de los datos anuales, usando las variables climáticas de Livneh (observaciones) y del reanálisis de ERA5 de forma independiente, para evaluar la habilidad del reanálisis en relación con las observaciones.

3.4. Resultados

3.4.1 Modelos de regresión

La Tabla 6 muestra los polinomios resultantes de las regresiones lineales que relacionan el rendimiento de uva para vino (ton/ha) con la temperatura estacional media de la etapa de crecimiento y precipitación invernal (T_x , T_n y Pre) con datos de Livneh (observaciones) y ERA5 (reanálisis), así como las variables económicas: el salario mínimo anual (W) y precio de la producción de uva para vino (P). Se presentan los modelos de regresión para los dos casos de estudio, el primero incluyendo las variables económicas y el segundo sin agregar su efecto. Además, se muestran los modelos de regresión para las

salidas de evaluación de los modelos climáticos regionales (RegCM y RCA). Es importante recalcar que, en el caso de las evaluaciones históricas de los RCMs, fueron forzados con datos del reanálisis ERA-Interim para el periodo 1981 al 2005 (llamado periodo de referencia de aquí en adelante), por lo que estos modelos de regresión solo fueron elaborados y evaluados para este periodo. A continuación se muestra la comparación entre el rendimiento observado y el rendimiento calculado con los modelos de regresión.

Tabla 6. Modelos de regresión de rendimiento de uva para vino(ton/ha) para la región mediterránea de Baja California utilizando información climática estacional media (T_x , T_n y Pre) de Livneh (obs) y ERA5 (reanálisis), salarios anuales (W) y precios (P) de la producción de uva para vino durante 1981-2013. También se presentan los modelos de regresión para los modelos climáticos regionales (RegCM y RCA) forzados con ERA-Interim y la media del ensamble para la línea base (1981-2005)

Bases de datos	Ecuación – Variables climáticas y económicas
Livneh	$Y = 2.8 \times 10^4 - 1.5 \times 10^4 T_x - 6.6 \times 10^3 T_n + 2.3 \times 10^3 Pre + 491W - 2.7 \times 10^3 P$
ERA5	$Y = 5.6 \times 10^4 - 2.8 \times 10^4 T_x - 2.1 \times 10^3 T_n + 2.5 \times 10^3 Pre + 565W - 5.0 \times 10^3 P$
RegCM-EI	$Y = 2.8 \times 10^4 - 1.7 \times 10^4 T_x - 3.3 \times 10^3 T_n + 1.9 \times 10^3 Pre + 432W - 2.9 \times 10^3 P$
RCA-EI	$Y = 4.5 \times 10^4 - 2.6 \times 10^4 T_x - 2.5 \times 10^3 T_n + 1.9 \times 10^3 Pre + 432W - 2.9 \times 10^3 P$
Ens-mean	$Y = 1.0 \times 10^4 - 981T_x - 1.0 \times 10^4 T_n + 4.9 \times 10^6 Pre + 432W - 2.9 \times 10^3 P$
Ecuación – Sólo variables climáticas	
Livneh	$Y = 2.7 \times 10^4 - 1.5 \times 10^4 T_x - 6.6 \times 10^3 T_n + 2.2 \times 10^3 Pre$
ERA5	$Y = 5.4 \times 10^4 - 2.9 \times 10^4 T_x - 2.1 \times 10^3 T_n + 2.5 \times 10^3 Pre$
RegCM-EI	$Y = 2.6 \times 10^4 - 1.7 \times 10^4 T_x - 3.2 \times 10^3 T_n + 1.9 \times 10^3 Pre$
RCA-EI	$Y = 4.4 \times 10^4 - 2.6 \times 10^4 T_x - 1.2 \times 10^3 T_n + 2.5 \times 10^3 Pre$
Ens-mean	$Y = -1.2 \times 10^4 - 981T_x - 1.0 \times 10^3 T_n + 4.9 \times 10^6 Pre$

En la Figura 13 se muestran las observaciones del rendimiento de uva para Baja California y los resultados de los modelos de regresión, con (Figura 13 izquierda) y sin considerar las variables económicas (Figura 13 derecha).

Primero, las series de tiempo de los modelos de regresión basados en variables climáticas y económicas muestran que la varianza explicada del rendimiento con ERA5 es mayor ($r = 0,53$, $R^2 = 28\%$) que lo obtenido con Livneh ($r = 0,42$, $R^2 = 18\%$), al tiempo que el error cuadrático medio (RMSE) es similar en las dos regresiones, de ~ 2 ton/ha. No considerar las variables económicas (Figura 13 derecha) en los modelos de regresión da como resultado coeficientes de correlación y varianza explicada más pequeños ($R^2 = 18\%$ con ERA5 versus 14% con Livneh). Aunque la correlación es baja en ambos casos, las observaciones del rendimiento de la uva se reproducen adecuadamente y el modelo de regresión del reanálisis (ERA5) produce una representación ligeramente mejor del rendimiento que las observaciones de Livneh, especialmente considerando el modelo con regresores económicos. Aunque ambas regresiones muestran errores comparadas con el rendimiento observado (Figura 13), siguen muy bien la tendencia a la baja durante el periodo observado, especialmente ERA5 que tiene datos hasta el 2022 (Livneh sólo tiene hasta 2013).

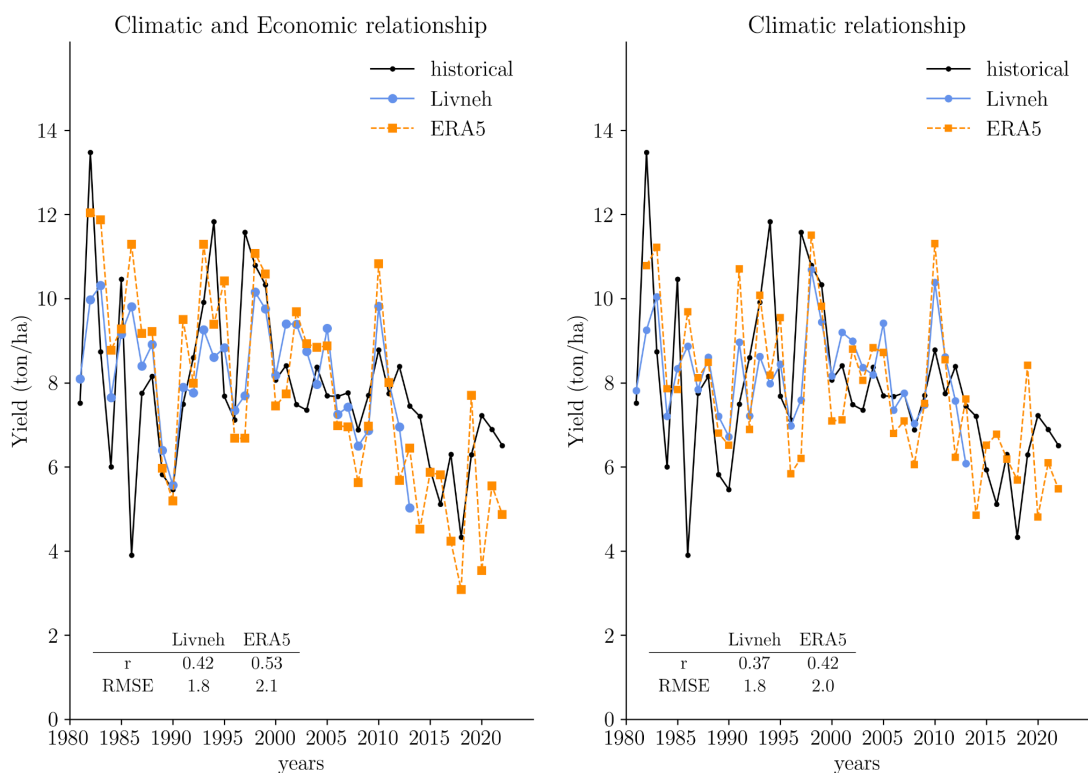


Figura 13. Rendimiento anual de uva para vino para la región vitivinícola de Baja California. La línea negra representa las observaciones, la línea azul es para el modelo de regresión que usa las observaciones de Livneh (1981-2013) y la línea naranja es para ERA5 (1981-2022). Modelos de regresión con variables económicas y climáticas (**izquierda**) y modelos de regresión sólo con variables climáticas (**derecha**). Las correlaciones (r) entre las series de observación y reanálisis y la raíz del error cuadrático medio (RMSE) se encuentran en la parte inferior de la figura.

También se establecieron modelos de regresión para los modelos climáticos regionales (RCMs) forzados con ERA-Interim y para el promedio del ensamble que fueron forzados con los modelos de circulación general (GCMs) durante el período de referencia (Figura 14). Los coeficientes de correlación en este ejemplo fueron más bajos en comparación con los datos de reanálisis y observados, y el RMSE se mantuvo similar en comparación con los modelos Livneh y ERA5 en la Figura 13. Las regresiones hechas con datos de evaluación de los RCMs no simularon bien la variabilidad interanual en el rendimiento de la uva para vino, pero capturaron bien el rendimiento medio histórico. El caso que mejor representó el rendimiento observado fue cuando se agregaron los indicadores económicos a las regresiones, y la regresión correspondiente a RCA forzado con ERA-Interim (RCA-EI; Figura 14 izquierda) obtuvo el mayor coeficiente de correlación ($r = 0.4$, $R^2 = 16\%$), incluso en el caso solo climático también obtuvo la mejor representación del rendimiento.

