

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA AGRONÓMICA,
ALIMENTARIA Y DE BIOSISTEMAS



**CARACTERIZACIÓN DE LAS
CONDICIONES HIGROTÉRMICAS EN
BODEGAS CATEDRAL PARA LA
CRIANZA DE VINO GENEROSO**

TESIS DOCTORAL

Presentada para optar al título de Doctor por:

Eduardo Galán Navia-Osorio

Ingeniero Agrónomo

Madrid, 2023



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE
INGENIERÍA AGRONÓMICA, ALIMENTARIA Y
DE BIOSISTEMAS

Doctorado en Agroingeniería

**CARACTERIZACIÓN DE LAS
CONDICIONES HIGROTÉRMICAS EN
BODEGAS CATEDRAL PARA LA
CRIANZA DE VINO GENEROSO**

TESIS DOCTORAL

Presentada para optar al título de Doctor por:

Eduardo Galán Navia-Osorio

Ingeniero Agrónomo

Bajo la dirección de:

Dr. Fernando Ruiz Mazarrón

Dr. Cesar Porras Amores

Madrid, 2023

Título: CARACTERIZACIÓN DE LAS CONDICIONES HIGROTÉRMICAS EN
BODEGAS CATEDRAL PARA LA CRIANZA DE VINO GENEROSO

Autor: Eduardo Galán Navia-Osorio

Programa de Doctorado: Agroingeniería

Dirección de tesis:

Dr. Fernando Ruiz Mazarrón, Profesor Titular, Universidad Politécnica de
Madrid (Director)

Dr. Cesar Porras Amores, Profesor Contratado Doctor, Universidad
Politécnica de Madrid (Codirector)

Revisores externos:

Tribunal de tesis:

Fecha de defensa:

Tribunal nombrado por el Magnífico Rector de la Universidad Politécnica de Madrid, el día..... de..... de.....

Presidente: _____

Vocal: _____

Vocal: _____

Vocal: _____

Secretario: _____

Suplente: _____

Suplente: _____

Realizado el acto de defensa y lectura de la Tesis el día..... de..... de..... en Madrid, habiendo obtenido la calificación de.....

El presidente,

El secretario,

Los vocales

A Mario y Alba,

AGRADECIMIENTOS

A todas las bodegas que han colaborado en este proyecto, permitiéndonos entrar en sus templos y desvelar los secretos que allí se guardan.

A Ignacio Cañas Guerrero, tutor de esta tesis, y a Cesar Porras Amores, codirector, por su inestimable ayuda, pero muy especialmente al profesor Fernando Ruíz Mazarrón, director de esta tesis, por todo su esfuerzo y dedicación hacía mí, sin su ayuda hubiese sido imposible este viaje.

Al mundo del vino de Jerez, del que me considero un verdadero admirador, y al que ruego, perdone los errores que un simple aficionado pueda haber cometido durante la redacción de este trabajo.

“Las grandes bodegas de los extractores de Jerez de la Frontera y Sanlúcar de Barrameda son sumamente espaciosas, ventiladas, divididas en tramos y sostenidas por arcos muy elevados de fábrica. No usan sótanos ni cuevas subterráneas para la conservación de sus vinos que sazonan y se perfeccionan en las bodegas levantadas sobre el piso de la calle. Las hay que cogen dos, tres y cuatro mil botas de vino siendo las más capaces de todas ellas las de la casa Haurie una de cuyas naves mide noventa y cinco varas de línea por cuarenta y dos de ancho con seis calles y doce hiladas de botas.”

Esteban Boutelou (1804)

RESUMEN

Los vinos de Jerez, amparados por las Denominaciones de Origen “*Jerez-Xérès-Sherry*” y “*Manzanilla-Sanlúcar de Barrameda*”, presentan la singularidad de la crianza biológica. A diferencia de los vinos tradicionales, la crianza biológica requiere de la presencia de microorganismos, principalmente ciertas variedades de levaduras, que forman una capa en la superficie del vino conocida como “velo de flor”. Este proceso, extremadamente sensible, requiere de unas condiciones ecológicas muy limitadas en cuanto a temperatura, humedad y ventilación.

El proceso de crianza de los vinos de Jerez tiene lugar en unos edificios conocidos como “bodegas Catedral”. Estas construcciones, algunas de ellas centenarias, han sido propuestas por numerosos autores como un excelente ejemplo de edificios de consumo de energía casi nulo, ya que permiten, gracias a sus características arquitectónicas singulares, el mantenimiento de las condiciones ambientales requeridas para la crianza biológica sin ningún tipo de sistema mecánico de climatización.

Esta tesis tiene por objeto caracterizar las condiciones higrotérmicas para la crianza biológica bajo velo de flor. Para ello, en una primera etapa, fue necesario hacer un extenso estudio bibliográfico de las condiciones ecológicas necesarias para el correcto desarrollo del velo de flor, así como de las características constructivas de las bodegas en las que se produce. Paralelamente, se monitorizó durante varios años el ambiente higrotérmico de varias bodegas de diversas características constructivas (tradicionales y modernas), donde se elaboran vinos de Jerez de calidad reconocida, principalmente de tipo “Manzanilla”, ubicadas todas ellas en la localidad de Sanlúcar de Barrameda. Se instalaron decenas de sensores de temperatura y humedad distribuidos en diferentes zonas del interior y exterior de las bodegas. Los millones de datos generados fueron analizados a través de estadística descriptiva, histogramas de frecuencia y diagramas psicrométricos de las variaciones de temperatura y humedad relativa. Además, se analizaron otros factores como la estabilidad, estratificación, uniformidad y amortiguamiento en el interior.

Los resultados ponen de manifiesto las peculiaridades de la crianza biológica y las diferencias con la crianza tradicional de otros vinos, como son: importantes variaciones de temperatura a lo largo del año, menor estabilidad debido a la necesidad de ventilación constante o una elevada estratificación vertical, esta última especialmente en primavera y verano. Por otra parte, se observa que el ambiente interior de la zona dedicada a la crianza está fuera de los rangos de confort descritos por la bibliografía enológica durante períodos prolongados de tiempo (en el caso más extremo, el 96% del tiempo fuera del intervalo recomendado). Por esta

razón, se propone un diagrama psicrométrico con los intervalos mensuales de confort de referencia, lo que debería ser una herramienta muy útil para la industria vinícola, con el fin de controlar y garantizar el desarrollo del velo de flor durante el proceso de crianza biológica.

En una segunda parte, sobre una de estas bodegas, en la que se produce uno de los vinos de mayor prestigio internacional, se desarrolló por primera vez un modelo de simulación energética mediante el programa DesignBuilder®. El modelo fue validado con dos años de datos experimentales, obteniendo un coeficiente de determinación (R^2) del 96% para valores horarios y del 99% con promedios diarios. El modelo desarrollado es una herramienta de utilidad para analizar propuestas de mejora del desempeño de estos edificios.

Por último, se simuló el modelo modificando las condiciones climáticas exteriores para un escenario de cambio climático, aplicando para ello métodos de “morfismo” para la transformación de los datos meteorológicos en base a las predicciones del Modelo General de Circulación (GCM, por sus siglas en inglés) de “Hadley Center Climate” (HadCM3) para un escenario de emisiones medias-altas (A2), según el “Informe Especial” de “El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático” (IPCC, por sus siglas en inglés). Los resultados de la transformación de una serie histórica de 9 años muestran que, para el año 2050, la temperatura en la zona de crianza superaría el límite de confort durante el 19% del año, llegando incluso hasta el 34% en años cálidos, comprometiendo la supervivencia de los microorganismos implicados en la crianza biológica. Para finales de siglo la predicción del modelo es aún peor.

SUMMARY

Sherry wines, covered by the "Jerez-Xérès-Sherry" and "Manzanilla-Sanlúcar de Barrameda" Designations of Origin, have the singularity of biological ageing. Unlike traditional wines, biological ageing requires the presence of micro-organisms, mainly certain varieties of yeast, which form a layer on the surface of the wine known as "veil of flor". This extremely sensitive process requires very limited ecological conditions in terms of temperature, humidity and ventilation.

The ageing process for Sherry wine takes place in buildings known as "Cathedral warehouses". These buildings, some of which are hundreds of years old, have been proposed by numerous authors as an excellent example of Nearly-Zero Energy Buildings, as they allow, thanks to their unique architectural characteristics, the maintenance of the environmental conditions required for biological ageing without any type of mechanical heating/cooling system.

The aim of this thesis is to characterize the hygrothermal conditions for biological ageing under flor. To do this, in a first stage, it was necessary to carry out an extensive bibliographic study of the ecological conditions necessary for the correct development of the veil, as well as the constructive characteristics of the cellars in which it is produced. At the same time, the hygrothermal environment of several wineries of different constructive characteristics (traditional and modern), where Sherry wines of recognized quality are produced, mainly of the "Manzanilla" type, all located in the town of Sanlúcar de Barrameda, were monitored for several years. Dozens of temperature and humidity sensors were installed in different areas inside and outside the wineries. The millions of data generated were analyzed through descriptive statistics, frequency histograms and psychrometric diagrams of temperature and relative humidity variations. In addition, other factors such as stability, stratification, uniformity and damping in the interior were analyzed.

The results show the peculiarities of biological ageing and the differences with the traditional ageing of other wines, such as: significant temperature variations throughout the year, lower stability due to the need for constant ventilation or high vertical stratification, the latter especially in spring and summer. On the other hand, it is observed that the interior environment of the ageing area is outside the comfort ranges described by the wine literature for prolonged periods of time (in the most extreme case, 96% of the time outside the recommended range).

For this reason, a psychrometric diagram with reference monthly comfort intervals is proposed, which should be a very useful tool for the wine industry, in order to control and guarantee the development of the veil of flor during the biological ageing process.

In a second part, an energy simulation model was developed for the first time for one of these wineries, which produces one of the most internationally renowned wines, using the DesignBuilder software. The model was validated with two years of experimental data, obtaining a coefficient of determination (R^2) of 96%, for hourly values, and 99% with daily averages. The model developed is a useful tool for analyzing proposals to improve the performance of these buildings.

Finally, the model was simulated by modifying the outdoor climatic conditions for a climate change scenario, applying "morphing" methods for the transformation of the weather data based on the predictions of the Hadley Center Climate General Circulation Model (HadCM3) for a medium-high emissions scenario (A2), according to the Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). The results of the transformation of a 9-year time series show that by 2050 the temperature in the ageing zone would exceed the comfort limit for 19% of the year, and up to 34% in warm years, compromising the viability of micro-organisms involved in biological ageing. By the end of the century, the prediction is even worse.

ÍNDICE

1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 BREVE RESEÑA HISTÓRICA.....	2
1.2 VALOR TURÍSTICO Y CULTURAL.....	6
1.3 LOS VINOS GENEROSOS.....	7
1.3.1 CLASIFICACIÓN DE LOS VINOS GENEROSOS	7
1.3.2 LOS VINOS GENEROSOS EN CIFRAS	10
1.3.3 ÁREA DE PRODUCCIÓN.....	13
1.3.4 VITICULTURA.....	16
1.4 PROCESO DE ELABORACIÓN DE LOS VINOS GENEROSOS.....	21
1.4.1 ELABORACIÓN.....	21
1.4.2 CLASIFICACIÓN Y ENCABEZADO.....	24
1.4.3 PROCESO DE CRIANZA	25
1.4.4 CARACTERÍSTICAS DE LA CRIANZA BIOLÓGICA BAJO VELO DE FLOR.....	28
1.4.5 CARACTERÍSTICAS DE LA CRIANZA OXIDATIVA.....	30
1.4.6 LA BOTA DE JEREZ.....	31
1.5 CONDICIONES PARA LA CRIANZA DE LOS VINOS GENEROSOS.....	33
1.5.1 CONDICIONES DE TEMPERATURA EN LA CRIANZA BIOLÓGICA.....	33
1.5.2 OTROS FACTORES QUE CONDICIONAN LA FORMACIÓN DEL VELO DE FLOR.....	34
1.5.3 CONDICIONES DE TEMPERATURA EN LA CRIANZA OXIDATIVA.....	35
1.5.4 CONDICIONES DE HUMEDAD.....	37
1.6 LAS BODEGAS CATEDRAL.....	38
1.6.1 CATALOGACIÓN DE LAS BODEGAS CATEDRAL	38
1.6.2 BODEGAS TRADICIONALES: CARACTERÍSTICAS CONSTRUCTIVAS	39
1.6.3 ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS.....	41
1.6.4 AMBIENTE INTERIOR DE LAS BODEGAS.....	44
1.7 EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO.....	47
1.8 JUSTIFICACIÓN	48
2 OBJETIVOS.....	50
3 MATERIALES Y MÉTODOS.....	52
3.1 SELECCIÓN DE LAS BODEGAS	53
3.1.1 MARCO GEOGRÁFICO	53
3.1.2 LAS BODEGAS SELECCIONADAS.....	53
3.2 DISEÑO DEL SISTEMA DE MONITORIZACIÓN.....	56
3.2.1 INSTRUMENTAL UTILIZADO PARA LA MONITORIZACIÓN.....	56
3.2.2 PLAN DE MONITORIZACIÓN DE LAS BODEGAS.....	58
3.4 CARACTERIZACIÓN DEL AMBIENTE HIGROTÉRMICO DE LAS BODEGAS.....	67
3.4.1 COMPORTAMIENTO GLOBAL	68

3.4.2	DIAGRAMAS PSICOMÉTRICOS	69
3.4.3	ESTABILIDAD	70
3.4.4	UNIFORMIDAD.....	71
3.4.5	AMORTIGUAMIENTO.....	73
3.5	MODELO DE SIMULACIÓN ENERGÉTICA.....	75
3.5.1	SOFTWARE EMPREADO	75
3.5.2	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE DEFINICIÓN DEL MODELO	76
3.5.3	OBTENCIÓN DE LOS DATOS CLIMÁTICOS	82
3.5.4	VALIDACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN	82
3.6	TRANSFORMACIÓN DE LOS DATOS METEOROLÓGICOS.....	84
4	RESULTADOS.....	85
4.1	INTRODUCCIÓN.....	86
4.2	ANÁLISIS HIGROTÉRMICO DEL CONJUNTO DE LAS BODEGAS.....	86
4.2.1	COMPORTAMIENTO GLOBAL HIGROTÉRMICO.....	87
4.2.2	DIAGRAMA PSICOMÉTRICO.....	89
4.2.3	ESTABILIDAD	90
4.2.4	UNIFORMIDAD.....	93
4.3	INTERVALOS DE CONFORT	95
4.4	VALIDACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN	99
4.5	ANÁLISIS DE LAS CONDICIONES AMBIENTALES EN UN ESCENARIO DE CAMBIO CLIMÁTICO.....	102
4.6	IMPACTO DEL DESEMPEÑO DE LA BODEGA EN UN ESCENARIO DE CAMBIO CLIMÁTICO.....	103
4.6.1	SITUACIÓN ACTUAL	103
4.6.2	PREDICCIÓN FUTURA EN ESCENARIO DE CAMBIO CLIMÁTICO	104
5	CONCLUSIONES.....	107
6	FUTURAS INVESTIGACIONES.....	110
7	BIBLIOGRAFÍA	112

ANEXOS A LA MEMORIA	118
ANEXO I: DESCRIPCIÓN DE LAS BODEGAS ANALIZADAS.	124
A.I.1 Bodega La Arboledilla	124
A.I.2 Bodega Hidalgo la Gitana	133
A.I.3 Bodega Barbiana	141
A.I.4 Bodega Las Pastoras	148
A.I.5 Bodega Bonanza	155
A.I.6 Bodega La Goya	162
ANEXO II: CARACTERIZACIÓN HIGROTÉRMICA DE LAS BODEGAS ANALIZADAS.	168
A.II.1 Bodega La Arboledilla	168
A.II.2 Bodega Hidalgo La Gitana	225
A.II.3 Bodega Barbiana	275
A.II.4 Bodega Las Pastoras	365
A.II.5 Bodega Bonanza	407
A.II.6 Bodega La Goya	443
ANEXO III: PUBLICACIONES	473
A.III.1 Estratificación en “bodegas catedral” para la crianza de vinos generosos	474
A.III.2 Industrial Buildings with Zero Energy Consumption: Cathedral Warehouse for Sherry Wines	481
A.III.3 Hygrothermal conditions for the biological aging of sherry wine	494
A.III.4 Impact of climate change on sustainable production of sherry wine in nearly-zero energy buildings	505
A.III.5 Energy simulation of a ZEB winery for ageing of sherry wine	514
LISTADO DE FIGURAS	516
LISTADO DE TABLAS	535

1 INTRODUCCIÓN

1.1 BREVE RESEÑA HISTÓRICA

La evolución en la producción, crianza y comercialización vitivinícola del Marco de Jerez a lo largo de los siglos ha determinado la identidad actual de sus vinos y de las bodegas que los producen.

Son abundantes, desde tiempos antiguos, las citas históricas sobre la fuerte vinculación cultural del vino en la región, así como de su peso en la economía local. Sin embargo, no ocurre lo mismo con los edificios bodegueros, su nacimiento y desarrollo a lo largo de la historia sigue siendo todavía motivo de controversia entre los diferentes autores.

No se conoce con certeza el momento en que se inició el cultivo de la vid en la región, se especula con la posibilidad de que se produjese con la llegada de los fenicios en el siglo VIII a.C. (Borrego Plá, 1998). Se conoce con mayor certeza que los cartagineses (s. VI a.C.) y romanos (s. II a.C.) desarrollaron plenamente su cultivo, como atestiguan las primeras fuentes escritas sobre la producción y exportación de vinos de la región, documentado en autores clásicos como Estrabón (s. I a.C.) y Columela (s. I d.C.) (Gómez Díaz, 2002). Se cree que es de tiempos romanos la introducción de la barrica de madera siguiendo el modelo y costumbre gala (Borrego Plá, 1998).

Durante la dominación musulmana (s. VIII-XIII), pese a la prohibición de la ley coránica de consumir alcohol, el cultivo de la vid se mantuvo, oficialmente para la obtención de pasas y mistelas. Los árabes introdujeron la costumbre de añadir alcohol a los vinos (fortificado) con objeto de hacerlos más estables durante el viaje hasta los lugares donde eran comercializados (Hidalgo and Fielden, 2009).

Con la reconquista de la región, emprendida por el Rey Alfonso X el Sabio (s. XIII), se produce un periodo de fuerte expansión de la industria vinatera, convirtiéndose rápidamente en la principal industria de la región (Gómez Díaz, 2002). De esta época son las primeras referencias escritas sobre la utilización de las antiguas mezquitas como bodegas para su almacenamiento (Aladro-Prieto, 2012).

Durante el siglo XV se produce el despegue del comercio del vino de Jerez, favorecido por una serie de factores:

1. Su situación geográfica en la costa atlántica (Gómez Díaz, 2002);
2. Los importantes beneficios arancelarios y jurídicos (nueva carta de privilegios de 1517) que se concede a los mercaderes extranjeros, que favorece el establecimiento de comunidades foráneas, principalmente inglesas (Jeffs, 2016),

cuya actividad se intensificará a lo largo del siglo XVI, lo que supuso el establecimiento en 1530 de la Compañía de Andalucía (Jefferies, 2016) y la confirmación por parte de Enrique VIII de Sanlúcar de Barrameda como centro oficial de los ingleses en Andalucía (Hidalgo and Fielden, 2009).