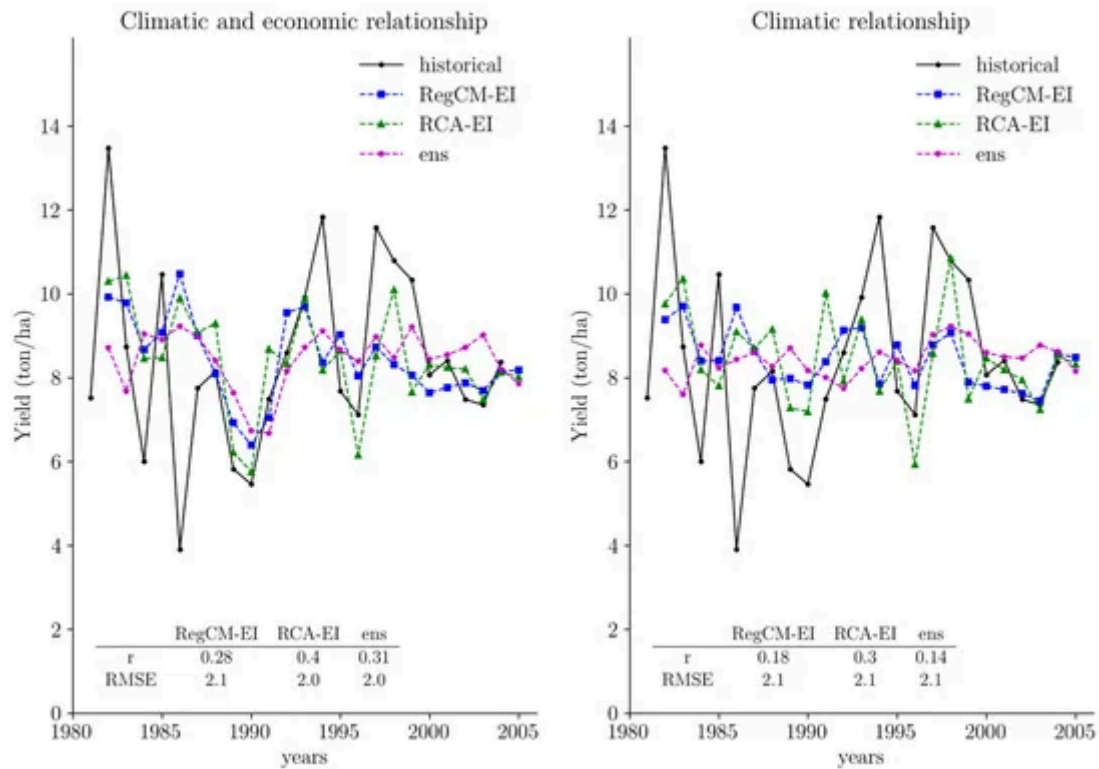


Figura 14. Similar a la Figura 13, pero para el RegCM (línea azul) y RCA (línea verde) forzados con ERA-Interim (EI) y la media del ensamble (ens) (línea magenta) forzado con los GCMs en el período base (1981-2005).

De la Figura 14 (izquierda) se debe resaltar que el rendimiento de la uva para vino está mejor representado cuando se agregan las variables económicas al modelo. Por ejemplo, a finales de la década de 1980 e inicio de 1990 los modelos de regresión reproducen la caída en el rendimiento de la uva, al igual como se observa en los datos históricos. Es importante mencionar que no se espera que los GCMs capturen la variación interanual observada, ya que su cronología no corresponde con la de las observaciones. Estas series de tiempo se agregaron para evaluar el rendimiento medio simulado y su tendencia en relación con los RCMs forzados con ERA-Interim. Un ejemplo de lo anterior se puede ver en Castillo et. al. (2023).

3.5 Discusión y conclusiones

En este capítulo se compararon las observaciones de rendimiento de uva para vino de las principales zonas vitivinícolas de Baja California con el rendimiento reproducido por modelos de regresión lineal. Los datos climáticos usados fueron seleccionados para la etapa de crecimiento y maduración de la baya y las variables económicas muestran una idea sobre el costo de mano de obra para el cultivo de la uva y los precios en el mercado, que influyen en la producción de uva para vino. Aquí también se mostró la diferencia entre considerar en los modelos de regresión las variables económicas mencionadas y el no hacerlo.

Los modelos de regresión mostraron poder representar adecuadamente el rendimiento histórico medio observado, e incluso pudieron reproducir la variación interanual con un error cuadrático medio de ~2 ton/ha. El rendimiento observado varió de casi 14 ton/ha a principios de los 80s a 7 ton/ha en 2022, tendencia que fue capturada parcialmente por los dos modelos de regresión y por los modelos climáticos regionales. El reanálisis ERA5 fue el que mejor pudo representar el rendimiento, retomando parte de la discusión del capítulo anterior, esta misma base de datos es la que presenta una tendencia positiva más clara en la temperatura media en el mismo periodo de observaciones. La representación adecuada de los modelos de regresión lineal depende en buena medida de la relación entre la temperatura y el crecimiento del fruto (G. V. Jones et al., 2005; Lobell et al., 2006), es por eso que el incremento de temperatura puede ser una de las razones que explican parcialmente la disminución del 52% en el rendimiento de la uva para vino en las últimas décadas (G. V. Jones et al., 2005).

Al comparar el rendimiento estimado por los modelos de regresión, se observó que hubo una mejor representación del rendimiento cuando se consideraron las variables económicas como regresores. Este efecto fue visible en las comparaciones entre el rendimiento estimado por las regresiones y el rendimiento observado, al agregar los términos económicos a los polinomios la varianza explicada fue más alta. El mismo efecto se observó cuando se realiza

la comparación del rendimiento estimado con los datos históricos para evaluación de modelos regionales, las correlaciones en este ejercicio fueron bajas para ambos casos de estudio; sin embargo, en el caso donde se consideró el precio del uva y el salario mínimo mejoró la representación del rendimiento.

En resumen, se ha identificado que las regresiones proporcionan una buena estimación del rendimiento de uva para vino considerando los regresores adecuados. En este capítulo se mostró que las condiciones climáticas estacionales de la etapa de crecimiento y maduración de la baya, junto con la precipitación invernal antecedente y dos variables económicas, mostraron ser buenos regresores para estimar el rendimiento de uva para vino en las principales zonas vitivinícolas de Baja California. Ambos casos de estudio proporcionan una buena estimación; sin embargo, se observó que considerar el salario mínimo y el precio de la tonelada de uva en las regresiones, mejora la representación de lo registrado por el SIAP. Esto resalta la importancia e influencia de la interacción del mercado en el rendimiento de la planta (González Andrade & Fuentes Flores, 2013; Sánchez Zepeda & Mungaray Lagarda, 2010).

Capítulo 4. Rendimiento de la uva para vino bajo escenarios de cambio climático

4.1. Introducción

Hasta el capítulo anterior se presentó una descripción de las condiciones climáticas y económicas de las principales regiones vitivinícolas de Baja California. Se observó que si bien estas regiones tienen las condiciones climáticas adecuadas para la producción de uva para vino, se caracterizan por tener una tendencia positiva en la temperatura media estacional de la etapa de crecimiento y maduración de la baya, mientras que el rendimiento de los cultivos ha disminuido casi a la mitad en las últimas décadas. Empleando la estrecha relación entre el desarrollo de la uva para vino con la temperatura y la precipitación se pudo realizar una estimación del rendimiento por medio de modelos de regresión lineal y se observó que agregar parámetros económicos puede mejorar su representación.

Una de las posibles consecuencias del cambio climático es generar variaciones en los patrones climáticos de temperatura y precipitación (IPCC, 2021). En este capítulo se presentan estos posibles efectos con escenarios de cambio climático de los dos modelos climáticos regionales (RCMs) antes usados para la región de estudio. Aquí también se presenta el posible impacto del cambio

climático en el rendimiento de la uva para vino usando los modelos de regresión integrando los cambios encontrados en los escenarios.

4.2. Datos y método

Para los escenarios de temperatura y precipitación se usaron salidas diarias de los modelos regionales climáticos RegCM y RCA que pertenecen al Experimento Coordinado de Reducción de Escala de Modelos Climáticos Regionales (Giorgi et al., 2009; Giorgi & Gutowski Jr, 2015) (CORDEX, por sus siglas en inglés), que es parte del Programa Mundial de Investigación del Clima (WCRP, por sus siglas en inglés). Con diferentes RCMs, el proyecto CORDEX busca estudiar la variabilidad climática y los posibles cambios futuros de diversas variables en escalas regionales. En el proyecto CORDEX se definieron diferentes regiones de estudio, y una de ellas es la región CORDEX Centro América o CORDEX-CAM, que incluye el sur de Estados Unidos, México, Centroamérica y el Caribe. Los datos diarios se encuentran disponibles en <https://esgf-data.dkrz.de/search/cordex-dkrz/> (consultado el 10 de julio de 2023).

Para los escenarios del siglo XXI los RCMs fueron forzados en sus fronteras con salidas de diferentes modelos climáticos globales (GCMs); en este trabajo se eligieron las que estaban disponibles para CORDEX-CAM: HadGEM2-ES, MPI-ES y GFDL-ESM2M del Proyecto de Intercomparación de Modelos Climáticos Fase 5 (CMIP5, por sus siglas en inglés), descritos también en la sección 3.2.2. En total esto genera 6 diferentes representaciones de los escenarios de cambio climático que aquí serán tomados como un ensamble. Es decir, son las salidas de dos RCMs (RCA y RegCM) forzados con tres GCMs. Además, el análisis se realizó para dos escenarios diferentes de emisiones de gases de efecto invernadero: los escenarios de forzamiento radiativo RCP2.6 (bajas emisiones) y RCP8.5 (altas emisiones); esto duplicó las salidas analizadas. Los datos de estos modelos numéricos ya han sido usados para estudios de cambio climático en diferentes regiones vitivinícolas de México, en donde se analizaron otros aspectos climáticos como el posible cambio de las

zonas aptas para la viticultura bajo condiciones de calentamiento futuro (Castillo et al., 2023).