3. El descubrimiento de las Américas y el establecimiento de nuevas rutas comerciales, monopolizadas por Sevilla, y posteriormente Cádiz, que favoreció especialmente a los vinos de Jerez, debido, por un lado, a su cercanía geográfica y, por el otro, a su favorable capacidad de soportar los largos viajes en barco, esto último gracias a la costumbre ampliamente existente de “encabezar” los vinos.

A principios del siglo XVIII se produce el nacimiento de los Gremios de la Vinatería, controlados por parte de una oligarquía de cosecheros del antiguo régimen, cuyas ordenanzas suponían de facto un control sobre el precio del vino y limitaba la capacidad de comerciantes, generalmente con una mentalidad más liberal, que ambicionaban la modernización de la industria (Maldonado Rosso, 1999). Este control garantizaba un precio favorable en los “vinos base” y del año, evitando la especulación que pretendían los segundos.

Desde la segunda mitad del siglo XVIII se producen una serie de importantes transformaciones técnicas y económicas en la vitivinicultura del Marco de Jerez, en consonancia con los cambios experimentados en toda Europa –nuevas demandas internacionales de bienes de lujo, reorganización de la producción y comercialización, etc.– lo que dio lugar a la reestructuración del negocio del vino y al asentamiento de la moderna industria vitivinícola (Gómez Díaz, 2002). Aunque se desconoce el momento exacto de su nacimiento, es durante estos años cuando aparecen las primeras referencias a los “vinos finos” (Hidalgo and Fielden, 2009) y su proceso de elaboración artesanal en tabernas de la región a partir de vinos base (recién fermentados), en los cuales, una vez sazonados y modificados, se observa cómo según se van vaciando las botas, se produce una mejora del vino restante (Boutelou, 1807).

Gracias al levantamiento de la prohibición de almacenar caldos por la Real Orden de 1778, los bodegueros se hacen eco de este producto de mayor valor añadido y se produce un proceso de mejora continuada en las técnicas de crianza, mediante mecanismos de prueba y error, que conducen a la aparición de nuevas técnicas asociadas a las necesidades observadas para el desarrollo del “velo de flor”, obteniéndose de este proceso la aparición de un novedoso sistema incipiente de crianza, denominado de “soleras” o “criaderas y soleras” (Gómez Díaz, 2002; Maldonado Rosso, 1999). En consonancia con lo anterior, estos cambios favorecen el desarrollo de la arquitectura bodeguera. Las primeras “grandes bodegas”, cuyas superiores dimensiones permiten distinguirlas de las que habitualmente se construían antes de su

aparición, son fruto de la evolución arquitectónica de las bodegas existentes desde principios del XVII, existiendo ejemplos de grandes bodegas desde el último tercio del XVIII (Aladro-Prieto, 2012).

Tras la guerra de independencia de España se produce un importante cambio de paradigma, una nueva reestructuración social y económica: la desintegración de los privilegios del antiguo régimen (cuya culminación se produce con la extinción en 1834 del Gremio de la Vinatería) (Maldonado Rosso, 1999), reformas administrativas, desamortización eclesiástica y la irrupción de una nueva clase social –La burguesía vitícola jerezana–. Además, se producen en esta época grandes adelantos técnicos y científicos –nuevas prácticas agronómicas, mejora de variedades (supremacía de Listán), desarrollo pleno del sistema de “criaderas y soleras”–, unidos a una fuerte demanda extranjera, especialmente en Reino Unido, que provocan un nuevo impulso de la industria vinatera del Marco de Jerez. También coinciden con la repatriación de capitales procedentes de las américas con motivo de la emancipación de las colonias. Se desarrolla un nuevo tipo de empresa vertical que asume la totalidad de las fases del sistema productivo y que necesitará construir grandes instalaciones capaces de asumir los requerimientos de la nueva estructura industrial. De esta dinámica empresarial surgirán los grandes complejos del Jerez. A mediados del Siglo XIX el Jerez constituía una de las primeras fuentes de ingreso del sector exterior nacional de España (Aladro-Prieto, 2012).

Como se ha mencionado anteriormente, con la desamortización de Mendizábal numerosos edificios eclesiásticos salieron a la venta y fueron comprados por compañías bodegueras que, tras ligeras modificaciones, fueron utilizados para la crianza oxidativa de vinos olorosos (Hidalgo and Fielden, 2009). El desarrollo de la estructura industrial del vino de Jerez durante el siglo XIX exigió de la disposición de un nuevo modelo de edificio bodeguero, de este modo nacería lo que se define como “bodega basilical”, entendida como estructura arquitectónica básica, compuesta por un espacio único, diáfano y con cubierta a dos aguas, que permitiese construir grandes complejos de manera rápida y económica, y que toma como modelo los edificios preindustriales de la época (graneros, astilleros y fábricas) (Aladro-Prieto, 2012). A partir de este modelo básico y gracias al rápido crecimiento de la industria vinatera se va produciendo una evolución del modelo para su adecuación a las necesidades observadas a partir de la experiencia en la crianza de los vinos Generosos. De este modo, durante el último tercio de siglo XIX se alcanza el nivel máximo en el desarrollo de estos edificios con el nacimiento de las grandes “bodegas Catedral”, consideradas por muchos autores como paradigma de la construcciones bioclimática pasivas de máxima eficiencia energética (García del Barrio Ambrosy, 1984). De esta época son algunas de las edificaciones más características de este género y de las que muchas de ellas han perdurado hasta nuestros días.

El 90% de las exportaciones de vinos de Jerez desde el siglo XVIII y hasta buena parte del siglo XX se han dirigido al mercado británico. Entre 1850 y 1873, la elevación del nivel de vida británico está detrás de esta primera etapa de oro del vino de Jerez. Para 1870 más del 50% de la población activa jerezana dependía de la industria vinatera. La escasez y los precios desorbitados empujaron a buscar mostos en otras provincias (vinos forasteros), a la vez que se produjo un fenómeno de falsificaciones y adulteraciones hasta el punto de que en pocos años se hizo difícil averiguar el origen de los vinos, provocando la depreciación y el desprestigio de los caldos jerezanos (Chamorro and Carrillo, 1987) . La aparición de la epidemia de filoxera (1894-1900) resultó en la completa destrucción del viñedo, que no volvería a recuperar los niveles anteriores. Para 1906 sólo se había replantado el 30% de la superficie anterior a la plaga y para 1914 el 45% (Montañés, 2017).

La eterna división entre los tres sectores tradicionales implicados en la vinatería jerezana (extractores, almacenistas y cosecheros) (Chamorro and Carrillo, 1987) bloquearon la creación de una marca colectiva antes de 1914 (Montañés, 2017) que culminó con la constitución del consejo Regulador de la denominación de origen «*Jerez-Xérèz-Serry*» en 1934.

Desde mediados del siglo XX el negocio del vino de Jerez vivió una nueva etapa de intenso crecimiento (Medina García De Polavieja, 2014). El ciclo expansivo que se produce en las décadas de los años 60 y 70 del siglo pasado, con una favorable coyuntura económica exterior, importantes ayudas a la exportación, aparición de la distribución comercial moderna, nuevos empresarios que practicaban agresivas políticas comerciales, etc. (Rodríguez-García and Vieira-Rodríguez, 2017), favorece un nuevo resurgimiento en la construcción de bodegas. En esta ocasión, aunque apoyándose en los modelos tradicionales de “bodegas Catedral”, se incluyen nuevas técnicas de construcción con la incorporación de nuevos materiales. Sin embargo, queda patente que la experiencia de más de dos siglos había establecido unas dimensiones óptimas de las bodegas, vinculadas directamente con la necesidad de renovación del aire interior en el proceso de crianza. Por tanto, modificar las dimensiones básicas del espacio tradicional bodeguero suponía poner en riesgo la calidad de los vinos (Miró-Miró et al., 2021). De este periodo son la mayoría de las bodegas de moderna construcción.

1.2 VALOR TURÍSTICO Y CULTURAL

El vino ha sido el principal recurso económico del Área de Jerez a lo largo de los siglos, impregnando la cultura jerezana de un fuerte vínculo al vino en todos sus niveles, lo que se traduce en una espectacular arquitectura bodeguera, donde su máximo exponente son las “bodegas Catedral”, un proceso de elaboración único denominado de “criaderas y soleras” y un singular paisaje de viñedos “los pagos”, destacando las exóticas tierras de “albariza”. Este patrimonio cultural permite a la región romper la fuerte estacionalidad de la oferta turística dominante de “sol y playa” (Gómez Díaz, 2002). Este patrimonio histórico y cultural convierten al Marco de Jerez en el principal destino enoturístico de España y en una de las más importantes del mundo, recibiendo más de 500.000 visitantes al año (ACEVIN, 2019).

Con la entrada del siglo XXI, tras años de decadencia, ha habido una revalorización de la industria del vino en la región de Jerez. Una consecuencia de esta diversificación es la rehabilitación de la economía de la industria a través de una nueva fuente de ingresos que complementa o reemplaza a las tradicionales formas y genera efectos indirectos para otros sectores productivos. Con este proceso de reconversión rural ha perdido su carácter de zona vinícola y ha evolucionado en una región enoturística (Foronda-Robles, 2018).

1.3 LOS VINOS GENEROSOS

1.3.1 CLASIFICACIÓN DE LOS VINOS GENEROSOS

1.3.1.1 Vinos de licor

Según el marco normativo europeo, la definición “vinos de licor” engloba una serie de productos heterogéneos de difícil clasificación. En general se trata de productos con un grado alcohólico volumétrico adquirido no inferior al 15%, ni superior al 22%, a excepción de determinados vinos de licor con una denominación de origen o una indicación geográfica protegida, a los que se les adiciona alcohol vinícola, destilado de uva o pasas, mosto de uva o mezclar de varios de ellos (EU, 2013). Todos los productos amparados por las Denominaciones de Origen «*Jerez-Xérès-Sherry*» y «*Manzanilla-Sanlúcar de Barrameda*» pertenecen a este grupo.

1.3.1.2 Vinos de Jerez

En la referencia “vinos de Jerez” se engloban los productos protegidos por las Denominaciones de Origen «*Jerez-Xérès-Sherry*» y «*Manzanilla-Sanlúcar de Barrameda*» que incluyen los tipos (Figura 1) (Andalucía, 2022):

- **Vinos Generosos:** Elaborados mediante crianza biológica u oxidativa, a partir de mostos procedentes de uva de las variedades autorizadas, principalmente “Palomino”, “secos” (completamente fermentados), en donde el contenido en azúcares reductores no supera los 5 gramos por litro, con un envejecimiento promedio mínimo de dos años. En este grupo se incluyen los vinos de tipo “Fino” y “Oloroso”.
- **Los Vinos Dulces:** Elaborados mediante crianza oxidativa a partir de mostos parcialmente fermentados, procedentes de uvas de las variedades “Pedro Ximénez” y “Moscatel”, generalmente “pasificadas” ¹. En este grupo se incluyen los vinos “Moscatel”, “Pedro Ximénez” y “Dulce”.

¹ consistente en dejar asolear durante 15-20 días para que se pasifiquen, de esta manera se van perdiendo humedad concentrándose los azúcares y otros componente de la uva como son los ácidos, taninos, etc. hasta conseguir un contenido de azúcar de aproximadamente 500-550 g/l.

- **Vinos Generosos de Licor:** Grupo heterogéneo de difícil clasificación, obtenidos a partir de diversas combinaciones de los grupos anteriores y en ocasiones con adición de mostos concentrados. Algunos ejemplos de este complejo grupo son:
 - Cream: Oloroso + Dulce / mosto concentrado
 - Medium: Generoso (Amontillado) + Dulce / mosto concentrado
 - Pale Cream: Fino + mosto concentrado
 - Dry: Amontillado + Pedro Ximénez

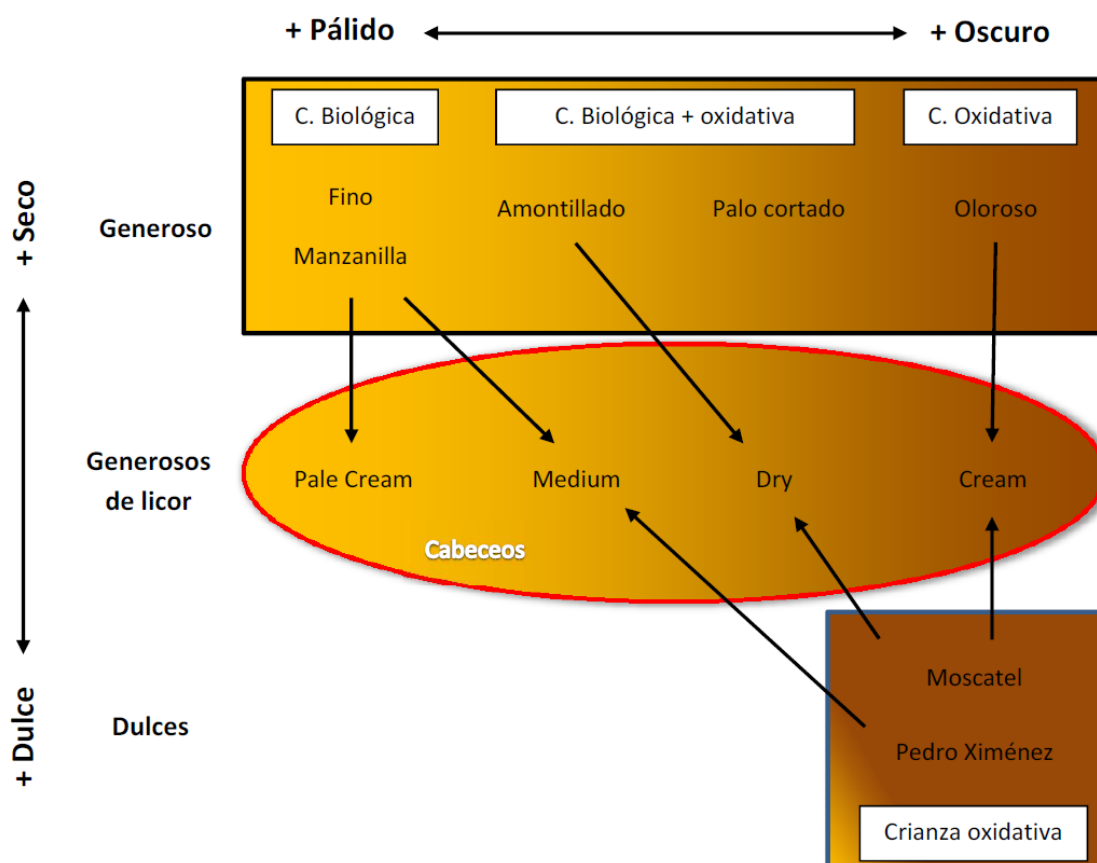


Figura 1. Clasificación de los vinos de Jerez

1.3.1.3 Vinos Generosos

Según la normativa europea la mención específica tradicional “vino Generoso” queda reservada al vino de licor con denominación de origen protegida, elaborado total o parcialmente bajo velo y obtenido a partir de uva blanca procedente de las variedades autorizadas, ofrecido al consumo con dos años media de maduración en toneles de roble (EU, 2009).

La elaboración bajo velo a que se refiere el párrafo anterior se entenderá como el proceso biológico que, realizándose en el desarrollo espontáneo de un velo de levaduras típicas sobre

la superficie libre del vino tras la fermentación alcohólica total del mosto, confiere al producto características analíticas y organolépticas específicas.

Los vinos Generosos se pueden dividir en dos tipos primordiales: los de tipo Fino y Oloroso, siendo los primeros más punzantes, más secos, aunque de menor graduación y cuerpo que los segundos, que son en general más oscuros. Los dos tipos fundamentales se subdividen en otros subtipos, a saber: Fino, Manzanilla y Amontillado los primeros, y en Oloroso, Palo Cortado y Raya los segundos (Tabla 1) (González Gordon, 1970).

Tabla 1

Clasificación de los vinos Generosos de Jerez.

Tipo de Vino	Crianza	Alcohol (% en vol.)	Azúcar (g/l)
Manzanilla	Biológica	15-17	<5
Fino	Biológica	15-17	<5
Amontillado	Biológica / Oxidativa	16-22	<5
Palo Cortado	Biológica / Oxidativa	17-22	<5
Oloroso	Oxidativa	17-22	<5

A continuación se describen las principales características organolépticas de cada uno de los tipos (Andalucía, 2022; González Gordon, 1970):

- **Fino y Manzanilla:** vino pálido, muy seco, aunque no ácido. Vino de color amarillo pajizo a dorado pálido, con aroma y sabor propios de la crianza biológica. Sus especiales características son el resultado de que la totalidad de su proceso de crianza se ha desarrollado bajo velo de flor.
- **Amontillado:** vino de color ámbar más o menos intenso, de aroma y sabor característicos, como consecuencia de su proceso particular de crianza, que incluye una primera fase de crianza biológica, seguida de una fase de crianza oxidativa.
- **Palo cortado.** vino de color ámbar a caoba, de aroma característico con notas que recuerdan al Amontillado, si bien al paladar presenta características similares al Oloroso, como consecuencia de su proceso de crianza oxidativa, tras la desaparición del velo de flor inicial.
- **Oloroso:** vino de color ámbar intenso a caoba, de sabor característico y aroma muy acusado, como consecuencia de su proceso de crianza oxidativa.

1.3.1.4 La Manzanilla

La Manzanilla es un vino del tipo Fino y, aunque la uva utilizada procede de la misma área de producción que el resto y su proceso de fermentación es el mismo, su crianza en la localidad de Sanlúcar de Barrameda, donde se producen unas condiciones mesoclimáticas especiales, le confiere unas cualidades únicas y diferenciadas que no se pueden lograr en ninguna otra zona del Marco. La denominación de origen «*Manzanilla-Sanlúcar de Barrameda*» se estableció en el año 1964 sobre la singularidad de este fenómeno (Andalucía, 2013).

En Sanlúcar, el velo que cubre la Manzanilla, a diferencia de otras zonas, está presente todo el año, con un mayor o menor espesor según la época, desarrollando la máxima vegetación en otoño y primavera, cuando el clima es más moderado. De esta forma aísla completamente al vino del contacto con el oxígeno del aire y además consume el oxígeno disuelto en el líquido, por lo que se puede decir que la Manzanilla es quizás el vino más reducido de todos (Hidalgo and Fielden, 2009).

1.3.2 LOS VINOS GENEROSOS EN CIFRAS

La expedición total al mercado de vinos de Jerez amparados por las Denominaciones de Origen «*Jerez-Xérès-Sherry*» y «*Manzanilla-Sanlúcar de Barrameda*» ascendió durante el año 2021 a 317.984 hectolitros (Jerez-Xérès-Sherry, 2021). De este volumen total los vinos Generosos suponen el 42,2%, los vinos Generosos de Licor el 53,9% y, por último, los vinos Dulces naturales apenas suponen un 3,9% de las ventas (Figura 2). Entre los vinos Generosos los de crianza biológica (Fino y Manzanilla), suponen un 90% del total, repartiéndose una cuota de mercado a partes iguales con una producción anual aproximada de 60.000 hectolitros cada uno.

El Marco de Jerez y sus vinos han sufrido intensamente el impacto del proceso de globalización, que se ha traducido en una constante caída de las exportaciones y pérdidas significativas de cuotas de mercado exterior (Rodríguez-García and Vieira-Rodríguez, 2017). Tras el ciclo expansivo vivido durante las décadas de los años 60 y 70 del siglo pasado, en los que se llegó a alcanzar la producción máxima histórica (superando los 1,3 millones de hectolitros) con una cuota de exportación superior al 80% de la producción, se produce una decadencia progresiva durante las décadas siguientes (Figura 3).

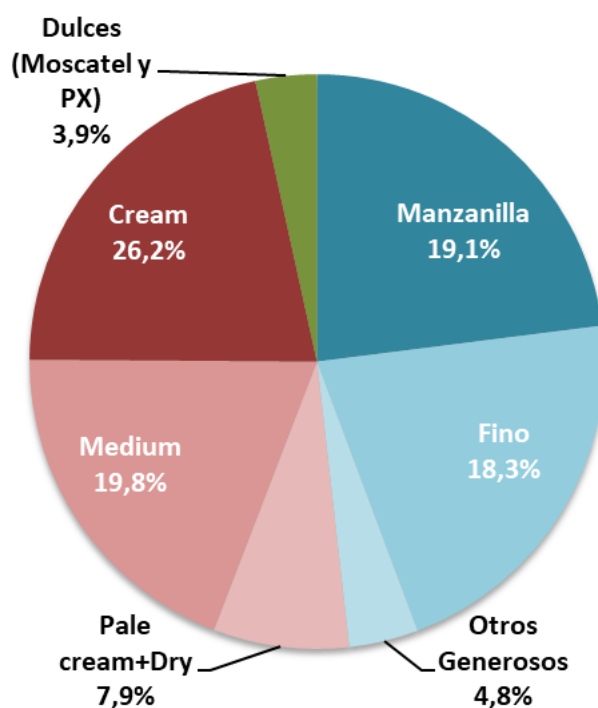


Figura 2. Venta de vino de Jerez por tipos. Fuente: Consejo Regulador de las DD.OO. «Jerez-Xérès-Sherry» y «Manzanilla-Sanlúcar de Barrameda» (2021).

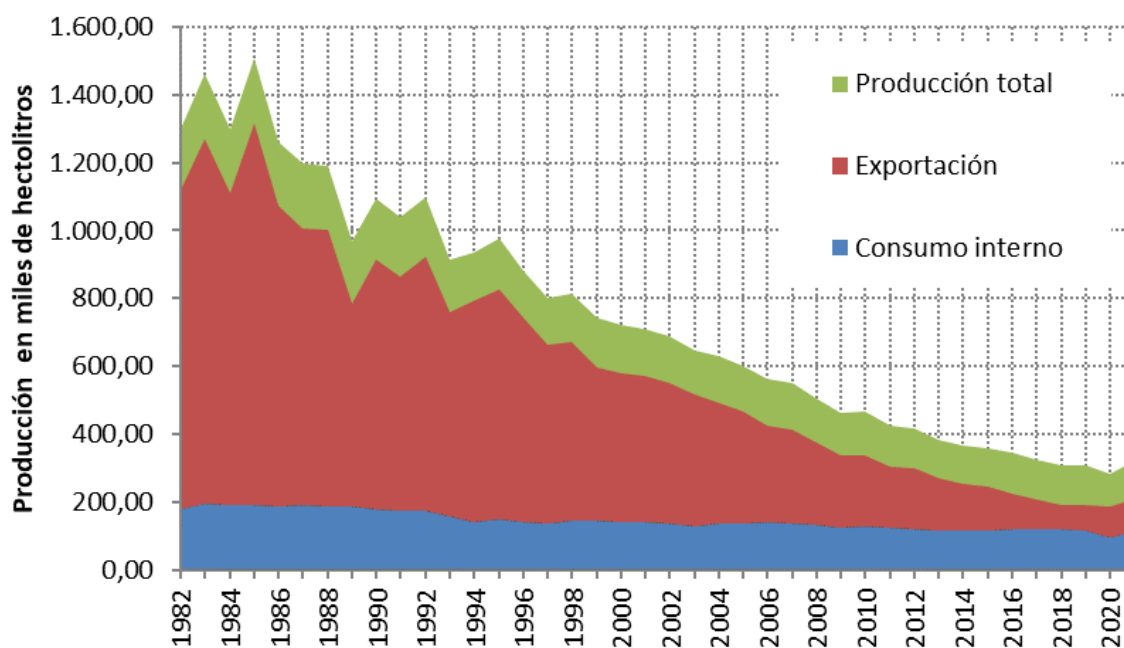


Figura 3. Producción de vino de Jerez en el periodo 1982-2021. Fuente: Consejo Regulador de las DD.OO. «Jerez-Xérès-Sherry» y «Manzanilla-Sanlúcar de Barrameda» (2021).

En la actualidad los vinos de Jerez exportan algo más del 60% de su producción, siendo Europa su principal mercado, especialmente Reino Unido, Holanda y Alemania. En estos

mercados tiene mayor aceptación los Generosos de Licor, suponiendo el 70% de las exportaciones totales. Cabe destacar que Reino Unido ha ocupado un lugar históricamente preferente, llegando en el pasado a consumir el 35% de la producción total, en la actualidad sigue siendo el segundo mercado más importante acaparando con el 31% de la producción total. La Figura 4 representa la evolución de la exportación de los vinos Generosos en el periodo entre 1993 y 2021.

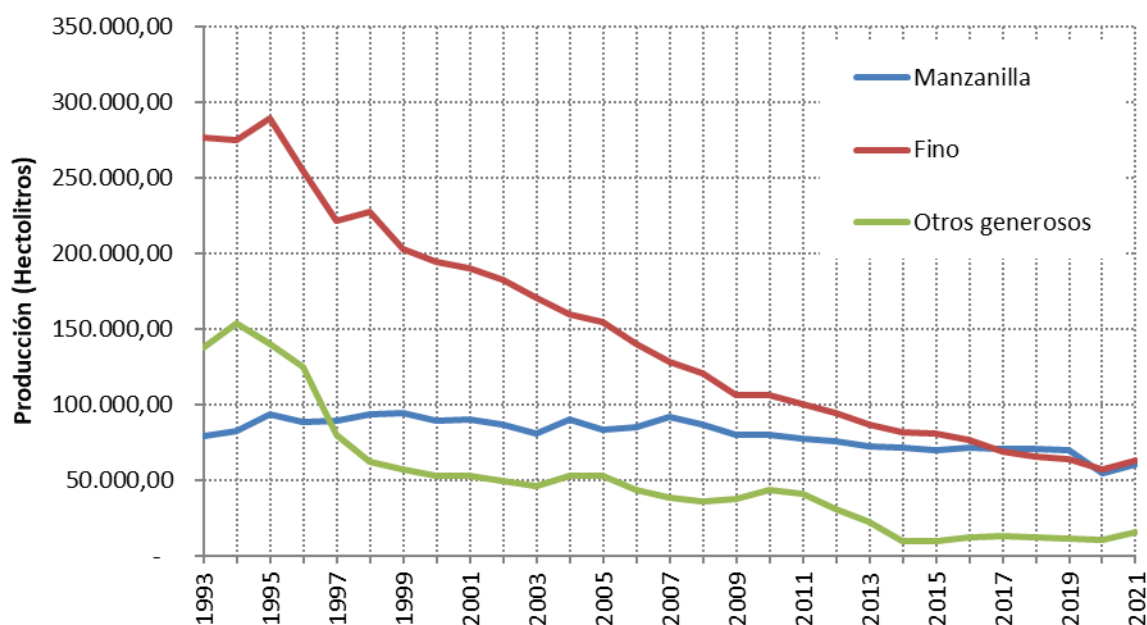


Figura 4. Evolución del mercado exterior de vino Generoso entre el periodo 1993-2021. Fuente: Consejo Regulador de las DD.OO. «Jerez-Xérès-Sherry» y «Manzanilla-Sanlúcar de Barrameda» (2021).

En el mercado nacional la reducción no ha sido tan acusada (Figura 5), pasando de 180.000 a 110.000 hectolitros. En este caso los vinos Generosos suponen el 75% del consumo total, aunque este valor se ha visto rebajado desde el 90% de hace 40 años, cogiendo algo de peso los Generosos de Licor.

La Manzanilla no ha experimentado prácticamente ningún descenso en 40 años, manteniendo una producción media de 65.000 hectolitros, siendo la práctica totalidad de la producción para el mercado interior. No ocurre igual con el Fino cuyo consumo nacional se ha visto reducido en 2/3, desde los 70.000 a los 23.000 hectolitros.

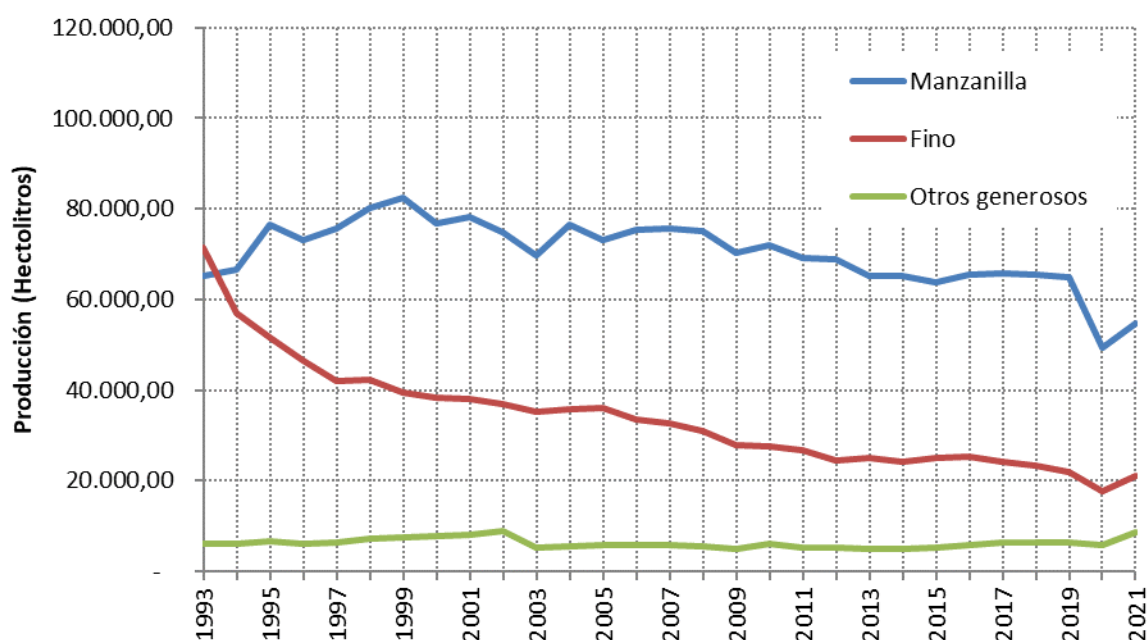


Figura 5. Evolución del mercado nacional de vino Generoso entre el periodo 1993-2021. Fuente: Consejo Regulador de las DD.OO. «Jerez-Xérès-Sherry» y «Manzanilla-Sanlúcar de Barrameda» (2021).

1.3.3 ÁREA DE PRODUCCIÓN

El Área de Producción de los vinos protegidos por las DD.OO. «Jerez-Xérès-Sherry» y «Manzanilla-Sanlúcar de Barrameda» está constituida por los terrenos ubicados en los términos municipales de Jerez de la Frontera, El Puerto de Santa María, Sanlúcar de Barrameda, Trebujena, Chipiona, Rota, Puerto Real, Chiclana de la Frontera, Lebrija y San José del Valle situadas dentro del área delimitada al Este por el meridiano de Greenwich 5° 49' Oeste y al Norte por el paralelo 36° 58' Norte (Figura 6) (Andalucía, 2022). La superficie total de plantación fue superior a las 7.000 hectáreas en el año 2021, de los cuales dos tercios se encuentra en el término municipal de Jerez de la Frontera, seguido muy de lejos por Sanlúcar de Barrameda (10%) y Trebujena (8%) (Jerez-Xérès-Sherry, 2021).

1. **Albarizas:** situadas en lo alto de las lomas, de color blanquecino, bastante ricas en calizas y que labradas se esponjan mejorando la retención del agua y reduciendo su evaporación. Estas tierras producen los mostos de mayor calidad. Dependiendo de su contenido en caliza se subdividen en Tajón (80%), Tosca (40-80%), Lentejuela (50%) y Lustrillo (30-50%)
2. **Barros:** suelos más bastos, de color más oscuro por contener una mayor proporción de materia orgánica, con un contenido en caliza inferior al 30%, producen vinos de inferior calidad, pero con mayor producción. Estas tierras se sitúan en las partes bajas de las zonas de cultivo.
3. **Arenas:** suelos pobres que son tierras sueltas y de color amarillo rojizo, situadas en los lugares próximos a los cursos de agua. Sobre ellos no se puede desarrollar la phylloxera.

De esta manera, se define “Jerez Superior” como la zona integrada por las viñas plantadas en tierras de albarizas, lo que supone en la actualidad más del 90% de la superficie total regulada (Jerez-Xérès-Sherry, 2021). Los municipios que contiene mayoritariamente este tipo de viñedos son Jerez de Frontera, que supone el 73% de la superficie total, Sanlúcar de Barrameda, Trebujena y el Puerto de Santa María.

Por otro lado, se define “Jerez Zona” como la zona integrada por los pagos de tierras de barros y arenas. Todos los municipios contienen viñedo de este tipo pero es especialmente importante en Chiclana de la Frontera, Puerto Real y Lebrija (Andalucía, 2002).

El Consejo Regulador establece que al menos el 60% de la uva de la variedad palomino utilizada para la elaboración de los vinos protegidos debe de proceder de viñedos de la zona del “Jerez Superior” (Andalucía, 2022).

La importancia de la calidad de la uva, que viene condicionada por la de la tierra y del pago o zona que la produce, influye en la bioquímica posterior de la crianza. Al iniciar la crianza biológica en bodega es imprescindible partir de vinos jóvenes bien constituidos (Barbadillo, 1993).

1.3.4 VITICULTURA

La elaboración de los vinos protegidos por las DD.OO. «Jerez-Xérès-Sherry» y «Manzanilla-Sanlúcar de Barrameda» se realiza exclusivamente con uvas procedentes del Área de Producción de las variedades Palomino, Pedro Ximénez y Moscatel, cualquiera que sea la sinonimia utilizada para cada una de ellas (Andalucía, 2022).

La variedad Palomino es la más extendida para la producción de vinos de Jerez, representando en la actualidad el 98% de la superficie de viñas del Área de Jerez (Jerez-Xérès-Sherry, 2021). Pedro Ximenez y Moscatel son variedades muy minoritarias destinadas a la obtención de vinos Dulces (Domecq, 2011).

El material vegetal empleado está muy limitado, por lo que hay quien lo considera un factor natural dentro del proceso de producción junto con el suelo y el clima. Por esta razón, las técnicas de cultivo son el único factor dependiente exclusivamente de la mano del hombre y que tienen una gran influencia en la producción y calidad de la cosecha (García de Luján, 1997). En el caso de los vinos de Jerez, estando limitada por normativa la producción máxima a 80 hectolitros por hectárea (Andalucía, 2022), estas labores están orientadas básicamente a la consecución de la mayor calidad posible (García de Luján, 1997).

1.3.4.1 La variedad Palomino

Se considera una variedad autóctona de Andalucía Occidental, cultivada desde hace siglos, a tenor de las citas realizadas por numerosos autores (Boutelou, 1807; Fernández de Bobadilla, 1956; González Gordon, 1970). Recibe numerosas sinonimias como Listán, Albán, Manzanilla de Sanlúcar, Palomina blanca, etc. (García de Luján, 1997).

Se adapta muy bien a las tierras de albarizas, donde se obtienen los mostos de mayor calidad. Florece y brota a finales de marzo y madura a mediados de septiembre (García de Luján, 1997). Los valores medios de grado Baumé de la uva recién recogida se sitúan próximos a los 12º, con un índice de acidez bajo próximo a los 3,7º, expresado en gramos por litro de ácido tartárico (Fernández de Bobadilla, 1956; García de Luján, 1997; González Gordon, 1970).

1.3.4.2 Marco de Plantación

La densidad de plantación está condicionada por factores como el clima de la zona, el tipo de suelo, la programación de las labores y los objetivos que se desean lograr. El sistema de plantación tradicional era el de marco real (1,5 x 1,5 m), sin embargo, en la actualidad, las plantaciones se disponen en líneas con marcos rectangulares de 2,5 x 1,25 m o similares,

compatibles con la mecanización (García de Luján, 1997). La densidad suele oscilar entre las 3.000 y las 4.000 cepas por hectárea.

1.3.4.3 **Orientación de la plantación**

En general es preferible establecer las líneas o “liños” de cepas con orientación norte-sur, con objeto de obtener la máxima insolación posible. No obstante, gracias al grado de insolación de la región y debido a la orografía típica de las tierras de albariza, formado por colinas de pendiente media entre el 10 y el 15%, es común hacerlas coincidir con la dirección de máxima pendiente, con objeto de favorecer la mecanización (García de Luján, 1997). Este sistema obliga a cambiar la orientación de las calles varias veces en una misma parcela.

En ocasiones también se tienen en cuenta otros criterios, como la máxima longitud de las calles, la dirección de los vientos dominantes, la presencia de lindes, carreteras, etc. (Andalucía, 2002).

1.3.4.4 **Plantación**

La vida útil de los viñedos alcanza los treinta años. Antiguamente las viñas vivían más, pero la operación del injerto y el sistema de cultivo de la viña en la actualidad, en el que ha aumentado el grado de mecanización y la productividad de la plantación, ha hecho descender su longevidad (Andalucía, 2002). Entre cultivo y cultivo es necesario dejar descansar el terreno un periodo mínimo de tres años para amortiguar la “fatiga” del suelo y evitar posibles infecciones. Desde un punto de vista agronómico lo más aconsejable es establecer algún cultivo herbáceo antes de la replantación.

Debido a la escasez en elementos nutritivos del suelo de albarizas, como labores preparatorias, se realiza un abonado de fondo aplicado en superficie seguido de un laboreo de desfonde o “agostado” con una profundidad de 70-80 cm, con objeto de romper el terreno. Estas labores se desarrollan durante el periodo estival dejando surcos para favorecer la entrada de las lluvias.

A comienzos del invierno se procede al allanado del suelo y el replanteo del marco de plantación. Entre diciembre y enero se procede a la plantación del pie de patrón americano conocido como “barbado”. (García de Luján, 1997).

Para realizar la plantación se emplean patrones que han pasado un año en vivero para enraizar convenientemente. Normalmente se finaliza la plantación a finales de diciembre o en enero, antes de la brotación, en cualquier caso. Para acondicionar el patrón se podan las raíces, dejando tan sólo las de la parte terminal con una longitud de 1 a 4 cm, y los brotes del patrón,

respetando únicamente el brote mejor situado y desarrollado, con unas dos yemas. El patrón tiene una longitud de unos 60 cm y un grosor de 5 mm, necesarios para que las raíces alcancen una profundidad considerable y soporten el verano seco y cálido del Marco. Una vez realizada la plantación, es importante mantener el terreno limpio de malas hierbas para que el patrón se desarrolle lo más posible (Andalucía, 2002).