Con los datos estacionales de temperatura de la temporada de crecimiento y maduración de la uva (máxima y mínima) y la precipitación invernal (al igual que en las secciones anteriores) se fijaron dos periodos para realizar el análisis siguiendo lo establecido por el IPCC. Se consideró el periodo 2021-2040 como futuro cercano (NF) y como futuro intermedio (IF) al periodo 2041-2060 (IPCC, 2021). Los RCMs aquí usados también tienen información disponible para el periodo de referencia (1981-2005) como la que se usó en el capítulo anterior para calcular el rendimiento de la uva. En este capítulo también se van a analizar las climatologías estacionales de las diferentes variables.

Al igual que en la sección 2.3.1 se generó para cada miembro del ensamble una serie de tiempo de las variables de interés en la región de estudio, con ellas se pudo calcular las estadísticas correspondientes (media, tendencia, etc). Los cambios de temperatura y precipitación se estimaron calculando la diferencia entre la media del periodo futuro evaluado y la media histórica (periodo de referencia). Ya conocidos los cambios en la temperatura y precipitación con los modelos de regresión se estimó el rendimiento medio considerando los nuevos valores climáticos y se comparó con lo estimado en los periodos de referencia. En este caso, el rendimiento se estimó manteniendo los valores económicos fijos al año 2018, como año de referencia, por lo que los resultados aquí presentados no representan valores económicos proyectados, sino que atienden la pregunta: ¿qué pasaría con la producción de uva para vino bajo condiciones de escenarios de cambio climático, pero considerando un esquema económico actual?

4.3 Resultados

4.3.1 Evaluaciones de RCMs

Primero se muestra la comparación de temperatura y precipitación entre la evaluación histórica de los modelos numéricos comparados con lo reproducido con las bases de Livneh y ERA5. Los resultados muestran que, el promedio del ensamble de los RCMs (RegCM4 y RCA4) reproduce adecuadamente el patrón general del ciclo anual de temperatura mínima y máxima (Figura 15a) de las regiones vitivinícolas estudiadas. Al igual que el reanálisis de ERA5, los RCMs también sobreestiman la temperatura mínima, mientras que sobreestiman la temperatura máxima solo en los meses de verano. En el caso de la precipitación, el ensamble también pudo capturar el patrón general del ciclo anual con más lluvias en invierno y muy pocas en verano; sin embargo, muestra un déficit en invierno (la principal temporada de lluvias en la región) y una sobreestimación al final de la temporada de verano (Figura 15b). En la siguiente sección se analizan los efectos del cambio climático sobre estos patrones climatológicos y a su vez sobre el rendimiento de la uva para vino.

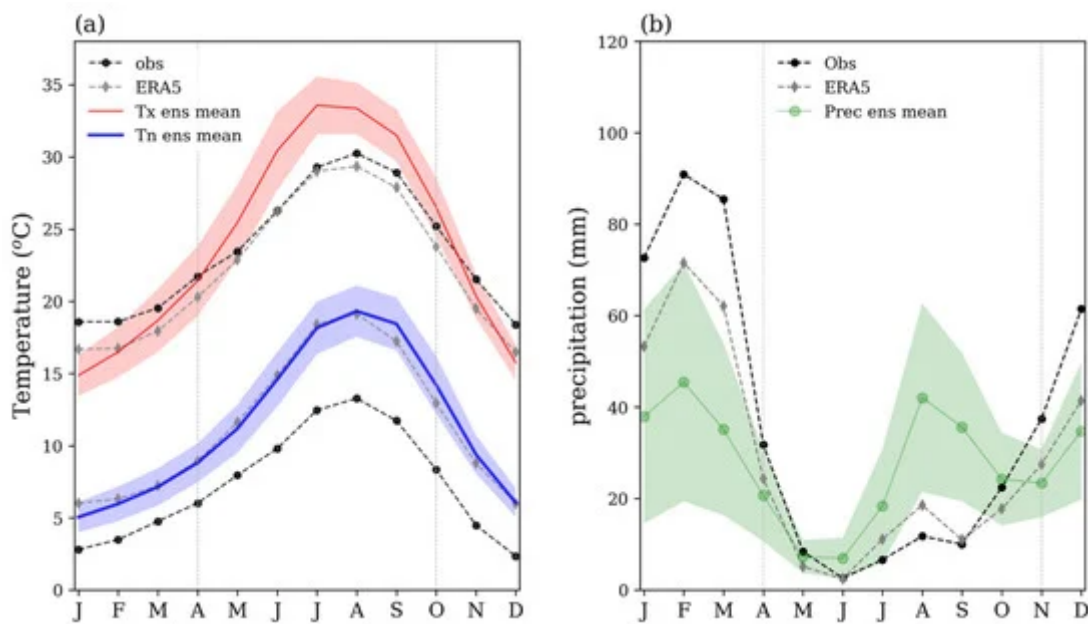


Figura 15. Ciclo anual de (a) temperatura máxima y mínima y (b) precipitación del período 1981-2005 para las observaciones de Livneh, el reanálisis de ERA5 y el promedio del ensamble. Las líneas de color sólido representan el promedio del ensamble y las áreas sombreadas indican $\pm 1,5$ desviaciones estándar (σ) entre miembros del ensamble. La temporada de crecimiento de la uva para vino (abril-octubre) y la temporada de invierno (noviembre-abril) están marcadas con líneas verticales grises en (a) y (b), respectivamente.

4.3.2. Escenarios regionales de cambio climático

En la Figura 16 se presentan las proyecciones de cambio climático evaluadas para los escenarios RCP2.6 y RCP8.5 de los períodos NF e IF. Los resultados muestran que en relación con el período de referencia, las medias del ensamble de la temperatura máxima (Tx) y mínima (Tn) (Figura 16a,b) podrían incrementarse en todo el ciclo anual, aunque difieren de magnitud según el escenario y el período futuro evaluado. En el escenario más severo (RCP8.5) durante el IF, Tx y Tn podrían incrementarse $\sim 2^{\circ}\text{C}$ con respecto a la media del periodo histórico de enero y hasta los meses de verano, y hasta $\sim 3^{\circ}\text{C}$ más de agosto a octubre, particularmente en la variable Tn. Estos valores concuerdan con lo encontrado por autores anteriores en el mismo dominio de estudio y sus alrededores, aunque usando GCMs (Cavazos & Arriaga-Ramírez, 2012; Colorado-Ruiz et al., 2018; Deser et al., 2014) y RCMs (Castillo et al., 2023).

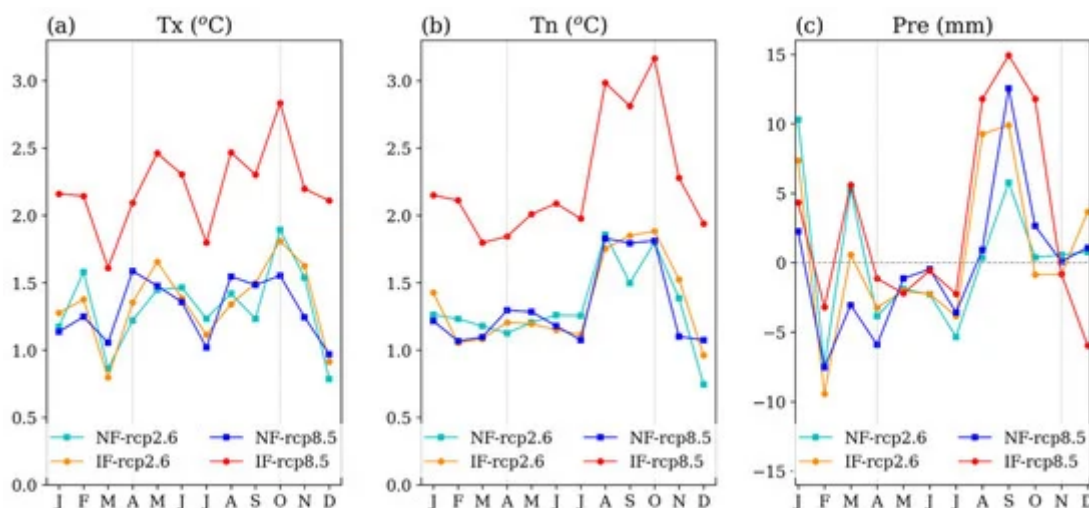


Figura 16. Cambios mensuales en el futuro cercano (NF) y el futuro intermedio (IF) relativos a la media del período de referencia (1981-2005) para (a) temperatura máxima (Tx), (b) temperatura mínima (Tn) y (c) precipitación (Pre). La temporada de crecimiento (abril-octubre) está marcada con líneas verticales grises en (a,b) y la temporada de invierno (noviembre-abril) en (c).

Si analizamos la temporada de crecimiento de la uva se observa que los escenarios muestran condiciones más cálidas, esto para los dos períodos futuros y bajo los dos escenarios de emisiones, con incrementos de Tn y Tx de $\sim 1^{\circ}\text{C}$ de abril a julio. En la fenología de la uva, este incremento en la temperatura ocurriría durante el periodo de brote de la vid hasta la inflorescencia. Para el escenario IF-RCP8.5, se proyecta un incremento mayor ($\sim 2^{\circ}\text{C}$) en Tx, e incluso Tn podría aumentar hasta 3.5°C durante la temporada de cosecha (agosto-octubre), lo que podría sugerir la necesidad de adelantar la cosecha.

Las proyecciones de precipitación sugieren que los cambios en los patrones regionales de precipitación invernal son, en su mayoría, negativos (en promedio), pero son más inciertos durante la temporada de cosecha, cuando se prevé que las precipitaciones aumenten en los dos escenarios y en los dos períodos (Figura 16c). El escenario con mayores cambios en la precipitación es el NF-RCP8.5, el cual tiene un déficit de -12.4 mm en la temporada de invierno, y en el escenario IF-RCP8.5 durante el verano, donde hay un posible aumento de 5 mm a 15 mm . Además se observa el aumento de las precipitaciones en enero, o en marzo con diferencias que oscilan entre -5 mm/mes y 5 mm/mes . La incertidumbre de la precipitación en esta región fue observada por Cavazos & Arriaga-Ramírez (2012) utilizando un solo RCM (Had-GEM2), y es posiblemente atribuible a incertidumbres en los cambios de la posición de la corriente en chorro subtropical (Torres-Alavez et al., 2014).