1.3.4.5 **Injerto**

La lucha contra la filoxera (*Dactylospora vitifolia*) exige injertar la variedad de vinífera que se desea explotar sobre el patrón americano (*Vitis riparia*, *V. rupestris* y *V. berlandieri* principalmente). En la zona de Jerez el injerto (generalmente de la variedad Palomino) se efectúa durante el mes de agosto del mismo año de la plantación del patrón, evitando las épocas de reposo absoluto y de máxima actividad vegetativa de la planta. La técnica de inserción es de “yema” del tipo en “escudete”, que consiste en incrustar una sola yema con parte del sarmiento de la variedad principal de vid en el costado del patrón, por debajo de la superficie del suelo. Para ello, primero se descubre el patrón hasta unos 15-20 cm de profundidad, realizando después una hendidura llamada “cajuela” donde se encaja la yema. A continuación se liga con rafia, dejando libre la yema, y finalmente se vuelve a aporcar la cepa para proteger la zona hasta el final del invierno siguiente (Andalucía, 2002; García de Luján, 1997; Jerez-Xérès-Sherry, 2019).

En la primavera siguiente se descubre la zona injertada. A partir de ese momento comenzará a brotar la yema, dando lugar a la futura parte aérea de la cepa (Jerez-Xérès-Sherry, 2019).

Aquellas plantas que no han podido injertarse en verano en yema o donde ha fallado el injerto (un 90% de injertos prendidos se puede considerar un buen resultado), son injertadas tipo púa al final del invierno siguiente. Para este injerto, se descabeza el patrón por debajo del injerto en yema, se hiende por el centro y en la hendidura se introduce una “espiga” o sarmiento de varias yemas en forma de cuña para penetrar en la abertura. El injerto se ata con rafia, se coloca un tutor amarrado a la espiga y se cubre con tierra, brotando al poco tiempo (Andalucía, 2002).

1.3.4.6 **Poda**

A partir de la entrada en producción de la planta (cuarto año) el sistema mayoritario de poda en el viñedo de Jerez, efectuado durante el reposo invernal, es el tradicional de “vara y pulgar”(Andalucía, 2022; García de Luján, 1997; González Gordon, 1970) dejando una vara

con un máximo de ocho yemas y un pulgar con dos. De la vara se obtiene la cosecha del año y del pulgar la vara del año siguiente y así sucesivamente (García de Luján, 1997).

1.3.4.7 **Manejo del suelo**

El laboreo del terreno en las tierras de albariza, dadas sus especiales características, es una práctica secular orientada a aprovechar al máximo el agua de lluvia y conservarla después durante los periodos estivales. Para ello, en otoño la tierra se “abre” con surcos bien marcados que permiten recoger el agua hacia capas profundas. A partir de la primavera la tierra se cierra al máximo para ofrecer la menor superficie de evaporación, evitando al máximo la pérdida de humedad (García de Luján, 1997). Estas labores se complementan en algunos casos con tratamientos herbicidas.

1.3.4.8 **Fertilización**

El suelo de albariza es pobre en materia orgánica y en los principales macronutrientes que la planta necesita. No obstante, las necesidades de la vid no son excesivas en comparación con las de otras especies, y gracias a su potente sistema radicular, consigue explorar gran cantidad de suelo. La base de la fertilización en el Marco es el abonado de suelo, reduciéndose la utilización del abonado foliar a casos de carencias. En esta zona tiene gran tradición el abonado orgánico, fundamentalmente con estiércol animal. El abono orgánico se aplica normalmente en otoño e invierno, enterrándolo. Tradicionalmente se sitúa en hoyos (denominados “baúles”) de unos 60 cm de profundidad en medio de cada cuatro plantas. La viña se abona así por cuartas partes, por lo que cada cuatro años queda toda la explotación estercolada. El grado de mecanización de la fertilización depende de las posibilidades de cada viticultor y las dimensiones de la parcela, existiendo todavía muchos casos en los que el aporte de fertilizantes se realiza con poca ayuda de la maquinaria (Andalucía, 2002).

1.3.4.9 **Vendimia**

Es necesario que la uva alcance la maduración tecnológica que se corresponde con el momento en que la uva se encuentra en su punto óptimo (azúcar, acidez y pH) (García de Luján, 1997). Esto suele producirse habitualmente entre los meses de agosto y septiembre. Es conveniente no retrasar la recolección, pues se evitan pérdidas en el grano de uva y peligros de pudriciones en el racimo. La vendimia se realizará con el mayor esmero, recogiendo exclusivamente la uva sana y madura. Los mostos destinados a la elaboración de los vinos protegidos tendrán como mínimo 10,5 grados Baumé (Andalucía, 2022).

La "corta" del racimo sigue en muchos casos realizándose a mano. Se calcula que un hombre corta unos 690 kg de uva en una jornada. Sin embargo, la mecanización se ha

extendido a aproximadamente un 75% de la superficie total de vinos del Área de Jerez (Jerez-Xérès-Sherry, 2021). La uva debe llegar al lagar lo antes posible, sin sufrir daños y en las mejores condiciones sanitarias para evitar procesos de fermentación indeseados, realizándose en muchos casos la vendimia durante la noche para evitar las altas temperaturas.

La producción media de los viñedos del Marco de Jerez es de 10.500 kg por hectárea. Sin embargo, estando la producción limitada por el Consejo Regulador a 80 hectolitros por hectárea y teniendo la uva un rendimiento medio del 70 litros por cada 100 kg, la producción calificada está limitada a 11.428 kg por hectárea (Andalucía, 2022). La producción no calificada debe ser destinada a otros usos. Durante la campaña de 2021 se recogieron 57,6 millones de kilogramos de uva obteniendo de ellos 45,4 millones de litros de mosto de los cuales el 15% no fue calificado (Jerez-Xérès-Sherry, 2021).

Durante los últimos años se está observando un adelanto progresivo de las fechas de vendimia sobre los periodos tradicionales. En este sentido, cabe destacar que la vendimia de 2001 ya se consideraba excepcionalmente temprana; llevándose a cabo entre el 14 de agosto y el 25 de septiembre (Andalucía, 2002). Sin embargo, en el año 2021 la vendimia se adelantó al 2 de agosto y para el año 2022 fue la más temprana que se conoce, iniciándose el mes de julio. Este fenómeno se asocia al efecto del cambio climático.

1.4 PROCESO DE ELABORACIÓN DE LOS VINOS GENEROSOS

1.4.1 ELABORACIÓN

El proceso de elaboración de los vinos Generosos consta de las siguientes fases: prensado, fermentación, clasificación y encabezado, sobretablas (crianza en fase estática) segunda clasificación, criaderas y soleras (crianza en fase dinámica) (Figura 7).

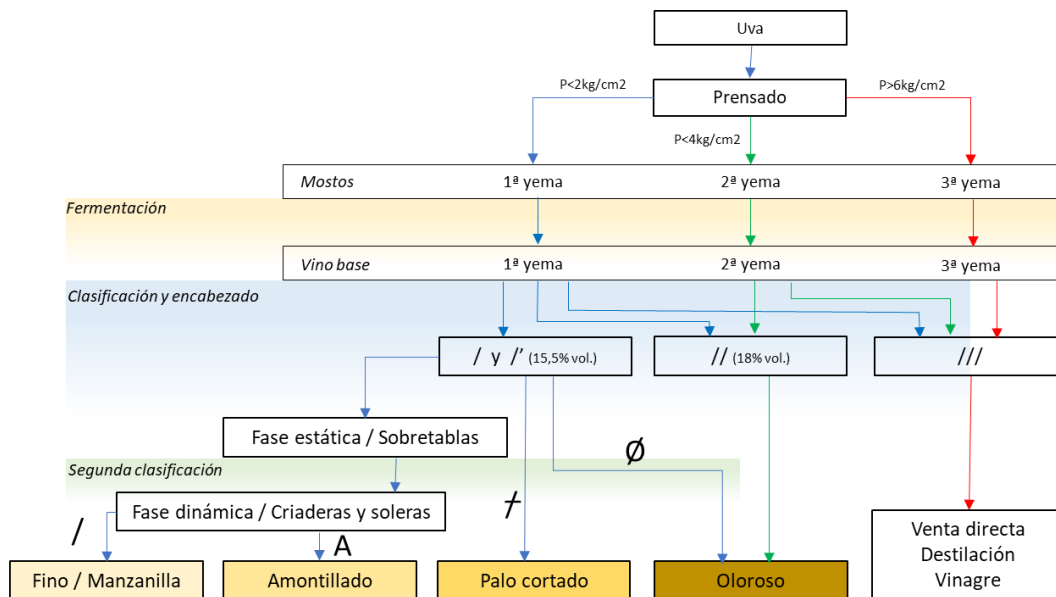


Figura 7. Diagrama de flujo del proceso de elaboración de los vinos Generosos de Jerez.

1.4.1.1 El prensado

A la llegada de la uva al lagar se procede al control de pesaje. La uva es analizada para controlar su estado sanitario y grado de maduración. La separación de las uvas con pudrición es fundamental para evitar problemas en la fermentación (Domecq, 2011).

La uva recepcionada es sometida al proceso de la “molturación”, que consiste en romper la uva para favorecer el proceso de prensado. Este proceso es realizado con una “molturadora” o “despalilladora”. En el caso del vino de Jerez es muy importante que este proceso se realice con sumo cuidado para evitar que se afecte en exceso la parte sólida u “hollejo” (piel, semillas y pedúnculos), lo que puede liberar taninos y otras sustancias que oscurecen o producen sabores indeseados en este tipo de vinos.

El siguiente proceso consiste en el prensado de la pulpa para la obtención del mosto. La presión aplicada tiene una incidencia muy importante, de manera que durante el proceso de extracción se van a obtener diferentes fracciones de mosto, según el nivel de presión aplicada:

1. Mosto de "primera yema" (aproximadamente el 65% del volumen total), obtenido con presiones inferiores a 2 Kg/cm².
2. Mosto de "segunda yema" (aproximadamente el 23 %), obtenido con presiones inferiores a 4 Kg/cm²
3. Mosto de "prensa", con presiones superiores a 6 Kg/cm² (Jerez-Xérès-Sherry, 2019).

Los mostos de las primeras prensadas (más ligeras) son destinados a los vinos de crianza biológica, los mostos de la segunda prensada son destinados a los de crianza oxidativa, mientras que los más pesados son utilizados para el enjuague de los barriles y destilados (Jeffer, 2016).

Como se mencionó anteriormente, la calificación máxima para la elaboración de los vinos protegidos es de 70 litros de vino por cada 100 kilogramos de uva (Andalucía, 2022). El resto de los mostos obtenidos con presiones superiores se utilizan para la elaboración de otros vinos no calificados.

En esta etapa, los mostos de calidad para la elaboración de vinos Generosos deben registrar valores desde 10,5 (valor mínimo permitido por las DD.OO.) hasta 15° en la escala Baumé (Jeffer, 2016).

1.4.1.2 Preparación de los mostos

Los mostos deben ser acondicionados para su fermentación con objeto de prevenir procesos de contaminación bacteriana y fenómenos de oxidación. Primeramente, se someten a una corrección del pH mediante la adición de "ácido tartárico". El pH del mosto destinado a los vinos de tipo Fino no debe sobrepasar el valor de 3,3, siendo ideal un valor de 3,15. Este factor no es crítico para mostos destinados a Olorosos, siendo un valor de pH por encima de 3,6 perjudicial (Jeffer, 2016). Una vez corregido el pH, el mosto es tratado con "anhídrido sulfuroso" en dosis que pueden variar según el estado sanitario de la vendimia entre 60 y 100 mg/l.

En esta etapa los mostos contienen una importante cantidad de materia sólida como tierra, restos de pieles, pipas, etc... por lo que deben ser sometidos a un proceso de "desfangado" mediante centrifugación o decantación (Hidalgo Togores, 2011). El vino desfangado es transferido a los depósitos de fermentación.

1.4.1.3 **La Fermentación**

Antiguamente la fermentación se realizaba en botas de fermentación y aunque actualmente algunas bodegas mantienen este sistema con objeto de ofrecer un producto diferenciado, de forma mayoritaria se produce en los grandes tanques de acero inoxidable, donde el proceso está perfectamente controlado tanto con la aportación de levaduras seleccionadas como el control de la temperatura de la misma (Domecq, 2011).

Así durante la fermentación los azúcares contenidos en el mosto se transforman en alcohol por el efecto metabólico de las levaduras, liberando anhídrido carbónico y generando calor. La fermentación se divide en dos fases: una primera fase denominada "fermentación tumultuosa" y una segunda, denominada "fermentación lenta". La fermentación tumultuosa es el proceso por el cual más del 90% del azúcar que contiene la uva se convierte en alcohol etílico y anhídrido carbónico. Suele durar entre 3 y 7 días, dependiendo de la temperatura (Andalucía, 2002). Durante esta etapa se controla la temperatura del mosto en fermentación, entre los 15 y 25 °C (Domecq, 2011), mediante sistemas de refrigeración. En estos vinos la temperatura no debe pasar de 28 ó 30 °C (García del Barrio Ambrosy, 1984). Pasada aproximadamente una semana, debido a la reducción de la concentración de azúcares remanente, se inicia la fermentación lenta, que se alargará durante varias semanas hasta transformar la práctica totalidad de azúcar en alcohol. Esta fase no requiere de refrigeración. Cuando el nivel de glucosa/fructosa es reducido a concentraciones inferiores al 0,5% se produce la supresión de la respiración de las levaduras (Bravo Abad, 1995).

En ocasiones las bodegas de los vinos de Jerez siguen un particular proceso de fermentación en la fase tumultuosa, agregan las levaduras de vino seco a un volumen de mosto fresco equivalente a 1/3 de la capacidad total del tanque de fermentación. El mismo volumen de mosto fresco se agrega 4 a 5 días después de que comienza la fermentación. Después de otros 4 a 5 días, los tanques se terminan de llenar con mosto fresco (el último tercio del volumen). El primer volumen actúa como un inóculo para la segunda porción de mosto fresco agregado, y así sucesivamente. Esta adición progresiva de mosto durante la elaboración del vino de Jerez garantiza una calidad uniforme de los vinos antes de su crianza (Esteve-Zarzoso et al., 2001).

1.4.1.4 **Trasiego, clarificación y vino base**

El vino obtenido tras el proceso de fermentación se denomina "vino base". El siguiente proceso consiste en trasegar el vino de los tanques de fermentación a otros depósitos con sumo cuidado, con objeto de separarlos de los sedimentos decantados en el fondo de la cuba (lías) durante el proceso de fermentación. Este proceso se conoce como "trasiego" o "deslío"

(Maldonado Rosso, 1999). Se debe evitar en todo momento remover estas impurezas del fondo, para ello se utilizan unas bombas especiales de trasiego que además evitan la exposición al oxígeno del vino.

Posteriormente el vino es sometido a un proceso de “clarificación” para su “estabilización”, que consiste en retirar sólidos en suspensión como sedimentos removidos, restos de levaduras u otros compuestos que puedan afectar negativamente en su crianza. Se pueden utilizar diferentes técnicas como la filtración, decantación o coagulación, en función del resultado deseado para cada producto.

El vino resultante del trasiego y la clarificación es un vino claro, pálido, seco, poco ácido, con una graduación alcohólica que puede oscilar entre los 11 y 13,5° (Domecq, 2011).

1.4.2 CLASIFICACIÓN Y ENCABEZADO

Antiguamente, la clasificación de los mostos tenía por objeto separar el vino que tendría en el futuro un envejecimiento bajo velo de flor (Fino y Manzanilla) del vino que no pasaba este proceso (Oloroso) (Domecq, 2011). Sin embargo, hoy en día la ciencia y la técnica juegan un papel más importante y el tipo de vino puede ser predeterminado, lo que ha supuesto una gran ayuda para los productores (Hidalgo and Fielden, 2009).

Una de las principales características del vino de Jerez es el “fortificado” o “encabezado”, proceso por el cual se adiciona una cierta cantidad de alcohol puro de vino destilado al 95% vol., con objeto de aumentar ligeramente su graduación alcohólica. Con esta técnica se reduce el riesgo de infecciones y, por tanto, se favorece su estabilidad biológica. Hay que tener en cuenta que en climas cálidos los vinos de baja graduación alcohólica corren un enorme riesgo de “acetificación” (formación de vinagres) (Suárez Lepe, 2004). Además, la graduación alcohólica del mosto determina su proceso de crianza.

Para los mostos destinados a crianza biológica el alcohol destilado no se añade directamente, sino que primeramente se mezcla al 50% con el propio vino y se deja maridar unos días, con objeto de que el choque alcohólico no afecte a las levaduras implicadas en la formación del velo de flor (Domecq, 2011).

Entre los meses de noviembre y diciembre se realiza una clasificación organoléptica mediante cata para cada uno de los depósitos de donde sigue contenido el “mosto”. Antiguamente esta clasificación se realizaba en cada una de las botas de fermentación (Domecq, 2011). El sistema clásico de clasificación y encabezado consistía en:

1. Una raya (/): mostos que se aprecian más ligeros y pálidos, generalmente obtenidos por prensado de “primera yema”, adecuados para la crianza biológica. Se alcoholizan hasta alcanzar una graduación alcohólica de 15-15,5°.
2. Raya y punto (/'): mostos en los que se observan características similares a los anteriores, pero existe alguna duda. En este caso se destinan a crianza biológica, pero con un mayor seguimiento. Igual que en el caso anterior se alcoholizan hasta alcanzar una graduación alcohólica de 15-15,5°.
3. Dos Rayas (//): mostos con más cuerpo, más estructurados, generalmente obtenidos por prensado de “segunda yema”. No se consideran adecuados para la crianza biológica y se destinan a crianza oxidativa (Olorosos). En este caso se alcoholizan hasta alcanzar un mínimo de 17-18°.
4. Tres Rayas (///), destilación (#) o vinagre (V): mostos con ciertos defectos como alta acidez volátil, suciedad, olores irregulares. Destinados a venta directa, destilación o para vinagre.

1.4.3 PROCESO DE CRIANZA

Los vinos Generosos se obtienen a partir de la crianza de tipos biológica, oxidativa o la combinación de ambas en diferentes etapas. Casi la mitad del total de las botas existentes en las bodegas están destinadas a la crianza biológica de vinos de tipo Fino y Manzanilla (Jerez-Xérès-Sherry, 2021). La crianza requiere un exquisito cuidado para dirigir y ayudar al vino en su desarrollo natural (Chamorro and Carrillo, 1987).

Los vinos de Jerez amparados por la DD.OO. «*Jerez-Xérès-Sherry*» debían criarse en bodegas enclavadas en la “Zona de Crianza”, circunscrita a los términos municipales de Jerez de la Frontera, El Puerto de Santa María y Sanlúcar de Barrameda, y sólo a ésta última localidad para la Denominación de Origen «*Manzanilla-Sanlúcar de Barrameda*» (Andalucía, 2013). Sin embargo, con la entrada en vigor de la nuevo Pliego de Condiciones de la D.O. «*Jerez-Xérès-Sherry*» en el año 2022 (Andalucía, 2022), desaparece este concepto y se amplía la protección a todas las bodegas del Área de Producción.

La crianza de los vinos de Jerez se logra en dos fases. La primera fase, llamada “sobretablas”, es un proceso estático. La segunda fase, llamada de “criaderas y soleras” es un sistema dinámico (Esteve-Zaroso et al., 2001).

1.4.3.1 **Fase estática. "Sobretablas"**

Tras el encabezado, los vinos jóvenes alcoholizados son transferidos a las botas de la primera fase de crianza estática, denominada "sobretablas". Reciben este nombre porque tradicionalmente el alcohol para fortificar se vertía primero en las botas o sobre tablas y posteriormente se añadían los mostos (Jerez-Xérès-Sherry, 2019).

Las botas de los vinos destinados a crianza biológica se llenan hasta dejar un vacío, con objeto de que sobre esta superficie se desarrolle el velo de flor, que debe ser de 1/6 del espacio total disponible en la bota (Esteve-Zarzoso et al., 2001; García del Barrio Ambrosy, 1984; Suárez Lepe, 2004). Para los vinos destinados a crianza oxidativa las botas se rellenan a "tocado", es decir, por completo no dejando espacio vacío en la parte superior (Domecq, 2011).

Los vinos clasificados en esta primera fase pertenecen a una única cosecha por lo que también se denominan "añadas". El período de sobretablas, en el caso de Fino y Manzanilla puede ser de uno o dos años y en el caso de los olorosos puede llegar a 10 años (Domecq, 2011).

1.4.3.2 **Segunda clasificación**

Tras un período que suele oscilar entre los seis meses y el año, las botas en fase de sobretablas destinadas a crianza biológica volverán a ser analizadas, para llevar a cabo la "segunda clasificación" (Jerez-Xérès-Sherry, 2019):

- Aquellas botas en las que la flor sigue presente con gran vitalidad tras estos primeros meses, protegiendo al vino de la oxidación y transformando sutilmente sus características iniciales, se marcan con las clásicas "palmas", para indicar el grado de finura que va adquiriendo el vino. Son claramente vinos destinados a su crianza bajo velo de flor, en los que se habrá mantenido e incluso aumentado la palidez inicial y que comienzan ya a mostrar las características notas punzantes de la flor (Jerez-Xérès-Sherry, 2019).
- Ocasionalmente, algunas de estas botas en las que la flor sigue presente, se marcan con el clásico "palo cortado", mediante el que el capataz indica que son vinos que, a pesar de su gran finura y aparente vocación para la crianza biológica, van a reconducirse mediante crianza oxidativa. Se trata de vinos muy especiales, clasificados como tales en base a criterios muy específicos de cada bodega y que, tras una fase de sobretablas bajo velo de flor, se van a encabezar por encima de

los 17º para iniciar el que será su envejecimiento definitivo, de carácter oxidativo (Jerez-Xérès-Sherry, 2019).

- En algunos casos, a pesar de haberse calificado el vino en primera instancia para su evolución mediante crianza biológica, tras el período de sobretablas se advierte que el estado de la flor en la superficie del vino no es tan vigoroso como sería deseable. En algunos casos presenta huecos importantes o incluso ha desaparecido casi en su totalidad. Ante el agotamiento del velo, no queda entonces más remedio que rendirse a la auténtica vocación del vino y encabezarlo por encima de los 17º, de modo que la crianza oxidativa de lugar finalmente a vinos olorosos (Jerez-Xérès-Sherry, 2019).
- Por último, es éste también el momento de identificar vinos que, por diversas razones, no presentan las características requeridas para los distintos tipos de vino de Jerez. Bien por una elevada acidez volátil (en cuyo caso servirán para refrescar las criaderas de Vinagre de Jerez) o por cualquier otra causa que haga que los catadores los clasifiquen como "no aptos" (Jerez-Xérès-Sherry, 2019).

Tras esta segunda clasificación los vinos son trasladados a la fase dinámica.

1.4.3.3 **Fase dinámica: "Criaderas y Soleras"**

El sistema de criaderas y soleras está compuesto por varias escalas o estadios, formado cada uno por un número determinado de botas. El más antiguo se sitúa sobre el suelo, razón por el cual se denomina "solera", el cual suministra el vino destinado al consumo. Sobre esta se colocan las distintas escalas que la siguen en menor vejez, que reciben el nombre de "criaderas" y se enumeran según su orden de antigüedad respecto de aquella (1ª criadera, 2ª criadera, 3ª criadera, etc...) (Domecq, 2011). Cada vino posee un sistema de Soleras particular, en el caso de las bodegas de Manzanilla puede haber hasta 14 o 16 criaderas (Hidalgo and Fielden, 2009).

Periódicamente se extrae una determinada proporción del vino contenido en cada una de las botas que componen la solera, produciéndose un vacío parcial en ellas. Esta operación se denomina "saca". El vacío producido en la solera se completa con el conjunto de vino que procede de la escala que le sigue en vejez, o 1ª Criadera, y así sucesivamente hasta que la escala o criadera más joven que se completa con vino procedente del Sistema de "Añadas". La operación de completar el vacío originado en una escala se denomina "rocío". La operación de sacas y rocíos en el soleraje recibe el nombre de "correr escalas" (Domecq, 2011).

Las operaciones descritas se realizan con una técnica cuidadosa y tradicional para conseguir, por una parte, la homogeneización tras el rocío del vino contenido en la bota,

eliminando las oscilaciones que tienen lugar entre las diferentes cosechas, manteniendo una calidad constante a lo largo de los años; y por otro lado, no alterar el velo de flor que cubre la superficie del vino en la crianza biológica ni los finos depósitos que se van acumulando en el fondo de la vasija a lo largo de los años (Domecq, 2011) y que reciben el nombre de "cabezuelas".

La transferencia de los vinos de unas botas a otras se lleva a cabo hoy día con unas moderadas bombas, a las que se llama "pulpos", que disponen de muchas mangueras, cada una de las cuales va a una bota diferente. El vino que se extrae de las diferentes botas de una clase o criadera, es enviado a un tanque donde se mezcla y uniformiza antes de ser bombeado a la siguiente criadera (Hidalgo and Fielden, 2009).

Los intervalos entre operaciones y la proporción de vino extraído están rígidamente determinados en función de las características del vino, ya que son parámetros que condicionan el tiempo de envejecimiento (Domecq, 2011).

El tiempo medio de envejecimiento del Sistema de Soleras que se asigna a un vino es el cociente que resulta de dividir el volumen total del vino, contenido en dicho sistema, por el que representa la saca anual de la solera (Domecq, 2011). De acuerdo con lo establecido en el Reglamento de la Denominación de Origen, la crianza de los vinos debe prolongarse por un período mínimo de tres años, al objeto de que los vinos alcancen las características típicas de cada uno de los tipos.

Las ventajas de esta técnica son:

1. Homogeneización, tanto en crianza biológica como oxidativa.
2. Aportar nuevos nutrientes, imprescindible para la crianza biológica.
3. No altera el velo de flor ni los finos depósitos del fondo.
4. El trasiego facilita la oxigenación periódica del vino, de gran interés en vinos de tipo Oloroso y Amontillado.

1.4.4 CARACTERÍSTICAS DE LA CRIANZA BIOLÓGICA BAJO VELO DE FLOR

La crianza biológica bajo velo de flor, originaria del Área de Jerez, es una práctica muy extendida que se puede localizar en diferentes vinos a lo largo de todo el mundo, siendo los más prestigiosos: Jerez y Montilla-Moriles (España), Vernaccia di Oristano en la isla de Sardinia (Italia), Szamorodni en la región de Tokaj-Hegyalja (Hungría) y Vin jaune en la región de Jura

(Francia) (David-Vaizant and Alexandre, 2018). Además, existen en el mundo un fenómeno creciente de países con producción de vinos de tipo jerez (SLW, por sus siglas en inglés) que utilizan la tecnología de flor y otras técnicas tradicionales de Jerez (Avdanina and Zghun, 2022).

Se denomina crianza biológica a la transformación bioquímica que sufre el vino, previamente encabezada, durante la etapa de envejecimiento, como consecuencia de la intensa y continuada acción metabólica microbiana que forma sobre la superficie del vino una capa o “velo de flor” (Domecq, 2011).

El velo de flor está compuesto por una mezcla heterogénea de microorganismos (levaduras, hongos y bacterias lácticas) (Cordero-Bueso et al., 2018), principalmente levaduras del género *Saccharomyces* (David-Vaizant and Alexandre, 2018; Zara et al., 2010) que forman una capa sobre la superficie del vino (biofilm), el cual puede alcanzar un centímetro de espesor (Marin-Menguiano et al., 2017), que lo protege de la acción oxidativa del aire. De esta manera, la evolución de la crianza del vino no se produce de manera oxidativa, sino por vía biológica. La acción prolongada de esta capa de levaduras de flor se manifiesta en la aparición de diferentes y peculiares características organolépticas (Suárez Lepe, 2004).

Las levaduras pueden formar velo en vinos con entre 10 y 17% vol. de alcohol, siendo el contenido óptimo para su desarrollo de 13,5 a 14,5° (Cruess, 1946; González Gordon, 1970; Marcilla, 1936; Suárez Lepe, 2004). La graduación alcohólica del vino inferior a 13% vol. determina el desarrollo de un velo formado por un grupo de levaduras que se conocen con el nombre de “natas” o “flores de vino” y son evitados por los bodegueros. El crecimiento de estos velos, más rápido y vigoroso, se anticipa a los velos de flor evitando o inhibiendo su participación (Bravo Abad, 1995).

En ciertas cepas de *Saccharomyces cerevisiae* (David-Vaizant and Alexandre, 2018; Zara et al., 2010), cuando el azúcar se agota y el crecimiento depende del acceso al oxígeno, se producen modificaciones de la composición de la pared celular, incrementando su superficie hidrofóbica, reduciendo su densidad y ascendiendo estimuladas por el gradiente de difusión natural del oxígeno a la superficie (Bravo Abad, 1995; Zara et al., 2005). Además, tienen la habilidad de formar diminutas colonias. Este momento se caracteriza por un bajo contenido de azúcar y alto contenido en etanol, que resulta de un metabolismo fermentativo previo y un estrés oxidativo proveniente de un metabolismo respiratorio de carbono no fermentable, desarrollado por las levaduras cuando finaliza la fermentación (Moreno-García et al., 2016).

La formación del velo como mecanismo de adaptación, permite a las levaduras de flor asegurar su acceso al oxígeno permitiéndoles un crecimiento, gracias a su metabolismo

oxidativo, no dependiente de la fermentación alcohólica, permitiendo a las células sobrevivir en condiciones tan estrictas (Alexandre, 2013).

Durante esta fase las levaduras de flor utilizan glicerol, acetato de etilo y etanol como fuente primaria de carbono y producen principalmente acetaldehído, que aporta al vino el olor punzante y característico del Fino, y otros compuestos (Alexandre, 2013; Dos Santos et al., 2000; Marin-Menguiano et al., 2017; Zara et al., 2010). Esta fase consume una gran cantidad de oxígeno, lo que preserva el vino en un estado reducido que le confiere su característico color pálido (Marin-Menguiano et al., 2017; Suárez Lepe, 2004). La reacción entre el acetaldehído y el etanol conduce a la formación de 1,1-dietoxietano o dietilacetal, que contribuye significativamente al aroma de estos vinos con un olor fuerte, dulce y afrutado. Por otro lado, a partir del acetaldehído se forma acetoína, cuya reducción posterior lleva a la formación de 2,3-butanodiol, componentes básicos del “bouquet” de los vinos (Andalucía, 2002).

Las consecuencias de la desaparición del velo, serán por tanto, la paralización de la crianza biológica y la oxidación del vino (JI Lozano and Perdigones, 1989). El oscurecimiento es probablemente la principal fuente de pérdidas económicas para los productores de vinos pálidos tipo Fino, no solo porque los consumidores rechazan la bebida, si es más oscura de lo que esperan, sino también porque altera gradualmente sus propiedades sensoriales típicas e introduce notas de sabor tostado. La presencia de las levaduras de flor reducen la formación de compuestos que oscurecen los vinos (Merida et al., 2007).

Aun cuando el velo de flor permanece en superficie del vino durante todo el año, las épocas de mayor actividad son en primavera y otoño, en los que hay mejores condiciones en el entorno; este resurgir estacional puede aparentar una analogía con el fenómeno de la floración (Domecq, 2011).

1.4.5 CARACTERÍSTICAS DE LA CRIANZA OXIDATIVA

La crianza oxidativa, o también llamada de tipo físico-químico, se produce cuando el vino es sometido a la acción directa del oxígeno del aire, por la inhibición del velo de flor, para lo que previamente debe ser encabezado con un contenido de etanol por encima de 16°.

El envejecimiento oxidativo se desarrolla en barricas de roble americano (Ortega et al., 2008). La madera permite la difusión lenta de oxígeno atmosférico, que en ausencia de velo provoca una oxidación lenta de los compuestos fenólicos del vino, y como resultado, un color oscuro progresivo con tonos de caoba (Fabios et al., 2000).

Las pérdidas de agua por evapotranspiración producen una continua concentración de los compuestos, que se traduce en un aumento de la graduación alcohólica. Para obtener un vino de calidad media debe permanecer entre 4 y 5 años. Para obtener vino de muy alta calidad deben tener una vejez promedio por encima de 12 años, llegando incluso a 20, 30 o más años, en el caso de vinos de vejez calificada “*Vinum Optimum Signatum*” o “*Vinum Optimum Rare Signatum*” (Andalucía, 2022).

1.4.6 LA BOTA DE JEREZ

Las DD.OO. «*Jerez Xérès-Sherry*» y «*Manzanilla-Sanlúcar de Barrameda*» establecen que: “*las existencias totales de vinos sometidos a crianza deberán estar almacenadas en vasijas de madera, debidamente envinadas, cuya capacidad no exceda de 1.000 litros (Andalucía, 2022)*”. Se han probado muchos tipos de madera para fabricar botas, pero la que goza de mayor aceptación es la del roble blanco americano (*Quercus alba* L.) (Domecq, 2011).

En Jerez, la vasija de envejecimiento por antonomasia es la “bota jerezana” (Figura 8) de 36 arrobas (600 litros), con unas dimensiones aproximadas de 136 cm de largo (“talla”) por 102 cm de ancho (“bojo”). Este tipo de bota se conoce comúnmente también como “bota gorda”. Aunque históricamente han existido otras dimensiones como la “bota de exportación”, utilizada antiguamente para el transporte, o la “bota de recibo”, a la que se ajustaban tradicionalmente las operaciones de compra-venta de vino, cabe señalar la llamada “bota bodeguera” de 32 arrobas (566 litros), frecuentemente utilizada en los bajos de los sistemas de solera, por su mayor capacidad y resistencia, o en las faenas internas de la bodega, con una dimensiones de 135 cm de talla y 95 cm de bojo (Jerez-Xérès-Sherry, 2019)(García del Barrio Ambrosy, 1984).



Figura 8. *Detalle de la bota jerezana de crianza.*

La madera de la bota no es estanca, sino que permite cierta permeabilidad al oxígeno y al agua del vino que va transpirando al ambiente de la bodega. Las pérdidas por evaporación anual en los sistemas de “Criaderas y Soleras”, denominadas “mermas”, se estiman entre 3 y 5% (Domecq, 2011). Así, cuanto menor sea el tamaño de la barrica, mayor será la superficie de madera en contacto con el líquido. En este sentido, no siempre es conveniente el uso de barriles pequeños, ya que el efecto de la madera en el producto final podría ser mayor de lo deseable (Pérez-Prieto et al., 2002).

La bota jerezana debe ser siempre de madera vieja, botas muy envinadas, en la que los taninos han sido agotados. Esto se consigue destinando las botas nuevas a la fermentación del vino durante varios años, para posteriormente destinarlas a “sobretablas” durante varios años, para después a “Criaderas” y finalmente a “Soleras” (Domecq, 2011).

1.5 CONDICIONES PARA LA CRIANZA DE LOS VINOS GENEROSOS

A continuación, se describen las condiciones ambientales propuestas por diferentes autores en la bibliografía para el desarrollo óptimo de la crianza de los vinos Generosos.

1.5.1 CONDICIONES DE TEMPERATURA EN LA CRIANZA BIOLÓGICA

La crianza biológica presenta la particularidad de que requiere de presencia abundante de oxígeno para el desarrollo del “velo de flor”, lo que implica una ventilación constante de las bodegas (García del Barrio Ambrosy, 1984). Además, las condiciones ambientales que se requieren para el desarrollo de la flor son muy sensibles y limitantes. Así, Marcilla et al. (1936) señalaron como temperaturas límite de entre 10 a 25 °C, con un óptimo de 15 a 17 °C; Cruess (1946) en los ensayos realizados en laboratorio en California sobre doce cepas de levaduras de flor concluyó, que a la temperatura de 68-70 °F (20 °C) todos los cultivos formaban velo adecuadamente, sin embargo, en general, estas no podían mantener su actividad con temperaturas superiores a 26,6 °C (80 °F); Fernández de Bobadilla (1956) postula, que la temperatura debe conservarse dentro de los límites de entre 15 y 20 °C; García del Barrio Ambrosy (1984) hace unas recomendaciones microclimáticas en el interior de las bodegas, con un valor máximo de 25 °C y mínimo de 12 °C, ya que por encima o por debajo de estas temperaturas se produce la parada de la actividad microbiana; Lozano (1989) realiza un seguimiento en una serie de bodegas del Puerto de Santa María encaminado a establecer las posibles relaciones entre el comportamiento de la flor en las botas y la evolución en las condiciones ambientales, concluyendo, que con una temperatura ambiente de 18-20 °C, dentro de la bodega de crianza, el proceso de crianza será óptimo; Barbadillo A. (1993) recomienda una temperatura entre 16 y 18 °C; sin embargo Bravo Abad (1995) postula que en las bodegas de crianza biológica la temperatura debe ser lo más estable posible, siendo el valor ideal de 15 °C, sin llegar a sobrepasar en ningún caso los 25 °C. Yravedra Soriano (2003) establece que la temperatura en el interior de la bodega debe oscilar entre 18-22 °C. Por su parte, Suarez Lepe (2004) afirma que: las temperaturas más convenientes a la flor son las comprendidas entre 15-18° C. Por encima de 25 °C, y a menos de 13 °C, la levadura paraliza su acción y el velo va desprendiéndose en fragmentos, llegando a desaparecer por completo de la superficie del vino. Dos veces al año el microorganismo asciende para dar crianza al vino por coincidir la temperatura de la bodega con la óptima para el desarrollo de fase de flor, siendo las épocas más activas en los meses de abril a mayo y de septiembre a octubre. Aunque en la zona de Sanlúcar de Barrameda el velo permanece sobre el vino durante todo el año (Hidalgo Togores, 2011).

La Tabla 2 resume las condiciones térmicas propuestas por los diferentes autores de la bibliografía anteriormente mencionados.

Tabla 2

Condiciones térmicas de confort en crianza biológica según diferentes autores.

Autor	Año	Rango de temperaturas límite (°C)	Rango de temperaturas óptimas (°C)
Marcilla, J.	1936	10 – 25	15 – 17
Cruess	1946	¿? – 26,6	¿? – 20
Fernández de Bobedilla, G.	1943	-	15 – 20
García del Barrio Ambrosy I.	1984	12 – 25	-
Lozano J.L.	1989	-	18 – 20
Barbadillo A	1993	-	16 – 18
Bravo Abad, F.	1995	¿? – 25	15
Yravedra Soriano, M.J.	2003	18-22	
Suarez Lepe, J.A.	2004	13 - 25	15 – 18

1.5.2 OTROS FACTORES QUE CONDICIONAN LA FORMACIÓN DEL VELO DE FLOR

A continuación, se indican otros factores ambientales que diferentes autores establecen para la formación del velo de flor sobre la superficie del vino:

- **Concentración de oxígeno disuelto en el vino:** la presencia de oxígeno disuelto en el medio inhibe la formación del velo.
- **Presencia de oxígeno sobre la superficie:** las levaduras no pueden actuar en fase de velo bajo condiciones de anaerobiosis (Suárez Lepe, 2004). Una abundante superficie del vino debe estar expuesta al aire.
- **Concentración de etanol:** debe encontrarse entre 13 y 16 GL (Bravo Abad, 1995).
- **Bajo pH:** Marcilla (1936) indica la escala de 2,7 a 4,1, con un óptimo de 3,2; Bobadilla (1956) por su parte establece la escala entre 2,8 y 4,8. Por debajo del 2,8 la formación del velo se dificulta y por encima de 3,5 hay grave riesgo a la aparición de bacterias dañinas; Cruess (1946) indica entre 2,65 y 3,95.