4.3.3 Rendimiento de la uva para vino bajo escenarios de cambio climático

Con la estimación de los cambios en las temperaturas y precipitación en los diferentes escenarios, se proyectó el rendimiento de la uva para vino para los periodos NF e IF considerando las variaciones de la temperatura durante la etapa de crecimiento y la precipitación invernal antecedente. Los cambios futuros se aplicaron a los modelos de regresión basados en los datos de Livneh

y ERA5 calculados en el Capítulo 3, así como a los dos casos de las regresiones con variables climáticas y económicas y solo con las climáticas. Posteriormente se estimó el cambio en el rendimiento expresado en porcentajes (ver Tabla 7).

Los resultados del modelo de regresión climático y económico usando los datos de referencia Livneh muestra una posible reducción del rendimiento de la uva de ~21%, excepto en el caso de IF-RCP8.5, donde indica una reducción mayor del 35%. El efecto de no considerar las variables económicas (el modelo climático únicamente), sugiere una reducción persistente del rendimiento, pero ligeramente menor (~30% para IF-RCP8.5). Este efecto también se observa en el modelo de regresión de ERA5. Esta diferencia sugiere nuevamente, como se vio en el capítulo 3 con el periodo histórico, que los factores económicos juegan un papel importante en la modelación del rendimiento de la uva.

Tabla 7. Cambios en el rendimiento de uva para vino (%) durante los periodos NF e IF bajo los dos escenarios RCP según los modelos de regresión climático y económico, y sólo climático. Los cambios porcentuales de la media del ensamble se obtuvieron en relación con el rendimiento promedio observado a partir del ajuste lineal, usando las bases de datos de Livneh (1981-2013) y ERA5 (1981-2022) como promedios históricos

Datos	Escenarios	Variables climáticas y económicas		Sólo variables climáticas			
		Rendimiento histórico	NF	IF	Rendimiento histórico	NF	IF
Livneh	RCP 2.6	8.25 ton/ha	-20.8%	-21.6%	8.25 ton/ha	-18.2%	-18.8%
	RCP 8.5		-21.9%	-35.1%		-19.1%	-30.6%
ERA5	RCP 2.6	7.81 ton/ha	-43.8%	-45.7%	7.81 ton/ha	-42.7%	-44.3%
	RCP 8.5		-46.3%	-78.6%		-44.8%	-72.4%

Las evaluaciones realizadas usando los datos de reanálisis de ERA5 muestran un impacto negativo mucho mayor (casi el doble) en el rendimiento de la uva en comparación con los modelos usando los datos observados de Livneh, lo que reflejan los grandes sesgos de las variables climáticas superficiales de ERA5 en la región de estudio, particularmente la sobreestimación de Tn (sección 2.4) y en las evaluaciones de los RCMs (Figura 15a).

Los posibles cambios en el clima (particularmente temperaturas más altas) en NF e IF, implican que la producción de uva en la región de estudio podría no ser óptima. Los modelos de regresión revelan que el rendimiento de la uva podría experimentar reducciones anuales promedio de entre ~18% y 20% (NF-RCP2.6 e IF-RCP2.6), como se indica en Fraga et al. (2020) para otras regiones del mundo. Dado que la temperatura es uno de los dos factores climáticos relevantes en el rendimiento de la uva, no sorprende que los resultados en los escenarios RCP8.5 mostraran una caída dramática en la productividad de la uva en ambos modelos de regresión.

Además, se observa que el rendimiento del cultivo también es sensible a factores socioeconómicos, respaldado por el modelo de regresión climática y económica, que indica que, en combinación con condiciones climáticas menos favorables (más cálidas y secas) para la fenología de la uva, la productividad puede disminuir al menos ~ un 3% más (en todos los casos) en comparación con los escenarios considerando únicamente datos climáticos.

4.4. Discusión y conclusiones

En este Capítulo se usaron datos de salidas de modelos numéricos regionales pertenecientes al proyecto CORDEX-CAM para evaluar los posibles cambios en la temperatura y precipitación bajo escenarios de cambio climático durante el siglo XXI. El análisis se realizó para las principales regiones vitivinícolas de Baja California bajo escenarios de bajas y altas emisiones de gases de efecto

invernadero. Con los modelos de regresión del Capítulo anterior se integraron los posibles cambios climáticos para estimar los efectos a largo plazo en el rendimiento de la uva para vino en Baja California. Los indicadores económicos también se incluyeron, considerando el 2018 como el último año base.

Las proyecciones de cambio climático de los RCMs (Castillo et al., 2023; Wang & Kotamarthi, 2015) y de modelos globales (Colorado-Ruiz et al., 2018; Deser et al., 2014) indican un acuerdo con escenarios donde las condiciones son más cálidas en la región de estudio. El ensamble de los RCMs proyecta un aumento de al menos 1°C en el periodo de futuro cercano (NF) y esto podría afectar el período inicial de desarrollo de la vegetación en la uva, particularmente la brotación y la inflorescencia. En estas etapas, la temperatura ambiental juega un papel crucial en la fenología de la uva (De Orduna, 2010; G. V. Jones et al., 2012). Las temperaturas que exceden el calor óptimo específico para el cultivo pueden inducir una disminución significativa en la productividad fotosintética de la uva (Ashenfelter & Storchmann, 2016; Kliwer, 1977).

En la etapa de maduración y cosecha, los escenarios climáticos sugieren un incremento de 1.5°C a 3°C en el escenario más severo. Temperaturas más elevadas durante el verano pueden aumentar la acumulación de azúcar de la uva, reducir la acidez y acelerar el desarrollo y la madurez del fruto (De Orduna, 2010; G. V. Jones et al., 2012; Koch & Oehl, 2018; Sadras et al., 2012) y otros impactos negativos que pueden conducir a una reducción en la producción (Gentileco et al., 2023; G. V. Jones et al., 2012; Lereboullet et al., 2013) o calidad de la uva (Gouot et al., 2019; M. Santos et al., 2020).

Los cambios en las precipitaciones invernales proyectadas varían de un mes a otro, pero esta incertidumbre también puede conducir a condiciones atmosféricas cálidas y secas que, a su vez, influyen con impactos negativos, incluso en las vides irrigadas (G. V. Jones et al., 2005; Lereboullet et al., 2013; M. Santos et al., 2020). Por otro lado, cuando las vides se riegan adecuadamente durante el invierno, puede ser beneficioso, pero la alta

humedad durante el verano aumenta la probabilidad de enfermedades (J. A. Santos et al., 2020; Van Leeuwen & Darriet, 2016).

Por último, los modelos de regresión que incluyen el efecto de la economía regional estimaron aproximadamente un 3% menos que aquellos que solo consideraron los efectos climáticos. En este sentido, un escenario adverso donde incrementa la temperatura durante la etapa de crecimiento, la producción primaria de uva para vino puede enfrentarse a diferentes retos que propician gastos de producción, que a su vez se refleja en los precios del producto. Esto puede indicar que el entorno productivo no solo se ve impactado por el incremento de temperaturas, sino también por la dinámica económica de la región (G. V. Jones et al., 2005; Sánchez Zepeda & Mungaray Lagarda, 2010).

Capítulo 5. Discusión y conclusiones generales

5.1. Resumen y discusiones

En este estudio se evaluó el posible impacto del cambio climático en el rendimiento de la uva para vino en las principales regiones vitivinícolas de Baja California, México, en el municipio de Ensenada, donde se produce más del 80% del vino en México (Castillo et al., 2023; Contreras & Thomé Ortiz, 2019). Además, esta región vitivinícola es la segunda productora de uva para vino de México después del estado de Zacatecas (Castillo et al., 2023; SIAP, 2022).

Con un sondeo a 59 bodegas vitivinícolas en la región de estudio, se encontró que el 89% de las empresas dedicadas a alguna actividad relacionada con el vino son de reciente fundación, hecho consistente con la integración del enoturismo en la región y a la diversificación de servicios en acuerdo con Reyes-Orta et al., (2016), mientras que, solo el 12% fueron establecidas antes de 1990. Se encontró que el año de fundación de las bodegas vitivinícolas de Baja California es la variable que más influye en cuanto a tamaño de la empresa, sus líneas de producción y su alcance de mercado.

Con los datos del sondeo también se encontró que al menos un 92% de las variedades cultivadas en la zonas vitivinícolas de Baja California requieren que

la temperatura media de la etapa de crecimiento y maduración de la uva para vino no supere los 24°C, temperaturas superiores a ese valor pueden generar un desarrollo prematuro del fruto (Gladstones, 1992; G. Jones, 2006). Realizando un análisis de la temperatura y la precipitación de la región de estudio en el periodo de 1981 al 2022 se encontró que la temperatura media de la etapa de crecimiento y maduración en las últimas décadas ha incrementado (Cavazos et al., 2020; Pavia et al., 2009; Wang et al., 2018), mientras que la precipitación invernal antecedente a la etapa de crecimiento muestra una tendencia negativa, aunque no estadísticamente significativa (Cavazos et al., 2020; Wang et al., 2018). Al comparar las observaciones de rendimiento para uva en el periodo de estudio se observa una reducción del 52%, principalmente con una tendencia negativa en las últimas tres décadas, de esta manera la reducción en el rendimiento de la uva para vino concuerda con las tendencias de temperatura y precipitación.