- **SO₂**: está ampliamente influido por varios factores, fundamentalmente que se encuentre libre o combinado (Suárez Lepe, 2004). Así mientras Marcilla (1936) recomienda un valor máximo de 100 ppm, Bobadilla (1956) lo establece en 180 ppm y Cruess (1946) lo lleva hasta 250 ppm.

Debe tenerse en cuenta que la influencia que un determinado factor tiene en la formación del velo puede verse modificado por los otros factores que intervienen en la composición del medio (Saavedra, 1959).

1.5.3 CONDICIONES DE TEMPERATURA EN LA CRIANZA OXIDATIVA

La crianza de tipo oxidativa envejece por procesos de tipo físico-químicos, como ocurre en la mayoría de los vinos añejos del mundo (García del Barrio Ambrosy, 1984). Sin embargo, la particularidad que presentan los vinos Generosos de crianza oxidativa, con alcoholización por encima de los 17% del vol. que imposibilita la aparición de cualquier tipo de crecimiento biológico, hace la comparación con procesos de crianza de vinos comunes difícilmente encajable. No se ha encontrado ninguna referencia bibliográfica que indique las condiciones térmicas más adecuadas para la crianza oxidativa de vinos Generosos. Además, si se tiene en cuenta la ubicación normal de estas botas en las zonas en las que no es posible la crianza biológica y, en muchos casos, incluso fuera de las zonas de crianza de las bodegas (Figura 9), hace pensar que este factor no es muy significativo en su proceso.



Figura 9. Crianza oxidativa en el exterior de la bodega.

Aunque la crianza oxidativa de los vinos Generosos parece ser mucho menos exigente, en lo que respecta a la temperatura, que la llevada a cabo en vinos tintos no fortificados, existe abundante documentación sobre las condiciones ambientales más adecuadas para la crianza de los vinos tintos (no fortificados). Así por ejemplo, la Sociedad Enológica del Penedés (1952) recomienda una temperatura constante entre 8 y 14 °C; Troost (1985) de 12 a 15 °C; De Rosa (1988) entre 15 y 18 °C; Ough (1996) entre 10 y 15 °C. Según Pérez y Gervás (1997) la sala de crianza debe ser un local húmedo con temperaturas estables de 10–12 °C en invierno y 16–18 °C en verano; Christaki y Tzia (2002) temperaturas inferiores a 12 °C. Hidalgo Togores (2011) recomienda temperaturas constantes de 12 a 15 °C. Zamora (2003) recomienda entre 10 y 18 °C.

Sobre los valores límite y los efectos perjudiciales que ocasionan, valores de temperatura superiores a 18-20 °C no son adecuados para la crianza de vino (Carlos Pérez, 1997; Christaki and Tzia, 2002; Ough, 1996; Rosa, 1988; Yravedra Soriano, 2003). A altas temperaturas los vinos envejecen más deprisa, pudiéndose producir algunos cambios adversos del sabor y el aroma que no se dan fácilmente a temperaturas más bajas (Ough, 1996). La temperatura elevada conduce siempre a la evolución del color hacia el naranja, una temperatura baja no

plantea problemas, permitiendo precipitar la materia colorante y haciendo más lenta las diferentes reacciones (Ribéreau-Gayon, 2002).

También resulta muy perjudicial el cambio frecuente de temperatura (Troost, 1985). El vino ha de mantener además la temperatura con pocas variaciones dentro de cada estación, pero con una lenta y gradual diferencia entre el verano y el invierno (Carlos Pérez, 1997). Hidalgo Togores (2011) afirma que la temperatura debe ser constante, para evitar las dilataciones y contracciones de la madera, que conllevan mayores pérdidas de vino e incluso también fugas entre sus juntas.

1.5.4 CONDICIONES DE HUMEDAD

Aunque algunos autores afirman de manera no empírica, fruto quizás de la tradición o de su experiencia profesional, que la baja humedad influye negativamente sobre el desarrollo del vino (Troost, 1985), la realidad es que la mayoría de referencias bibliográficas al respecto la relacionan con las pérdidas de vino por procesos de evapotranspiración, produciendo en muchos casos un impacto económico considerable (Ruiz De Adana et al., 2005). Así, varios autores de renombre indican que la humedad ambiental de la bodega de crianza biológica debe ser lo más alta posible y constante (Barquín, 2009; Bravo Abad, 1995; García del Barrio Ambrosy, 1984), sin especificar rango alguno. Por su parte Ambrosy (1979) postula que la humedad relativa del aire siempre debe conservarse por encima del 50%.

Otros autores no relacionados con el vino de Jerez, como Négre-Francot (1980), relaciona las pérdidas de vino tinto durante el envejecimiento con las condiciones de temperatura y humedad relativa en la bodega, alcanzándose las mayores pérdidas cuanto mayor es la temperatura y menor la humedad relativa del aire. Hidalgo Togores (2011) comenta que las mayores pérdidas de vino se producen debido a las condiciones ambientales de la crianza, siendo la humedad relativa el factor más importante, así como también la temperatura, pero en menor cuantía. Cuando la humedad relativa es baja, las pérdidas de vino pueden ser considerables, llegando en ocasiones a valores superiores al 10%. Los valores de humedad relativa superiores al 80% reducen considerablemente las mermas de vino hasta un 2 a 3% anual, aunque también plantea valores de humedad relativa entre 70% y 80% para evitar la aparición de mohos. La Sociedad Enológica del Penedés (1952) recomienda una graduación higrométrica entre 45 y 80%; Cortés (1968) recomienda una humedad ambiente media entre 65% y 80%.

1.6 LAS BODEGAS CATEDRAL

1.6.1 CATALOGACIÓN DE LAS BODEGAS CATEDRAL

García del Barrio Ambrosy, I. (1979), propuso una clasificación de las bodegas destinadas a la crianza del vino de Jerez desde un punto de vista histórico. A partir de este trabajo, eliminando las bodegas en desuso, las de presencia testimonial y aquellas que por sus características no se adecuan al modelo de bodega Catedral, nos interesan dos modelos ampliamente extendidos en el Marco de Jerez y que resumen la clasificación actual de bodegas destinadas a la crianza biológica:

- a. Las bodegas Catedral tradicionales.
- b. Las modernas bodegas de tipo Catedral.

Las primeras se refieren al modelo de bodega tradicional (Figura 10), desarrollada a partir de la segunda mitad del siglo XIX, de las que se conservan en la actualidad numerosos ejemplos a lo largo de todo el Marco de Jerez y que comparten una serie de elementos constructivos comunes que condicionan las características ambientales que en ellas se desarrollan.

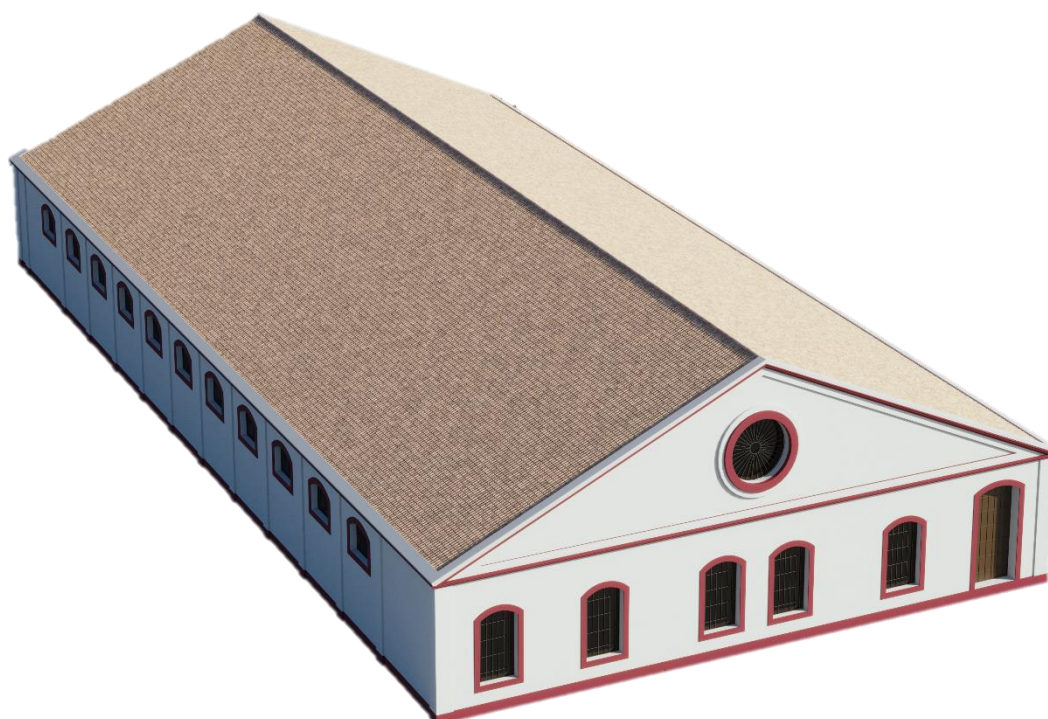


Figura 10. Representación artística en 3D de una bodega Catedral tradicional para la crianza de vino de Jerez.

Por otro lado, a partir de la segunda mitad del siglo XX se produce un nuevo desarrollo de la industria del vino de Jerez que favorece el nacimiento de nuevas bodegas, algunas de ellas construidas a semejanza de las Bodegas Catedral tradicionales, pero con materiales constructivos modernos y diversos que en definitiva tienen por objeto lograr el mantenimiento pasivo de las condiciones ambientales obtenidas por los modelos tradicionales.

1.6.2 BODEGAS TRADICIONALES: CARACTERÍSTICAS CONSTRUCTIVAS

En este capítulo se analizan las características constructivas que presentan las bodegas Catedral tradicionales, señaladas por diversos autores como ejemplos de edificios sostenibles con consumo de energía casi nulo (NZEB, por sus siglas en inglés), ya que favorecen de forma pasiva las condiciones necesarias para el desarrollo de los vinos Generosos de crianza biológica, con el objeto último de establecer la relación entre estas características constructivas y las condiciones ambientales que en ellas se producen.

1.6.2.1 Ubicación

Tradicionalmente se ha observado que existen zonas en el Marco de Jerez donde se cría mejor el vino que en otras. Diferentes autores asocian este fenómeno a la exposición que muestran algunas zonas a los vientos predominantes húmedos de “poniente” frente a otros entornos cerrados o con obstáculos. De esta manera se asumen que suelen existir, especialmente en las ciudades costeras, entornos prominentes abiertos a las brisas marinas por el efecto conocido en Cádiz como “vagio de la mar” que refuerza el efecto de los vientos de poniente (García del Barrio Ambrosy, 1979). De manera opuesta, los vientos de “levante” son perjudiciales por resultar demasiado secos y fuertes (Yravedra Soriano, 2003).

Por tanto, la importancia del viento húmedo de poniente se considera decisiva en la crianza del vino de Jerez y que el lugar esté abierto a su influencia o no lo esté, implica una diferencia radical. De esta manera, las zonas bajas, encalmados y resguardados de la influencia de las brisas marinas o del viento de poniente suelen ser sitios de bodegas de mediocre calidad, o más lenta crianza (García del Barrio Ambrosy, 1979).

1.6.2.2 Orientación

La mayoría de las bodegas no están orientadas adecuadamente por causas urbanas, pero muchas de las bodegas antiguas, que tienen fama de criar el vino de una manera sobresaliente, tiene una estudiada orientación. Así, se asume que la orientación del edificio puede influir

poderosamente en la regulación de la temperatura y la humedad (García del Barrio Ambrosy, 1979).

De esta manera, García del Barrio Ambrosy (1984) propone que la orientación más conveniente es cruzada, en sentido noreste-suroeste, reduciendo así la superficie de fachada expuesta al sol durante los meses de máxima insolación y protegiendo la fachada oeste, que deberá tener la mayor superficie posible, que es la importante a efectos de humedad debido a los vientos húmedos predominantes de poniente. En este sentido, muchas bodegas presentan el muro de solana de mayor espesor y con menor ventilación.

1.6.2.3 Dimensiones de la nave

La altura de las bodegas es sin duda la característica constructiva más sobresaliente y la más definidora de la calidad de una bodega de crianza de vinos, porque es la que tiene más trascendencia en conseguir una condición biológica fundamental para las levaduras. Este fenómeno se puede explicar por dos razones: biológica y climática (García del Barrio Ambrosy, 1979).

La crianza biológica bajo velo de flor es de tipo aeróbico, por lo que las levaduras requieren de una gran cantidad de oxígeno para trabajar. Por esta razón se construyen las bodegas otorgando grandes volúmenes para facilitar el intercambio gaseoso de los procesos biológicos. La relación de volumen de aire disponible por volumen de vino es muy elevada, comparada con las instalaciones destinadas a otros tipos de crianzas, pudiendo llegar, en algunos casos, a relaciones de 18:1 (García del Barrio Ambrosy, 1979).

En cuanto a la razón climática, a mayor volumen de aire interior mayor será la inercia térmica, o resistencia al calentamiento del volumen encerrado. Por otro lado, la mayor altura de la bodega confiere un mayor gradiente térmico por el fenómeno natural de la estratificación (García del Barrio Ambrosy, 1979). La gran altura también permite la ventilación inducida por diferencia de temperatura cuando no sopla el viento de poniente (Yravedra Soriano, 2003).

El cálculo favorable medio de volumen de aire en el interior de la bodega de crianza es de 8,8-9,8 m³ por cada bota. Sabiendo que una bota jerezana contiene 500 litros de vino, son necesarios 0,018-0,020 m³ de aire por litro de vino, para que puedan cumplirse las condiciones higrotérmicas necesarias para la crianza del vino de Jerez (Yravedra Soriano, 2003).

Es obvio que el mismo volumen de oxígeno disponible para la actividad aeróbica de la flor podría conseguirse aumentando la superficie y reduciendo la altura del edificio, pero entonces no se obtendrían los resultados deseados en cuanto a temperatura y humedad. Los grandes volúmenes de aire en altura permiten que en la zona pegada al suelo, donde se encuentran las

botas, la temperatura en verano sea más baja que en el exterior, y que el calor ascienda hacia las capas de aire más altas dentro del mismo edificio, de modo similar a lo que sucede en los grandes templos europeos (García del Barrio Ambrosy, 1979).

1.6.2.4 Disposición del vino

La dimensión modular espacial básica de las naves que componen las bodegas la termina conformando la sección de dos andanas y su correspondiente calle central. El ancho de cada una de estas andanas es aproximadamente de 1,35 m, que es la máxima dimensión de la bota de roble mayoritariamente utilizada en Jerez. Por tanto, el módulo base de sección de las naves en las bodegas oscila aproximadamente entre 4,50 m y 5,50 m, dependiendo del ancho de los pasillos, dimensión que finalmente se traslada a los replanteos de muros de carga para un aprovechamiento óptimo del espacio (Miró-Miró et al., 2021).

Los pasillos centrales entre andanadas tiene una anchura de "dos ruedos" de "ruedo y bretona" o de "bretona" (García del Barrio Ambrosy, 1984):

- La anchura de "dos ruedos" es la que permite, teniendo una bota colocada paralela a las de solera, rodar otra por el espacio que queda, lo cual supone una anchura de calle de más de 2,7 m.
- La anchura de "rueda y bretona" es la que permite colocar una bota de vino a la espera con su eje perpendicular al de las botas de solera y rodar otra bota por el espacio que resta, para lo cual hace falta una calle de 2,5 m.
- La anchura de "a la bretona" consiste en que la anchura de calles permite colocar una bota a la bretona, o sea, con su eje perpendicular al de las botas de solera y dejar espacio para pasar un hombre. La calle tendrá 1,45 m.

1.6.3 ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS

1.6.3.1 Cubierta

La cubierta es un elemento constructivo fundamental en el diseño de una bodega de crianza. La incidencia de la radiación solar sobre la cubierta debe ser la mínima posible. La cubierta a dos aguas produce alternativamente el auto-sombreado. El soleamiento se minimiza con la micro sombra de las tejas sobre los canales, y las sutiles corrientes de ventilación que se crean entre ellas (Yravedra Soriano, 2003).

Tradicionalmente se construían de teja árabe de arcilla sobre asiento de argamasa de “cal de Morón” y arena de “miga”, que a su vez descansa sobre ladrillo tosco calcáreo “por tabla” o tabla de madera, apoyadas en vigas de pino de Flandes, o de pino de “rija”, e incluso de roble (Figura 11) (García del Barrio Ambrosy, 1979).



Figura 11. *Detalle de cubierta, exterior con teja (izquierda) e interior sobre ladrillo por “tabla” (derecha).*

1.6.3.2 Paramentos

Los muros exteriores están formados generalmente por fábrica de mampostería de piedra arenisca o de ladrillo tosco, utilizándose como conglomerante mortero de cal y arena. En otras ocasiones, menos habituales, se ha utilizado la sillería vista de piedra. Suelen tener muros de espesor igual o superior a 60 cm, con lo que la masa del muro, de gran inercia térmica, suple la ausencia de aislamiento térmico específico (Yravedra Soriano, 2003).

La piedra arenisca es bastante higroscópica, por lo cual absorbe agua del cemento y la “sube” por el interior de los muros. Podemos decir que estos muros son húmedos y por ello muy fríos, siendo este otro factor que favorece las condiciones en las bodegas del Marco (García del Barrio Ambrosy, 1979).

Finalmente, se aplica blanqueamiento a los paramentos exteriores, antiguamente mediante la aplicación de encalado y en la actualidad sustituido por la aplicación de pinturas modernas, basado en su efecto reflectante de la radiación solar.

Es común en este tipo de bodegas tradicionales observar la presencia de porches exteriores en su fachada oeste con objeto de proteger los paramentos de la insolación. Además, tiene unos amplios emparrados en los patios entre bodegas que reducen la insolación, lo que contribuye a mantener una temperatura muy rebajada (García del Barrio Ambrosy, 1979).

1.6.3.3 **Pavimentos**

Tradicionalmente los suelos son terrizos de “albero”, de tipo calcarenita procedente de Alcalá de Guadaíra, que presenta una buena compactación y características higroscópicas. El albero se riega regularmente en los meses de verano con objeto de mantener la humedad relativa alta y favorece la reducción de la temperatura del aire en el interior de la bodega (Yravedra Soriano, 2003). En la actualidad, muchas bodegas han incluido pavimentos de hormigón, de manera parcial, para favorecer las labores ordinarias de mantenimiento. (García del Barrio Ambrosy, 1979).