Para estimar el rendimiento de la uva para vino en la región de estudio se establecieron dos modelos de regresión lineal. El primero fue conformado por regresores como la temperatura máxima y mínima de la temporada de crecimiento y la precipitación invernal, variables climáticas que están estrechamente relacionadas con el crecimiento y maduración de la uva (G. Jones et al., 2005; Lobell et al., 2006). De trabajos anteriores se identificó que la dinámica económica regional también puede tener influencia en la productividad de la uva para vino (González Andrade, 2015; Riekötter & Hassler, 2022; Romero Azorin & Garcia Garcia, 2020), así que en un segundo caso de modelo de regresión lineal se introdujo este efecto mediante el uso del salario mínimo real y el precio de la uva, como variables representativas de los costos de interacciones de mercado (González Andrade, 2015; Sánchez Zepeda & Mungaray Lagarda, 2010). Los dos modelos de regresión lineal reprodujeron adecuadamente el rendimiento promedio y las tendencias en el rendimiento de la región estudiada. Sin embargo, al considerar los factores económicos, las estimaciones fueron más representativas del rendimiento observado por el SIAP, que solo considerando las variables climáticas, ya que los resultados mostraron que la correlación entre lo estimado por el modelo

lineal y las observaciones fueron más grandes cuando se consideraron las variables económicas.

Con datos del CORDEX-CAM se obtuvo la temperatura y precipitación de las temporadas de interés para dos escenarios diferentes de emisiones de gases de efecto invernadero en las regiones vitivinícolas de Baja California. Tanto los escenarios de cambio climático de los RCMs (Castillo et al., 2023; Wang & Kotamarthi, 2015) y de modelos globales (Colorado-Ruiz et al., 2018; Deser et al., 2014) concuerdan en que las condiciones serán más cálidas en la región de estudio. Las proyecciones indican que existe al menos un incremento en la temperatura media de 1°C en la temporada de crecimiento de la uva; en los escenarios más severos (IF-RCP8.5) el aumento es de hasta 3°C en la etapa de maduración de la baya. Con este incremento en la temperatura los modelos de regresión lineal estiman una reducción del rendimiento de la uva para vino. De mantenerse un escenario más cálido, aunado al efecto de los costos de producción y las interacciones en el mercado, la reducción incluso puede ser mayor (más del 3%), aunque también puede ser indicativo de una ventana de oportunidad para realizar acciones contra los efectos del cambio climático desde el ámbito económico, al mostrar que la productividad puede responder a la economía regional (Sánchez Zepeda & Mungaray Lagarda, 2010).

La reducción en el rendimiento, bajo escenarios de cambio climático, concuerda con los efectos que tiene el incremento de la temperatura media en el desarrollo y maduración de la uva. La mayoría de las variedades cultivadas en Baja California tienen un buen desempeño cuando la temperatura media durante la etapa de crecimiento y maduración no excede los 24°C. La brotación y la inflorescencia son etapas elementales en la fenología de la uva (De Orduna, 2010; G. V. Jones et al., 2012), mismas que serán susceptibles a temperaturas más altas y, por lo tanto, con una posible menor productividad (Ashenfelter & Storchmann, 2016; Kliwer, 1977). Además, las áreas favorables para el cultivo de la uva para vino en Baja California podrían reducirse bajo escenarios de cambio climático, particularmente a finales del siglo XXI bajo el

RCP8.5 (Castillo et al., 2023; Monteverde & De Sales, 2020), como se ha proyectado para otras regiones vitivinícolas (Wunderlich et al., 2022), incluido el sur de California (Monteverde & De Sales, 2020).

5.2. Conclusiones

De acuerdo a los resultados aquí mostrados, y sustentado por lo encontrado en otros estudios, la temperatura está aumentando en las regiones vitivinícolas de Baja California y las proyecciones climáticas sugieren que la temperatura incrementará en escenarios de bajas y altas emisiones de gases de efecto invernadero. Con esta tendencia de temperatura se espera que la producción de uva para vino disminuya, como sugieren los modelos de regresión. Este estudio resalta la necesidad de considerar los efectos económicos en las iniciativas de adaptación, pues los resultados sugieren que la economía regional también juega un papel en la productividad de la uva en Baja California, lo cual concuerda con trabajos como el de González Andrade (2015), al igual que en otras regiones como es el caso reportado por Riekötter & Hassler (2022), que sugieren que los cambios de temperatura y precipitación producirán variaciones en términos del costo operativo pagado por los productores. Es importante profundizar en el seguimiento y análisis de las variables climáticas y económicas, y colaborar con la generación de investigaciones que diseñen estrategias de adaptación para mitigar los posibles efectos del cambio climático desde diferentes enfoques.

5.3. Trabajo futuro

Los resultados aquí descritos se basan en el rendimiento actual de uva para vino y en las variedades cultivadas en Baja California, pero no se analizó el rendimiento según la variedad. Por lo tanto, es importante iniciar estudios regionales sobre la adaptación de este fruto al cambio climático para mitigar

sus impactos en el sector vitivinícola. La sostenibilidad de los productores de vino dependerá de la resiliencia de la agricultura local (Howden et al., 2007) y de las estrategias de mitigación adaptativas. Por ejemplo, incluir cultivos más tolerantes a la sequía por cultivar o selección de variedades (Gambetta et al., 2020; Sun et al., 2023). Deberían estudiarse sistemas de riego eficientes (Sun et al., 2023), así como técnicas de cultivo de terreno seco (Monteverde & De Sales, 2020). Explorar áreas adecuadas en elevaciones más altas (Monteverde & De Sales, 2020; Resco et al., 2016) o la diversificación de servicios, con el objetivo de que la viticultura en Baja California México refleje un equilibrio entre tradición e innovación y tenga un enfoque en la calidad, la diversidad y sostenibilidad.

Literatura citada

- Adams, R. M., Hurd, B. H., Lenhart, S., & Leary, N. (1998). Effects of global climate change on agriculture: An interpretative review. *Climate research*, 11(1), 19–30.
- Amerine, M. A., & Winkler, A. J. (1944). *Composition and quality of musts and wines of California grapes*.
- Anderson, K., Johnson, H., & Robinson, J. (2022). The World Atlas of Wine, Mitchell Beazley, London, 2019, 416 pp., ISBN 978-1-78472-403-1. *Journal of Wine Economics*, 17(2), 173–174.
- Andrade-Gómez, L., & Cavazos, T. (2024). Historical meteorological droughts over the CORDEX-CAM (Central America, Caribbean and Mexico) domain: Evaluating the simulation of dry hot spots with RegCM4. *International Journal of Climatology*, 44(4), 1110–1134.
- Arriaga-Ramírez, S., & Cavazos, T. (2010). Regional trends of daily precipitation indices in northwest Mexico and southwest United States. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 115(D14), Article D14. <https://doi.org/10.1029/2009JD013248>
- Asatryan, H., Aleksanyan, V., Azatyan, L., & Manucharyan, M. (2022). Dynamics of the development of viticulture in RA: The econometric case study. *Statistical Journal of the IAOS, Preprint*, Article Preprint. <https://doi.org/10.3233/SJI-220948>
- Ashenfelter, O., & Storchmann, K. (2016). Climate change and wine: A review of the economic implications. *Journal of Wine Economics*, 11(1), Article 1. <https://doi.org/doi:10.1017/jwe.2016.5>
- Cabello-Pasini, A., Macias-Carranza, V., & Mejía-Trejo, A. (2017). Efecto del mesoclima en la maduración de uva nebbiolo (*Vitis vinifera*) en el Valle de Guadalupe, Baja California, México. *Agrociencia*, 51(6), 617–633.
- Camelo-Méndez, G., Sotelo-Díaz, L., & Jiménez-Aparicio, A. (2012). Análisis

morfo-colorimétrico de cultivares de arroz mediante reconocimiento de patrones, análisis fractal de imágenes digitales (rp-afid) y análisis multivariable. *Alimentos Hoy*, 21(27), 39–54.

- 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. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0489-3>
- Castillo, N., Cavazos, T., & Pavia, E. G. (2023). Impact of climate change in Mexican winegrape regions. *International Journal of Climatology*, 43(14), 6621–6642. <https://doi.org/10.1002/joc.8224>
- Cavazos, T., & Arriaga-Ramírez, S. (2012). Downscaled climate change scenarios for Baja California and the North American monsoon during the twenty-first century. *Journal of Climate*, 25(17), Article 17. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00425.1>
- Cavazos, T., Luna-Niño, R., Cerezo-Mota, R., Fuentes-Franco, R., Méndez, M., Pineda Martínez, L. F., & Valenzuela, E. (2020). Climatic trends and regional climate models intercomparison over the CORDEX-CAM (Central America, Caribbean, and Mexico) domain. *International Journal of Climatology*, 40(3), 1396–1420.
- Cavazos, T., & Rivas, D. (2004). Variability of extreme precipitation events in Tijuana, Mexico. *Climate Research*, 25(3), Article 3. <https://doi.org/doi:10.3354/cr025229>
- CMV. (2018). Plan Rector—Consejo Mexicano Vitivinícola. *Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, Ciudad de Mexico*, 92.
- Collins, W., Bellouin, N., Doutriaux-Boucher, M., Gedney, N., Halloran, P., Hinton, T., Hughes, J., Jones, C., Joshi, M., & Liddicoat, S. (2011). *Development and evaluation of an Earth-system model—HadGEM2*, *Geosci. Model Dev.*, 4, 1051–1075. <https://doi.org/10.5194/gmd-4-1051-2011>
- Colorado-Ruiz, G., Cavazos, T., Salinas, J. A., De Grau, P., & Ayala, R. (2018). Climate change projections from Coupled Model Intercomparison Project phase