1.6.3.4 **Distribución y disposición de aperturas de ventilación**

Las ventanas están generalmente situadas en el tercio superior de los cerramientos verticales (Figura 12), por encima del nivel de las botas apiladas, garantizando la ventilación y, por otro lado, mantener las botas en una posición inferior que favorezca el gradiente térmico y sostenga la humedad por mayor densidad del aire frío y húmedo. Son de pequeño tamaño, de forma rectangular o cuadrada, siguiendo ritmos reiterados y simétricos (Yravedra Soriano, 2003). Suelen ser apaisadas para que, en verano, que es cuando el sol está más alto sobre el horizonte, no entre dentro de la bodega. Están diseñadas con objeto de reducir la entrada del calor, favorecer la entrada de humedad y mantener un buen nivel de ventilación. En las ocasiones en las que se observan ventanas verticales suelen ser decorativas y estar cegadas (García del Barrio Ambrosy, 1979).

En el interior de los frontones y tímpanos de las fachadas a dos aguas los huecos se sustituyen a veces por ventanucos circulares y óculos (Figura 13). El calor tiende a ascender y acumularse en la parte superior de la bodega, por ello, mediante estas aperturas, se crea una corriente dinámica horizontal que desplaza al exterior el aire cálido acumulado (Yravedra Soriano, 2003).

La fuerte luz es tamizada por esteras de mimbre o esparto colocadas en los huecos (Figura 13), permitiendo la entrada de la brisa marina de poniente, y haciendo posible que transpire el edificio, manteniendo en su interior el microclima constante necesario. Además, estas esteras filtran el aire impidiendo la entrada de polvo e insectos indeseables en la bodega (Yravedra Soriano, 2003). No se instalan ventanas de cristal que pudieran tener un efecto invernadero con los rayos de sol.



Figura 12. Detalle de ubicación y forma de las ventanas.



Figura 13. Detalle óculos de ventilación (izquierda) y persianas de esparto (derecha)

La fachada sur, en muchos, casos no dispone de ventanas y cuando existen deben permanecer cerradas en verano o disponer de doble puerta (García del Barrio Ambrosy, 1979).

1.6.4 AMBIENTE INTERIOR DE LAS BODEGAS

Los valores higrotérmicos en el interior de la bodega de crianza del vino de Jerez, que constituyen un auténtico microclima, se consiguen “naturalmente”, sin climatización mecánica, únicamente por medio de las actuaciones proyectuales arquitectónicas, que protegen de los agentes perjudiciales externos, y que transfieren al interior las condiciones climáticas beneficiosas para el desarrollo de la levadura de flor. El diseño afecta pues a la orientación, a

la forma y a la utilización de los materiales constructivos con un comportamiento adecuado ante las condiciones ambientales exteriores (Yravedra Soriano, 2003)

Tal y como se indicó en el apartado 1.4.4 (CARACTERÍSTICAS DE LA CRIANZA BIOLÓGICA BAJO VELO DE FLOR), la flor es un complejo sistema biológico excepcionalmente sensible que se desarrolla en unas condiciones ecológicas muy limitadas. Partiendo de las condiciones climáticas del Marco de Jerez, el fin último del diseño de las bodegas es simular las condiciones ambientales ideales para el desarrollo de las levaduras de flor. Con este objetivo, se pretende influir en tres factores: oxígeno, temperatura y humedad relativa.

La flora que compone el velo presenta un metabolismo eminentemente aerobio, por lo que precisa de abundante presencia de oxígeno para correcto desarrollo. Según aseguran diferentes autores (Aladro-Prieto, 2012; Barquín, 2009; García del Barrio Ambrosy, 1979; Yravedra Soriano, 2003) este factor parece ser fundamental y por tanto condiciona en parte las dimensiones de la bodega, la relación volumen de vino y aire, la necesidad de ventilación constante de la zona de crianza, la orientación y ubicación de la bodega, e incluso las dimensiones particulares de la propia bota de crianza.

Tal y como se describió en el punto 1.5.1 (CONDICIONES DE TEMPERATURA EN LA CRIANZA BIOLÓGICA), los microorganismos presentes en el velo de flor requieren de unas condiciones muy limitantes en cuanto a temperatura. Aunque en este punto no hay un consenso claro entre los diferentes autores, queda patente que el rango en el cual se puede desarrollar adecuadamente el velo de flor es muy estrecho, seguramente en un rango de temperatura aproximada entre 10 y 26 °C.

Según se desarrolla en el punto 1.5.4 (CONDICIONES DE HUMEDAD), aunque puede tener un efecto significativo en la capacidad de amortiguar la temperatura, no se ha encontrado ninguna referencia al respecto en la bibliografía consultada. Sin embargo, los diferentes autores sugieren que la humedad relativa en el interior de la bodega tiene una influencia decisiva en las pérdidas de producto por evapotranspiración de las botas (Barquín, 2009; Bravo Abad, 1995; García del Barrio Ambrosy, 1979), recomendando niveles por encima del 50-60% para mantener las mermas controladas, sin un límite superior. En este sentido, la práctica de utilización de difusores o riego del albero parece estar muy extendido.

A pesar de la importancia de las condiciones higrotérmicas en el desarrollo del velo de flor, tan sólo existen dos precedentes del siglo pasado donde se monitorizan condiciones ambientales en bodegas de Jerez. En este sentido, García del Barrio Ambrosy (1984) y Lozano J.L. (1989) realizaron un seguimiento en una serie de bodegas encaminados a establecer las posibles relaciones entre el comportamiento de la flor en las botas y la evolución en las

condiciones ambientales. Estos estudios supusieron una primera aproximación al análisis de las condiciones higrotérmicas en las bodegas, aunque de manera muy limitada, focaliza en el desempeño del edificio y su capacidad para regular la temperatura y aportando escasa información sobre las condiciones de confort de la crianza.

1.7 EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO

Casi el 50% del consumo final de energía de la Unión Europea (UE) se destina a calefacción y refrigeración, y el 80% de ese porcentaje se utiliza en los edificios. En este sentido, la UE se ha propuesto conseguir un parque de edificios de alta eficiencia energética y garantizar que las estrategias de renovación a largo plazo ofrezcan los avances necesarios hacia la transformación de los edificios existentes en NZEB (EU, 2010; EU, 2018).

La búsqueda de estrategias constructivas que permitan reducir las necesidades de climatización, manteniendo niveles adecuados de confort, es uno de los mayores retos de la construcción moderna con gran potencial de desarrollo en las próximas décadas. En este sentido, las "bodegas Catedral" son hoy en día un buen ejemplo de NZEB, ya que proporcionan el confort térmico necesario para la crianza biológica sin necesidad de sistemas de climatización. Sin embargo, la eficiencia de estos edificios podría verse comprometida en las próximas décadas por efecto del cambio climático.

Según el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), el aumento global de la temperatura entre la media del periodo 1850-1900 y el periodo 2003-2012 fue de 0,78 °C (Stocker, 2013), más de 1 °C por encima para 2017, y aumentando a razón de 0,2 °C por década. Es probable que en los próximos 20 años la temperatura de calentamiento global sea 1,5 °C superior a los niveles preindustriales (Allen, 2018). Pero este impacto podría ser especialmente grave en países del sur de Europa como España (Giorgi and Lionello, 2008). Según la Agencia Española de Meteorológica (AEMET, 2021), para el año 2020 el aumento de la temperatura media en España era de 1,7 °C más que en el periodo preindustrial, y este valor aumenta a un ritmo de 0,3 °C por década y acelerándose.

Dado que el rendimiento de los edificios está estrechamente relacionado con las condiciones meteorológicas (Zou et al., 2021), existe el reto de diseñar edificios más sostenibles y de bajo consumo energético, que permitan adaptarse a los veranos más cálidos que están por venir por efecto del cambio climático (Holmes and Hacker, 2007).

1.8 JUSTIFICACIÓN

Durante la redacción de esta tesis se ha realizado un profundo estudio bibliográfico sobre el vino de Jerez y en particular sobre la crianza biológica bajo velo de flor. En este sentido, son numerosos los estudios científicos realizados en los últimos años a lo largo de todo el mundo, lo que da una idea del interés que la comunidad científica dedica a este proceso. No obstante, la mayoría de los trabajos de investigación publicados hasta la fecha se focalizan en aspectos como las propiedades físico-químicas de estos vinos (Dos Santos et al., 2000; Marcq and Schieberle, 2021; Schwarz et al., 2021; Valcárcel-Muñoz et al., 2022; Villamiel et al., 2008), estudios de la actividad de los compuestos aromáticos durante la crianza (Moyano et al., 2010; Zea et al., 2008; Zea et al., 2010), estudios de la caracterización genética de las poblaciones de levaduras formadoras de velo de flor (Carbonero-Pacheco et al., 2022; David-Vaizant and Alexandre, 2018; Eldarov et al., 2018; Esteve-Zarzoso et al., 2001; Kishkovskaia et al., 2021; Marin-Menguiano et al., 2017; Naumov, 2017), estudios de los mecanismos de adaptación que permiten a las cepas de levaduras formadoras del velo de flor sobrevivir en el vino una vez finalizada la fermentación (Alexandre, 2013; Zara et al., 2005; Zara et al., 2010) (Moreno-Garcia et al., 2013), aspectos económicos (Foronda-Robles, 2018) o comerciales (Cruces-Montes et al., 2020; Rodríguez-García and Vieira-Rodríguez, 2017). Por el contrario, son escasos los estudios que analizan el ambiente interior de las construcciones que permiten estos procesos (Porrás-Amores et al., 2014).

A pesar de que el velo requiere para su desarrollo unas condiciones ambientales muy sensibles y limitantes, hecho que ponen de relevancia numerosos autores, las referencias a las condiciones ambientales en las que se debe realizar son escasas, en su mayoría exclusivamente de temperatura, de carácter anual y sin base experimental. Tan sólo hay tres precedentes donde se monitorizan condiciones ambientales en bodegas de Jerez (García del Barrio Ambrosy, 1984; JI Lozano and Perdígones, 1989; Porrás-Amores et al., 2014), focalizados en el desempeño del edificio y que aportan limitada información sobre las condiciones de la crianza. No existen intervalos de confort mensuales que puedan ser tomados como referencia para controlar el ambiente interior y asegurar un adecuado desarrollo del velo de flor.

Existe por tanto un vacío de conocimiento científico relativo a las condiciones higrotérmicas para la crianza del vino Generoso y la efectividad de las bodegas, que no ocurre en el caso del vino tinto, donde existen numerosos trabajos científicos al respecto (Barbaresi et al., 2015a; 2014; 2015b; Benni et al., 2013; Cañas et al., 2012; 2009; Mazarrón and Canas, 2008; 2009; 2010; Mazarrón et al., 2012a; 2012b; 2013; 2015; Porrás-Amores et al., 2019; Santolini et al., 2019; Torreggiani et al., 2018). La literatura sobre vinificación destaca la importancia de una

temperatura baja constante y una humedad relativa alta dentro de los edificios donde se almacena el vino, con objeto de lograr un producto final de alta calidad y reducir las pérdidas de vino (Martin and Canas, 2006). Por ello, el diseño de la bodega debe tener como principal objetivo proporcionar unas condiciones adecuadas de temperatura y humedad relativa.

Como se ha puesto de relevancia en la introducción, numerosos autores interpretan la concepción tradicional de construcción de las bodegas Catedral como paradigma de NZEB ya que permiten de forma pasiva el mantenimiento de unas condiciones ecológicas en el interior de estas bodegas que permiten la compleja crianza biológica bajo velo de flor y como sus características constructivas, especialmente seleccionadas, contribuyen a ello. Sin embargo, no existen estudios científicos que caractericen la efectividad de las construcciones y el ambiente interior resultante que justifiquen las conclusiones aseveradas por estos autores. Por lo que estas, se entiende fruto de su experiencia personal y la observación subjetiva de estas características. Es necesario desarrollar un modelo de simulación energética, validado con datos experimentales, que permita caracterizar el comportamiento de las bodegas Catedral y el ambiente higrotérmico interior.

Además, ante las previsiones pesimistas que distintas organizaciones internacionales como el IPCC están pronosticando de los efectos del cambio climático, y teniendo en cuenta las exigencias de la crianza biológica, existe un interés creciente en analizar, bajo bases científicas, los efectos que estos cambios tendrán sobre este proceso. Cuantificar el impacto del cambio climático permitiría desarrollar planes de adaptación y resiliencia para las próximas décadas.

2 OBJETIVOS

El objetivo principal de esta tesis es la caracterización de las condiciones higrotérmicas en las que se lleva a cabo la crianza biológica de los vinos Generosos, desvelando el comportamiento de las bodegas Catedral.

En este sentido, se han planteado los siguientes objetivos específicos:

1. Seleccionar y caracterizar una serie de bodegas representativas, en las cuales se produzcan vinos de Jerez de crianza biológica de calidad contrastada.
2. Diseñar e implantar un sistema de monitorización permanente de temperatura y humedad, tanto en el interior, especialmente de la zona de crianza (espacio ocupado por las bodegas), como de las condiciones climáticas exteriores particulares de cada bodega.
3. Caracterizar el ambiente higrotérmico interior de las bodegas monitorizadas, a partir del análisis estadístico de los datos obtenidos
4. Comprobar si las condiciones higrotérmicas reales cumplen las condiciones de confort higrotérmico citadas por los autores en la bibliografía, proponiendo intervalos mensuales de referencia para el control de la crianza biológica de vinos de Jerez basados en los resultados obtenidos.
5. Desarrollar y validar un modelo de simulación energética para bodegas Catedral y evaluar el impacto del cambio climático.
6. Modificar las condiciones climáticas exteriores del modelo de simulación desarrollado, para un escenario de cambio climático, y evaluar el impacto que este tendrá sobre el desempeño de las bodegas Catedral.

3 MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 SELECCIÓN DE LAS BODEGAS

3.1.1 MARCO GEOGRÁFICO

Dentro de la Área de producción delimitada por las DD.OO. «*Jerez-Xérès-Sherry*» y «*Manzanilla-Sanlúcar de Barrameda*» se han seleccionado únicamente bodegas ubicadas en la localidad de Sanlúcar de Barrameda, por ser la única que ampara la Denominación de Origen para la crianza del vino de tipo Manzanilla. Esta elección se justifica, como se ha puesto de manifiesto anteriormente, en que la Manzanilla requiere para su crianza que la capa que forma el velo de flor sobre el vino sea más grueso y estable a lo largo del año, a diferencia del resto de los vinos de tipo Fino. Por lo que se ha supuesto que en esta localidad las condiciones ambientales son más beneficiosas para la crianza biológica que en el resto de del Marco de Jerez, por lo que, desde un punto de vista técnico, puede ser especialmente interesante el análisis de las bodegas que la producen.

La localidad costera de Sanlúcar de Barrameda, ubicada en la zona noroeste de la provincia de Cádiz, se encuentra en la desembocadura del río Guadalquivir con el océano Atlántico. Esta ubicación le confiere unas condiciones microclimáticas excepcionales respecto del resto del Marco de Jerez. Presenta un clima mediterráneo-oceánico con temperaturas moderadas durante todo el año.

3.1.2 LAS BODEGAS SELECCIONADAS

Una vez seleccionada el área de trabajo se contactó con todos los propietarios de empresas bodegueras de la localidad. De entre todos los candidatos que se ofrecieron a colaborar en la investigación, se seleccionaron aquellas en las que se producían vinos de crianza biológica de calidad contrastada. En todos los casos sus vinos alcanzan puntuaciones entre 92 y 94 según Parker, y entre 92 y 95 según Peñín.

Además, se trató también de hacer una selección desde un punto de visto constructivo, es decir, seleccionar bodegas con diferentes características constructivas y de diferentes periodos (Figura 14). Del total de candidatos disponibles se seleccionaron seis bodegas, dos tradicionales, que representan los valores tradicionales de la cultura bodeguera de Jerez, y cuatro bodegas modernas, construidas en el último tercio del siglo XX, algunas de ellas proyectadas en base a los modelos tradicionales, pero con materiales modernos y otras con una concepción completamente nueva, pero con incorporación de elementos constructivos especialmente diseñados con objeto de mejorar el desempeño de las bodegas.

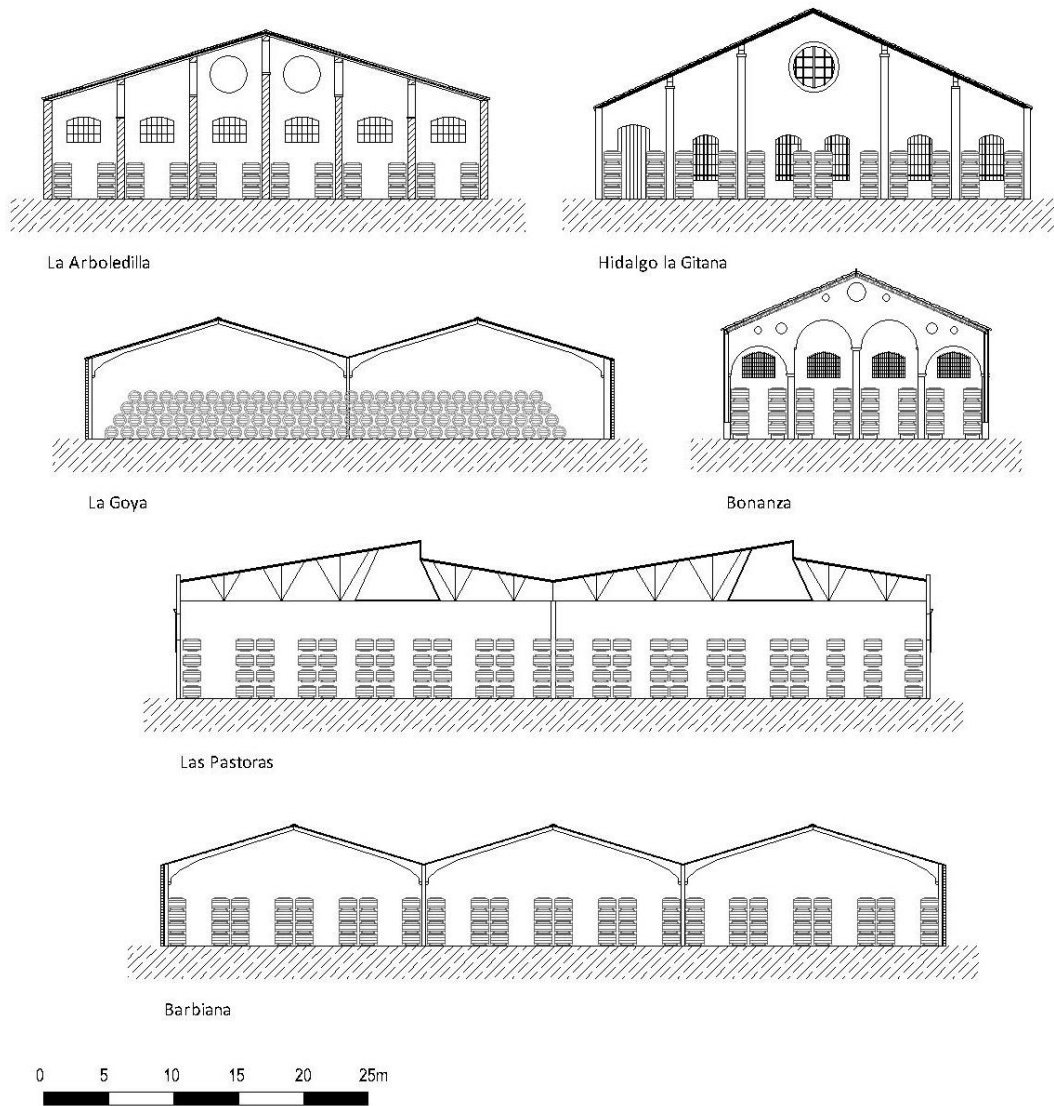


Figura 14. *Sección interior de las bodegas seleccionadas.*



Figura 15. Ubicación de las bodegas seleccionadas.