- 5 multi-model weighted ensembles for Mexico, the North American monsoon, and the mid-summer drought region. *International Journal of Climatology*, 38(15), Article 15. <https://doi.org/10.1002/joc.5773>
- CONAGUA. (2015). Atlas de México. *Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales y Comisión Nacional del Agua, México*, 105.
- Contreras, D. D. J., & Thomé Ortiz, H. (2019). Turismo enológico y rutas del vino en México. Estado del conocimiento y análisis de casos. *RIVAR (Santiago)*, 6(17), 27–44.
- Cook, B. I., & Wolkovich, E. M. (2016). Climate change decouples drought from early wine grape harvests in France. *Nature Climate Change*, 6(7), Article 7. <https://doi.org/10.1038/nclimate2960>
- Covarrubias, J., & Thach, L. (2015). Wines of Baja Mexico: A qualitative study examining viticulture, enology, and marketing practices. *Wine Economics and Policy*, 4(2), Article 2. <https://doi.org/10.1016/j.wep.2015.11.001>
- Cramer, W., Guiot, J., Fader, M., Garrabou, J., Gattuso, J.-P., Iglesias, A., Lange, M. A., Lionello, P., Llasat, M. C., & Paz, S. (2018). Climate change and interconnected risks to sustainable development in the Mediterranean. *Nature Climate Change*, 8(11), Article 11. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0299-2>
- Crespin, Y., Le Berre, M., & Uvietta, P. (1987). The system climate-vine-vinegrower. Example of a dynamic model. Climatic constraints, the physiology of the vine, the role of the vinegrower. *Bulletin de l'OIV (France)*, 60(671).
- De Orduna, R. M. (2010). Climate change associated effects on grape and wine quality and production. *Food Research International*, 43(7), Article 7. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.05.001>
- Dee, D. P., Uppala, S. M., Simmons, A. J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M., Balsamo, G., & Bauer, P. (2011). The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137(656), Article

656. <https://doi.org/10.1002/qj.828>

- Deser, C., Phillips, A. S., Alexander, M. A., & Smoliak, B. V. (2014). Projecting North American climate over the next 50 years: Uncertainty due to internal variability. *Journal of Climate*, 27(6), Article 6. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00451.1>
- Duchêne, E., Huard, F., Dumas, V., Schneider, C., & Merdinoglu, D. (2010). The challenge of adapting grapevine varieties to climate change. *Climate research*, 41(3), Article 3. <https://doi.org/10.3354/cr00850>
- Dunne, J. P., John, J. G., Adcroft, A. J., Griffies, S. M., Hallberg, R. W., Shevliakova, E., Stouffer, R. J., Cooke, W., Dunne, K. A., & Harrison, M. J. (2012). GFDL's ESM2 global coupled climate-carbon earth system models. Part I: Physical formulation and baseline simulation characteristics. *Journal of climate*, 25(19), Article 19. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00560.1>
- Ferrise, R., Trombi, G., Moriondo, M., & Bindi, M. (2016). Climate change and grapevines: A simulation study for the Mediterranean basin. *Journal of Wine Economics*, 11(1), Article 1. <https://doi.org/10.1017/jwe.2014.30>
- Fraga, H., Molitor, D., Leolini, L., & Santos, J. A. (2020). What is the impact of heatwaves on European viticulture? A modelling assessment. *Applied Sciences*, 10(9), Article 9.
- Gambetta, G. A., Herrera, J. C., Dayer, S., Feng, Q., Hochberg, U., & Castellarin, S. D. (2020). The physiology of drought stress in grapevine: Towards an integrative definition of drought tolerance. *Journal of experimental botany*, 71(16), Article 16.
- García, D. V., Chirino, R. R., Infante, R. A. J., Cabrera, E. F., & Hernández, J. A. S. (2021). Método de clustering jerárquico aglomerativo para la asignación del financiamiento a proyectos de desarrollo local. *Revista Cubana de Transformación Digital*, 2(2), 71–83.
- Gay, C., Estrada, F., Conde, C., Eakin, H., & Villers, L. (2006). Potential impacts of climate change on agriculture: A case of study of coffee production in Veracruz,

- Mexico. *Climatic Change*, 79(3–4), Article 3–4.
<https://doi.org/10.1007/s10584-006-9066-x>
- Gentilesco, G., Coletta, A., Tarricone, L., & Alba, V. (2023). Bioclimatic Characterization Relating to Temperature and Subsequent Future Scenarios of Vine Growing across the Apulia Region in Southern Italy. *Agriculture*, 13(3), Article 3.
<https://doi.org/10.3390/agriculture13030644>
- Giorgetta, M. A., Jungclaus, J., Reick, C. H., Legutke, S., Bader, J., Böttinger, M., Brovkin, V., Crueger, T., Esch, M., Fieg, K., Glushak, K., Gayler, V., Haak, H., Hollweg, H., Ilyina, T., Kinne, S., Kornblueh, L., Matei, D., Mauritsen, T., ... Stevens, B. (2013). Climate and carbon cycle changes from 1850 to 2100 in MPI-ESM simulations for the Coupled Model Intercomparison Project phase 5. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 5(3), Article 3.
<https://doi.org/10.1002/jame.20038>
- Giorgi, F., Coppola, E., Solmon, F., Mariotti, L., Sylla, M., Bi, X., Elguindi, N., Diro, G., Nair, V., & Giuliani, G. (2012). RegCM4: Model description and preliminary tests over multiple CORDEX domains. *Climate Research*, 52, 7–29.
<https://doi.org/10.3354/cr01018>
- Giorgi, F., & Gutowski Jr, W. J. (2015). Regional dynamical downscaling and the CORDEX initiative. *Annual review of environment and resources*, 40, 467–490.
<https://doi.org/10.1146/annurev-environ-102014-021217>
- Giorgi, F., Jones, C., & Asrar, G. R. (2009). Addressing climate information needs at the regional level: The CORDEX framework. *World Meteorological Organization (WMO) Bulletin*, 58(3), Article 3.
- Gladstones, J. (1992). *Viticulture and environment*.
- González Andrade, S. (2015). Cadena de valor económico del vino de Baja California, México. *Estudios fronterizos*, 16(32), Article 32.
- González Andrade, S., & Fuentes Flores, N. (2013). Matriz de insumo producto vitivinícola de Baja California México. *Revista de Economía, Facultad de*

Economía, Universidad Autónoma de Yucatán, 30(81), Article 81.

- Gouot, J. C., Smith, J. P., Holzappel, B. P., Walker, A. R., & Barril, C. (2019). Grape berry flavonoids: A review of their biochemical responses to high and extreme high temperatures. *Journal of experimental botany*, 70(2), Article 2. <https://doi.org/10.1093/jxb/ery392>
- 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. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(17), Article 17. <https://doi.org/10.1073/pnas.1210127110>
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., & Schepers, D. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), Article 730. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Howden, S. M., Soussana, J.-F., Tubiello, F. N., Chhetri, N., Dunlop, M., & Meinke, H. (2007). Adapting agriculture to climate change. *Proceedings of the national academy of sciences*, 104(50), Article 50. <https://doi.org/10.1073/pnas.0701890104>
- IPCC. (2021). Climate Change 2021—The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Cambridge University Press*.
- IPCC. (2023). Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *IPCC, Geneva, Switzerland, [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]*, 184. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- Jackson, D. I., & Lombard, P. (1993). Environmental and management practices affecting grape composition and wine quality-a review. *American journal of enology and viticulture*, 44(4), 409–430.

- Jones, G. (2006). Climate and terroir: Impacts of climate variability and change on wine: 1–14. *Fine wine and terroir—the geoscience perspective*. Geoscience Canada, Geological Association of Canada, St. John's, Newfoundland, Canada.
- Jones, G., Duchêne, E., Tomasi, D., Yuste, J., Braslavská, O., Schultz, H., Martinez, C., Boso, S., Langellier, F., & Perruchot, C. (2005). *Changes in European winegrape phenology and relationships with climate*. 54–61.
- Jones, G. V. (2003). Winegrape phenology. *Phenology: an integrative environmental science*, 523–539.
- Jones, G. V. (2007). Climate change: Observations, projections, and general implications for viticulture and wine production. *Economics Department-working paper*, 7, 14.
- 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(3), Article 3. <https://doi.org/10.3354/cr00708>
- Jones, G. V., Reid, R., & Vilks, A. (2012). Climate, grapes, and wine: Structure and suitability in a variable and changing climate. *The geography of wine: Regions, terroir and techniques*, 109–133. https://doi.org/10.1007/978-94-007-0464-0_7
- Jones, G. V., White, M. A., Cooper, O. R., & Storchmann, K. (2005). Climate change and global wine quality. *Climatic change*, 73(3), Article 3. <https://doi.org/10.1007/s10584-005-4704-2>
- Kendall, M. G. (1948). *Rank correlation methods*.
- Kliewer, W. (1977). Effect of high temperatures during the bloom-set period on fruit-set, ovule fertility, and berry growth of several grape cultivars. *American Journal of Enology and Viticulture*, 28(4), Article 4. <https://doi.org/10.5344/ajev.1977.28.4.215>
- Koch, B., & Oehl, F. (2018). *Climate change favors grapevine production in temperate zones*. <https://doi.org/10.4236/as.2018.93019>
- Lereboullet, A.-L., Beltrando, G., & Bardsley, D. K. (2013). Socio-ecological adaptation

- to climate change: A comparative case study from the Mediterranean wine industry in France and Australia. *Agriculture, ecosystems & environment*, 164, 273–285. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.10.008>
- Livneh, B., Bohn, T. J., Pierce, D. W., Munoz-Arriola, F., Nijssen, B., Vose, R., Cayan, D. R., & Brekke, L. (2015). A spatially comprehensive, hydrometeorological data set for Mexico, the US, and Southern Canada 1950–2013. *Scientific data*, 2(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.42>
- Lobell, D. B., Field, C. B., Cahill, K. N., & Bonfils, C. (2006). Impacts of future climate change on California perennial crop yields: Model projections with climate and crop uncertainties. *Agricultural and Forest Meteorology*, 141(2–4), Article 2–4. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2006.10.006>
- Loubère, L. A. (1990). *The wine revolution in France: The twentieth century*. Princeton University Press.
- Luna-Niño, R., Cavazos, T., Torres-Alavez, J. A., Giorgi, F., & Coppola, E. (2021). Interannual variability of the boreal winter subtropical jet stream and teleconnections over the CORDEX-CAM domain during 1980–2010. *Climate Dynamics*, 57(5), 1571–1594.
- Markopoulos, T., Stougiannidou, D., Kontakos, S., & Staboulis, C. (2023). Wine Quality Control Parameters and Effects of Regional Climate Variation on Sustainable Production. *Sustainability*, 15(4), Article 4. <https://doi.org/10.3390/su15043512>
- Meraz Ruiz, L., & Maldonado Radillo, S. E. (2016). Influencia de la Oferta de Actividades de Enoturismo en la Competitividad de las Micro, Pequeñas y Medianas Vinícolas de la Ruta del Vino del Valle de Guadalupe, BC, México (Influence of Wine Tourism in the Competitiveness of Micro, Small and Medium-Sized Wineries in Guadalupe Valley, BC, Mexico). *Revista Global de Negocios*, 4(1), 47–59.
- Meraz Ruiz, L., & Ruiz Vega, A. V. (2016). *El enoturismo de Baja California, México: Un análisis de su oferta y comparación con la región vitivinícola de La Rioja*,

España.

- Miranda, A. J. O., García, A. E., Gudino, E. A., & Bautistaa, V. L. (2022). Sistema Vitivinícola en Baja California: Agentes de soporte en el México Contemporáneo. *Journal of Agro-Industry Sciences*, 4(3), 115–120.
- Monteverde, C., & De Sales, F. (2020). Impacts of global warming on southern California's winegrape climate suitability. *Advances in Climate Change Research*, 11(3), Article 3. <https://doi.org/10.1016/j.accre.2020.08.002>
- Mori, K., Goto-Yamamoto, N., Kitayama, M., & Hashizume, K. (2007). Loss of anthocyanins in red-wine grape under high temperature. *Journal of experimental botany*, 58(8), Article 8. <https://doi.org/10.1093/jxb/erm055>
- Muñoz-Sabater, J., Dutra, E., Agustí-Panareda, A., Albergel, C., Arduini, G., Balsamo, G., Boussetta, S., Choulga, M., Harrigan, S., & Hersbach, H. (2021). ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth system science data*, 13(9), Article 9. <https://doi.org/10.5194/essd-13-4349-2021>
- Nemani, R. R., White, M. A., Cayan, D. R., Jones, G. V., Running, S. W., Coughlan, J. C., & Peterson, D. L. (2001). Asymmetric warming over coastal California and its impact on the premium wine industry. *Climate research*, 19(1), Article 1. <https://doi.org/doi:10.3354/cr019025>
- OECD/FAO. (2023). *OECD-FAO Agricultural Outlook 2023–2032*. <https://doi.org/10.1787/08801ab7-en>
- OMM. (2011). *Guía de Prácticas Climatológicas. Organización Meteorológica Mundial* (100a ed.).
- Palazzo, L. R., Acosta, G. L., Montenegro, P. G., Mulidzi, A. R., Pizzolon, N., Meriño, D. Z., Echeverría, C. P., Villareal, C. P., Venter, T., & Peña, J. P. (2022). Towards a More Sustainable Viticulture: Integration of Solar Photovoltaic Projects in Vineyards of Argentina, Chile, and South Africa. *AgriVoltaics Conference Proceedings*, 1.

- Pavia, E. G., Graef, F., & Reyes, J. (2009). Annual and seasonal surface air temperature trends in Mexico. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 29(9), Article 9. <https://doi.org/10.1002/joc.1787>
- PEACC-BC. (2012). *Programa Estatal de Acción ante el Cambio Climático de Baja California*.
- Pérez Reyes, J. (2017). *Evaluación de los factores que condicionan el comportamiento agronómico de la variedad de vid " Sauvignon Blanc"*.
- Resco, P., Iglesias, A., Bardají, I., & Sotés, V. (2016). Exploring adaptation choices for grapevine regions in Spain. *Regional Environmental Change*, 16, 979–993.
- Reyes Orta, M., Olague de la Cruz, J. T., & Verján Quiñones, R. (2018). Estrategia de gestión pública para un enoturismo sustentable a partir de la percepción de problemas ambientales: El Valle de Guadalupe (México). *Estudios y perspectivas en turismo*, 27(2), 375–689.
- Reyes-Orta, M., Olague, J. T., Lobo Rodriguez, M. O., & Cruz Estrada, I. (2016). Importance and valuation of the components of satisfaction in the oenological experience in Guadalupe Valley Ensenada, Baja California: Contributions to the process of sustainable management. *Revista de Análisis Turístico*, 22.
- Riekötter, N., & Hassler, M. (2022). Agroforestry Systems in Wine Production-Mitigating Climate Change in the Mosel Region. *Forests*, 13(11), Article 11. <https://doi.org/10.3390/f13111755>
- Romero Azorin, P., & Garcia Garcia, J. (2020). The Productive, economic, and social efficiency of vineyards using combined drought-tolerant rootstocks and efficient low water volume deficit irrigation techniques under Mediterranean semiarid conditions. *Sustainability*, 12(5), Article 5. <https://doi.org/10.3390/su12051930>
- Romero, C. (1996). *Análisis de las decisiones multicriterio* (Vol. 14). Isdefe Madrid.
- Sadras, V., Bubner, R., & Moran, M. (2012). A large-scale, open-top system to increase temperature in realistic vineyard conditions. *Agricultural and Forest*

- Meteorology*, 154, 187–194. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.11.005>
- Samuelsson, P., Jones, C. G., Will' En, U., Ullerstig, A., Gollvik, S., Hansson, U., Jansson, E., Kjellstro" M, C., Nikulin, G., & Wyser, K. (2011). The Rossby Centre Regional Climate model RCA3: Model description and performance. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 63(1), Article 1. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0870.2010.00478.x>
- Sánchez Zepeda, L., & Mungaray Lagarda, A. (2010). Vino de calidad: Base de desarrollo endógeno en el Valle de Guadalupe, Baja California. *Frontera norte*, 22(44), 109–132.
- Santillán, D., Garrote, L., Iglesias, A., & Sotes, V. (2020). Climate change risks and adaptation: New indicators for Mediterranean viticulture. *Mitigation and adaptation strategies for global change*, 25(5), Article 5. <https://doi.org/10.1007/s11027-019-09899-w>
- Santillán, D., Sotés, V., Iglesias, A., & Garrote, L. (2019). *Adapting viticulture to climate change in the Mediterranean region: Evaluations accounting for spatial differences in the producers-climate interactions*. 12, 01001. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20191201001>
- Santos, J. A., Fraga, H., Malheiro, A. C., Moutinho-Pereira, J., Dinis, L.-T., Correia, C., Moriondo, M., Leolini, L., Dibari, C., & Costafreda-Aumedes, S. (2020). A review of the potential climate change impacts and adaptation options for European viticulture. *Applied Sciences*, 10(9), Article 9. <https://doi.org/10.3390/app10093092>
- Santos, M., Fonseca, A., Fraga, H., Jones, G. V., & Santos, J. A. (2020). Bioclimatic conditions of the Portuguese wine denominations of origin under changing climates. *International Journal of Climatology*, 40(2), Article 2. <https://doi.org/10.1002/joc.6248>
- Schultz, H. R., & Jones, G. V. (2010). Climate induced historic and future changes in viticulture. *Journal of Wine Research*, 21(2–3), Article 2–3.

<https://doi.org/10.1080/09571264.2010.530098>

- Schwartz, M. D. (2003). *Phenology: An integrative environmental science* (Vol. 39). Springer.
- SEFOA. (2015). *Panorama General de Valle de Guadalupe, Baja California, 2015*. Oficina Estatal de Información para el Desarrollo Rural Sustentable. Gobierno de Baja California.
- Sen, P. K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American statistical association*, 63(324), Article 324. <https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934>
- Shrestha, N. (2020). Detecting multicollinearity in regression analysis. *American Journal of Applied Mathematics and Statistics*, 8(2), Article 2. <https://doi.org/10.12691/ajams-8-2-1>
- SIAP. (2021). Panorama Agroalimentario 2021. *Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, Ciudad de México, 200*.
- SIAP. (2022). Panorama Agroalimentario 2022. *Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, Ciudad de México, 218*.
- Sun, Q., Granco, G., Groves, L., Voong, J., & Van Zyl, S. (2023). Viticultural Manipulation and New Technologies to Address Environmental Challenges Caused by Climate Change. *Climate*, 11(4), Article 4.
- Torres-Alavez, A., Cavazos, T., & Turrent, C. (2014). Land–sea thermal contrast and intensity of the North American monsoon under climate change conditions. *Journal of climate*, 27(12), Article 12. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00557.1>
- Trejo-Pech, C. O., Arellano-Sada, R., Coelho, A. M., & Weldon, R. N. (2012). Is the Baja California, Mexico, wine industry a cluster? *American Journal of Agricultural Economics*, 94(2), Article 2.
- Unwin, T. (2005). *Wine and the vine: An historical geography of viticulture and the wine*

trade. Routledge.

- Van Leeuwen, C., & Darriet, P. (2016). The impact of climate change on viticulture and wine quality. *Journal of Wine Economics*, 11(1), Article 1. <https://doi.org/10.1017/jwe.2015.21>
- Vaudour, E. (2002). The quality of grapes and wine in relation to geography: Notions of terroir at various scales. *Journal of Wine Research*, 13(2), Article 2. <https://doi.org/10.1080/0957126022000017981>
- Viers, J., Williams, J., Nicholas, K., Barbosa, O., Kotz, I., Spence, L., Webb, L., Merenlender, A., & Reynolds, M. (2013). *Vinecology: Pairing wine with nature*. *Conservation Letters* 6 (5) 287–299.
- Wang, J., & Kotamarthi, V. (2015). *High-resolution dynamically downscaled projections of precipitation in the mid and late 21st century over North America*, *Earth's Future*, 3, 268–288. <https://doi.org/10.1002/2015EF000304>
- Wang, J., Xu, C., Hu, M., Li, Q., Yan, Z., & Jones, P. (2018). Global land surface air temperature dynamics since 1880. *International Journal of Climatology*, 38, e466–e474. <https://doi.org/10.1002/joc.5384>
- White, M. A., Diffenbaugh, N., Jones, G. V., Pal, J., & Giorgi, F. (2006). Extreme heat reduces and shifts United States premium wine production in the 21st century. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103(30), Article 30. <https://doi.org/10.1073/pnas.0603230103>
- Winkler, A. J. (1974). *General viticulture*. Univ of California Press.
- Wunderlich, R. F., Lin, Y.-P., & Ansari, A. (2022). Regional Climate Change Effects on the Viticulture in Portugal. *Environments*, 10(1), Article 1. <https://doi.org/10.3390/environments10010005>

Anexo A. Tabla del padrón de bodegas vitivinícolas entrevistadas

Tabla A1. Lista de bodegas vitivinícolas de Baja California que fueron entrevistadas.

Padrón de bodegas vitivinícolas entrevistadas					
0	Adobe Guadalupe	20	El Mogor	40	Tres Valles
1	Alximia	21	Enevé	41	Vena Cava
2	ATP Vinos	22	En'kanto	42	Villa Montefiori
3	Barón Balché	23	Finca La Carrodilla	43	Vinícola Kastamay
4	Bodega de Santo Tomás	24	Hilo Negro	44	Vinícola Retorno
5	Bodegas F. Rubio	25	L.A. Cettp	45	Vinícola Roa
6	Bodegas Magoni	26	La Casa de Doña Lupe	46	Vinisterra
7	Bruma	27	La Casa Vieja	47	Vinos Dubacano
8	Casa de Piedra	28	Las Nubes	48	Vinos Fuentes
9	Casa Urbina	29	Lechuza	49	Vinos Kruger
10	Casta de Vino	30	Montaño Benson	50	Vinos LT
11	Cava el Laurel	31	Monte Xanic	51	Vinos Melchum
12	Cava Maciel	32	Nativo Vinícola	52	Vinos Pavía
13	Cava Mora	33	Norte 32	53	Viña de Frannes
14	Chateau Camou	34	Quinta Monasterio	54	Viña de Liceaga
15	Clos de Tres Cantos	35	Relieve	55	Viñas Pijoan
16	Concierto Enológico	36	San Cosme Viñedos	56	Viñedos de la Reina
17	Cuatro Cuatros	37	Santo Domingo	57	Xecue
18	Decantos Vinícola	38	Sol y Barro	58	Casa Pedro Domecq
19	Durand Viticultura	39	Torres Alegre y Familia		

Anexo B. Grupos del dendograma de similitud

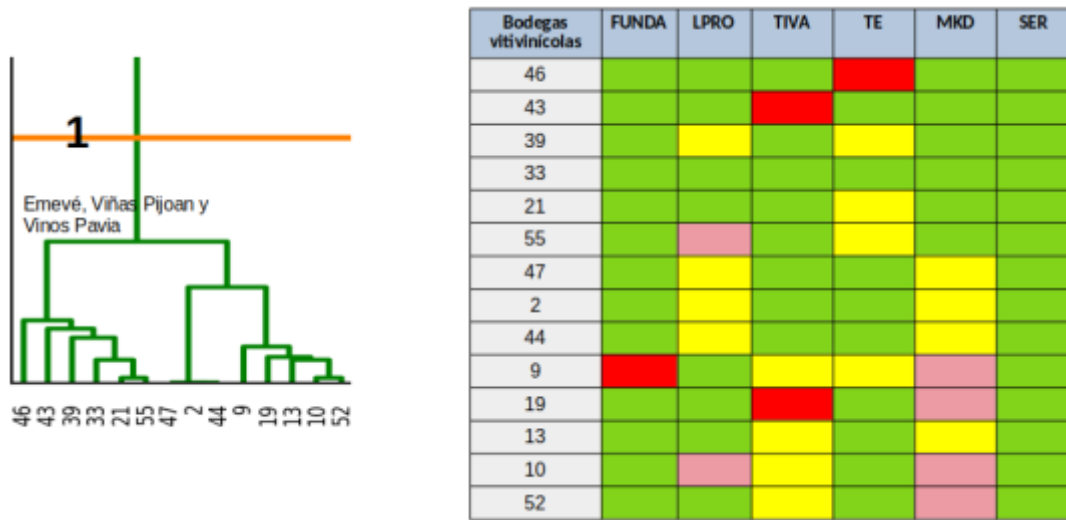


Figura B1. Grupo 1 del dendograma de similitud

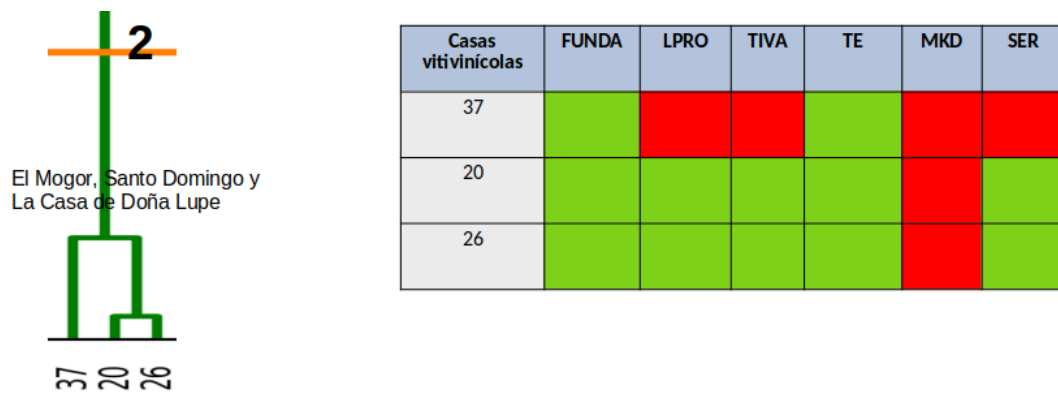
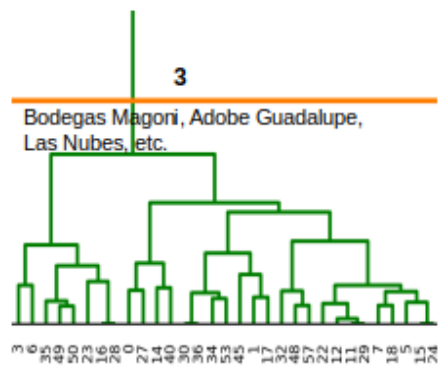


Figura B2. Grupo 2 del dendograma de similitud



Casas vitivinícolas	FUNDA	LPRO	TIVA	TE	MKD	SER
3	Green	Yellow	Green	Pink	Pink	Green
6	Yellow	Green	Red	Pink	Pink	Green
35	Green	Yellow	Green	Green	Pink	Green
49	Yellow	Yellow	Green	Green	Pink	Green
50	Yellow	Green	Green	Yellow	Pink	Green
23	Yellow	Green	Green	Green	Pink	Yellow
16	Green	Green	Green	Yellow	Pink	Green
28	Green	Green	Green	Yellow	Pink	Green
0	Pink	Red	Yellow	Yellow	Yellow	Green
27	Pink	Pink	Yellow	Green	Green	Green
14	Pink	Green	Green	Yellow	Pink	Green
40	Pink	Green	Green	Yellow	Yellow	Green
30	Green	Yellow	Green	Green	Green	Green
36	Green	Yellow	Green	Green	Green	Green
34	Green	Yellow	Green	Yellow	Yellow	Green
53	Yellow	Yellow	Green	Green	Yellow	Green
45	Green	Yellow	Pink	Green	Green	Red
1	Green	Red	Yellow	Green	Green	Green
17	Green	Yellow	Yellow	Green	Green	Green
32	Green	Pink	Pink	Green	Green	Green
48	Green	Pink	Yellow	Green	Green	Yellow
57	Green	Green	Yellow	Green	Yellow	Yellow
22	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green
12	Green	Green	Green	Green	Green	Green
11	Green	Green	Green	Green	Green	Green
29	Green	Green	Green	Green	Green	Green
7	Yellow	Green	Green	Yellow	Yellow	Green
18	Yellow	Pink	Green	Yellow	Green	Green
5	Green	Pink	Green	Green	Yellow	Green
15	Yellow	Green	Green	Green	Yellow	Green
24	Yellow	Green	Green	Green	Yellow	Green

Figura B3. Grupo 3 del dendograma de similitud



Casas vitivinícolas	FUNDA	LPRO	TIVA	TE	MKD	SER
31						
58						
4						
25						

Figura B4. Grupo 4 del dendograma de similitud



Casas vitivinícolas	FUNDA	LPRO	TIVA	TE	MKD	SER
8	Red	Green	Yellow	Green	Green	Yellow
38	Green	Green	Pink	Green	Green	Yellow
54	Green	Red	Pink	Green	Green	Green
56	Green	Red	Pink	Green	Green	Green
41	Green	Green	Red	Red	Green	Yellow
42	Green	Green	Yellow	Green	Green	Green
51	Red	Red	Yellow	Green	Green	Green

Figura B5. Grupo 5 del dendograma de similitud