Debido a su extensión, en el anexo I (DESCRIPCIÓN DE LAS BODEGAS ANALIZADAS) se caracteriza detalladamente cada una de las bodegas, su ubicación, sus dimensiones y sus características constructivas. Además, se incluyen esquemas de su planta, su interior, sus fachadas exteriores e imágenes de los elementos más característicos de cada una.

3.2 DISEÑO DEL SISTEMA DE MONITORIZACIÓN

Uno de los objetivos de esta tesis es caracterizar el comportamiento higrotérmico de una serie de bodegas Catedral donde se produce la crianza biológica de vino de Jerez de calidad contrastada. Para lograrlo se diseñó un sistema de monitorización con un triple enfoque:

- Caracterización del ambiente interior en el conjunto de la bodega: monitorizar la temperatura y la humedad del interior de la bodega a lo largo del todo el año, estableciendo diferentes ubicaciones que permitan el análisis de una serie de factores como la uniformidad horizontal y la estratificación. El objetivo principal es desvelar el funcionamiento de estas construcciones singulares y las diferencias que se producen en el interior de las mismas.
- Caracterización del ambiente en la zona de crianza: Monitorizar las condiciones particulares de temperatura y humedad de la zona de crianza (espacio ocupado por las botas) en comparación con el resto de la bodega. El objetivo es determinar el ambiente real que condiciona el desarrollo del velo de flor.
- Caracterización del ambiente exterior: monitorizar la temperatura y humedad exterior con objeto de conocer la capacidad de amortiguamiento del edificio frente a las condiciones climáticas exteriores.

3.2.1 INSTRUMENTAL UTILIZADO PARA LA MONITORIZACIÓN

La monitorización se llevó a cabo mediante la instalación de 63 registradores de dos modelos diferentes, con un total de 148 sensores de temperatura y 36 de humedad relativa:

- Se utilizaron 36 registradores de la marca Hobo, modelo Hobo Pro v2 de segunda generación con sensores internos de temperatura de tipo termisto y de humedad relativa del tipo capacitivo. Presenta una capacidad de almacenamiento de 43.526 medidas, la mitad en temperatura y la otra mitad en humedad relativa. Se caracterizan por su fácil manejo y la posibilidad de ser utilizados en condiciones exteriores.
- Se utilizaron 28 registradores de 4 canales de la marca Hobo. El Hobo de 4 canales es un registrador al que se acoplan sondas de temperatura, con una capacidad de almacenamiento de 43.000 medidas.

En la Tabla 3 se detallan las características técnicas del instrumental utilizado, en la Figura 16 se incluyen imágenes de cada uno de los elementos utilizados y en la Figura 17 se incluye un ejemplo de su instalación en la zona de crianza.

Tabla 3*Características de los registradores y sensores utilizados*

Equipo	Magnitud medida	Rango	Precisión del equipo	Resolución
HOBO® Pro v2	%HR	0% a 100%	± 2.5% de 10 a 90%	0.03% HR
	T ^a	-40° a 70°C	±0.18°C a 25°C	0.02°C a 25°C
HOBO® 4-Channel con sondas	T ^a	-20°C a 70°C	±0.25° a 20°C	0.03° a 20°C

**Figura 16.** *Detalle de los diferentes registradores utilizados***Figura 17.** *Detalle de ubicación de los registradores en la zona de crianza.*

A los diferentes registradores se les asignó un código de control, “U23” para los modelos Hobo Pro v2 y “U12” para los Hobo de 4 canales. Como norma general, los registradores Hobo Pro v2 fueron dispuestos a la misma altura en diferentes ubicaciones de las naves de crianza con objeto de poder analizar la uniformidad horizontal, tanto de la temperatura como de la humedad relativa. Por el contrario, las sondas de temperatura de los Hobo de 4 canales fueron

utilizadas para monitorizar la uniformidad vertical, es decir, la estratificación de temperatura con la altura.

3.2.2 PLAN DE MONITORIZACIÓN DE LAS BODEGAS

Se diseñaron diferentes estrategias de monitorización para cada bodega en función de diversos factores: la disponibilidad presupuestaria y de sensores, la facilidad de acceso e instalación de los mismos, la importancia relativa de cada bodega y las facilidades puestas por los propietarios. En cuatro de las bodegas se llevó a cabo un plan de monitorización más exhaustivo, con el objetivo de caracterizar el comportamiento de la construcción y las diferencias de ambiente higrotérmico existentes a lo largo de la misma. En las dos restantes la monitorización se limitó a un punto central representativo, con el objetivo de completar la caracterización del ambiente higrotérmico en la zona de crianza con un mayor número de bodegas.

La monitorización se llevó a cabo durante varios años. En ese tiempo, varias sondas sufrieron fallos de funcionamiento que provocaron algunos huecos en las series históricas. Por ello, y con el fin de simplificar la visualización de los resultados, del total de los años analizados se seleccionó un año representativo que contuviese el mayor número posible de datos.





Figura 18. *Ejemplo de ubicación de los sensores a distintas alturas.*

A continuación, se describen y justifican los planes de monitorización seleccionados en cada una de las bodegas analizadas:

3.2.2.1 **La Arboledilla**

Por ser una de las bodegas de mayor prestigio internacional y con un interés turístico especial se propuso una estrategia de monitorización completa (Figura 19). Por un lado, se instalaron dos registradores Hobo Pro v2 de temperatura y humedad en dos ubicaciones simétricas (P2 y P4) a una misma altura intermedia de la zona de crianza (1,8 m) con objeto de comprobar la uniformidad horizontal tanto de la temperatura como de la humedad dentro de la nave.

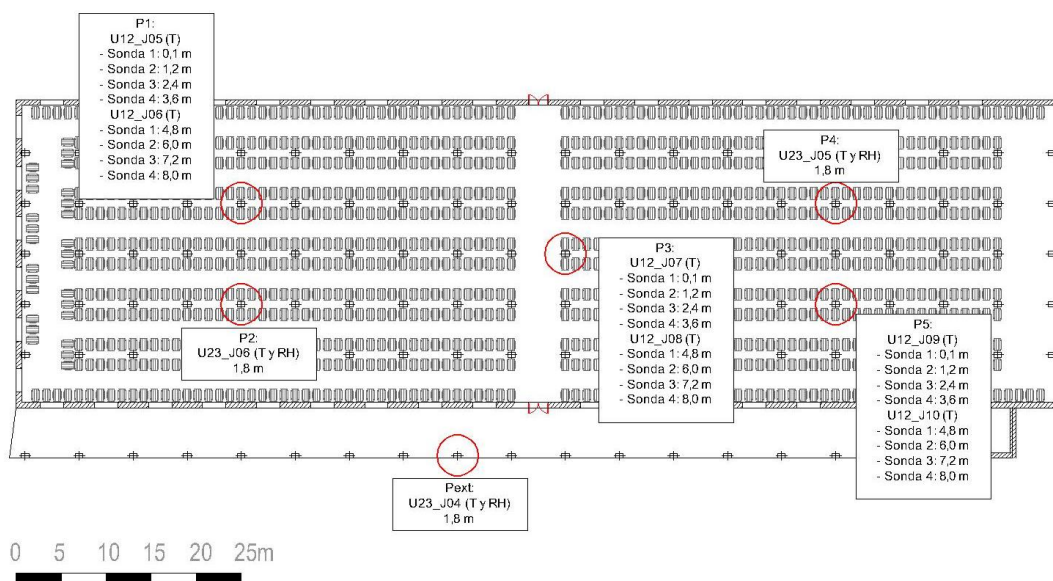


Figura 19. Sistema de monitorización de la bodega “La Arboledilla”

Por otro lado, se instalaron seis registradores Hobo de 4 canales en tres ubicaciones separados (P1, P3 y P5), dos registradores en cada emplazamiento, situando los ocho sensores equidistantes con una separación 1,2 m, y cubriendo así un perfil hasta 8 m de altura, con objeto de comprobar los fenómenos de estratificación vertical de la bodega.

La temperatura exterior se monitorizó a través de un registrador situada cerca del edificio (Pext), protegida de la radiación solar y de la lluvia con una carcasa diseñada a tal efecto.

El intervalo de medición se fijó en 15 min para todos los registradores. De este modo, se dispuso de 981.120 datos interiores (911.040 de temperatura y 70.080 de humedad) y 70.080 datos exteriores (35.040 de temperatura y 35.040 de humedad) por cada año monitorizado.

3.2.2.2 Hidalgo la Gitana

Para la segunda Bodega Catedra tradicional, también de prestigio internacional y con un interés turístico especial, se decidió diseñar una estrategia de monitorización completa (Figura 20). Por un lado, se instalaron tres registradores Hobo Pro v2 de temperatura y humedad en tres ubicaciones representativas del total de la bodega (P1, P2 y P4) a una misma altura intermedia de la zona de crianza (1,8 m) con objeto de comprobar la uniformidad horizontal tanto de la temperatura como de la humedad dentro de la nave.

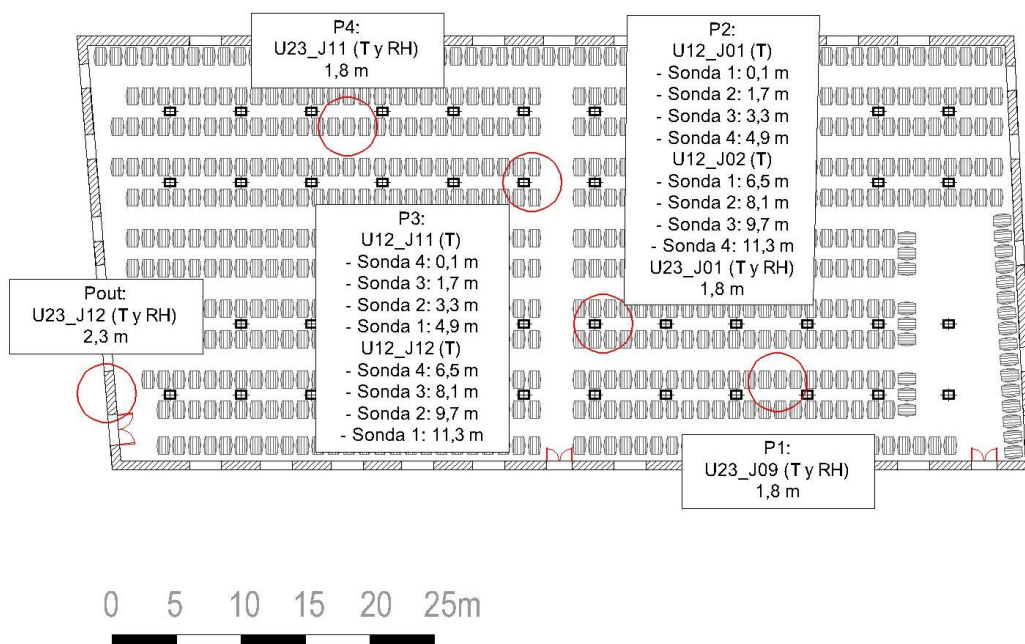


Figura 20. Sistema de monitorización de la bodega “Hidalgo la Gitana”

Por otro lado, se instalaron también cuatro registradores Hobo de 4 canales en dos puntos separados, dos registradores en cada punto. En este caso los sensores se situaron de manera diferente a la bodega anterior, separándolos más (1,6 m) hasta alcanzar la altura máxima de la nave de 11,3 m con objeto de comprobar los fenómenos de estratificación vertical de toda la bodega, incluida la cubierta.

La temperatura exterior se monitorizó a través de un registrador situado cerca del edificio (Pext), protegida de la radiación solar y de la lluvia con una carcasa diseñada a tal efecto.

El intervalo de medición se fijó en 15 min para todos los registradores. De este modo, se dispuso de 770.880 datos interiores (665.760 de temperatura y 105.120 de humedad) y 70.080 datos exteriores (35.040 de temperatura y 35.040 de humedad) por año monitorizado.

3.2.2.3 Barbiana

En esta bodega se llevó a cabo un estudio exhaustivo de la uniformidad horizontal y vertical de las bodegas Catedral, instalando 75 sensores. En esta bodega existía un especial interés especial del enólogo en desarrollar un estudio exhaustivo del comportamiento de la bodega, con objeto de determinar las variaciones existentes a lo largo de las naves y relacionarlas con ciertas andanadas en las que se ubicaban diferentes variedades de Manzanilla. Además, este

plan de monitorización se planteó de una forma más detallada para poder desarrollar un estudio de Dinámica Computacional de Fluidos (CFD, de sus siglas en inglés) aunque este estudio no es objeto de esta tesis. En este caso se plantearon tres estrategias:

1. Analizar el comportamiento de la uniformidad horizontal tanto de la temperatura como de la humedad dentro de la nave en distintas ubicaciones y a distintas alturas. Con este fin se instalaron cinco registradores Hobo Pro v2 en la zona media de crianza (1,8 m), dos más a 7,5 m, y dos más a 8,5 m.
2. Con objeto de obtener una imagen más completa del comportamiento térmico de la nave, en esta ocasión se instalaron hasta catorce registradores Hobo de 4 canales en ocho puntos diferentes de la nave, situando los sensores a diferentes alturas, tratando de cubrir el máximo volumen total de la bodega.
3. Por otro lado, se instalaron 13 registradores Hobo Pro v2 en dos ubicaciones diferentes, repartiendo los sensores a distintas alturas hasta cubrir toda la altura de la nave, con objeto de analizar el comportamiento de la estratificación no sólo de la temperatura sino también de la humedad dentro de la bodega.

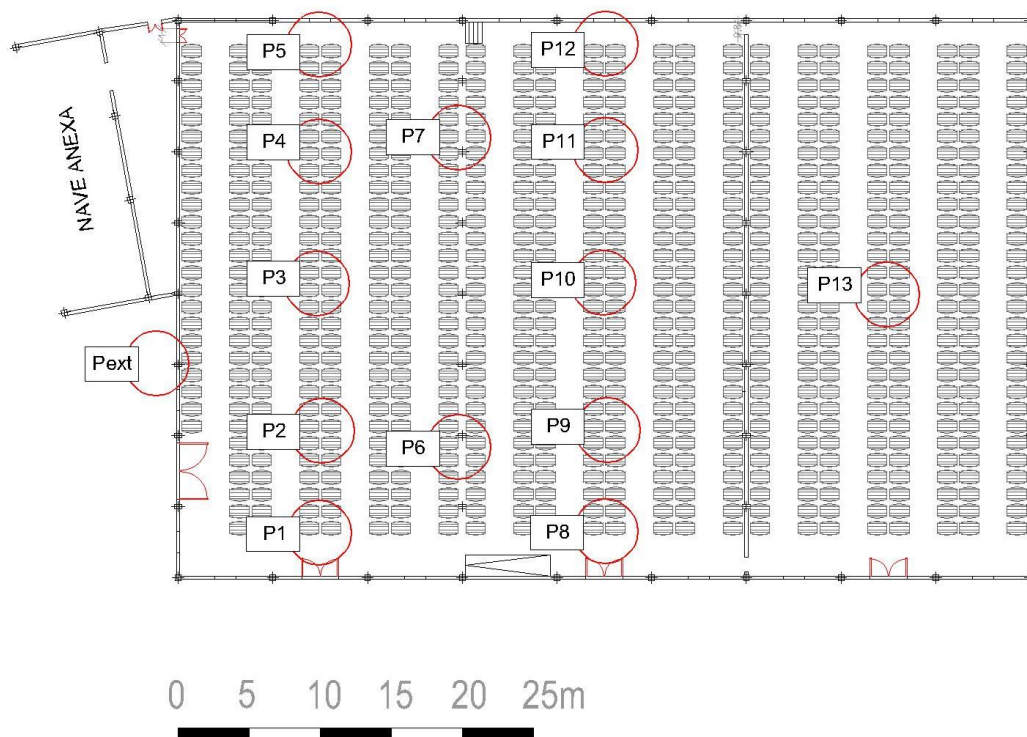


Figura 21. Sistema de monitorización de la bodega "Barbiana"

3.2.2.4 Bodega Las Pastoras

En esta bodega de moderna construcción con unas características constructivas singulares se propuso en un plan de monitorización completo. Para el estudio de la uniformidad se instalaron tres registradores de temperatura y humedad en tres ubicaciones de la bodega (P1, P2 y P3). Los sensores se colocaron a una altura intermedia de almacenamiento del producto (1,6 m) en la zona de envejecimiento, correspondientes a diferentes criaderas. Para controlar con detalle las variaciones verticales, se instalaron dos registradores de temperatura en dos puntos de la bodega (P2 y P3). Para ello, las sondas se colocaron a diferentes alturas entre 0 y 3,7 m, por imposibilidad de instalar sensores hasta la cubierta. La temperatura exterior se monitorizó a través de un registrador situado en la bodega próxima de La Arboledilla.

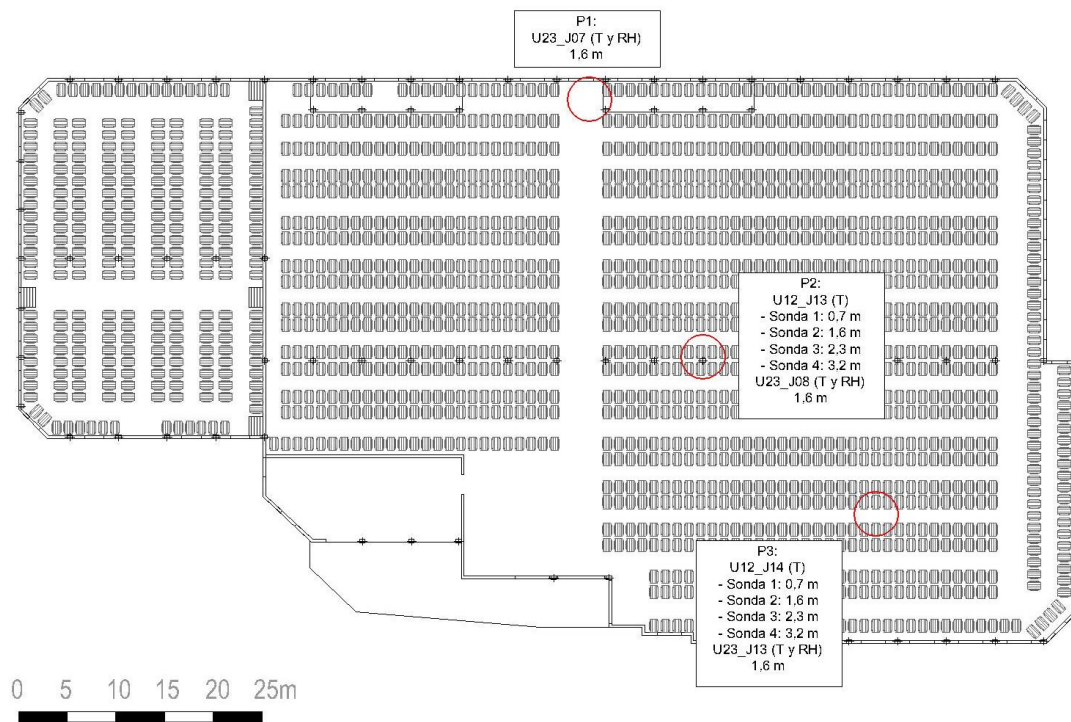


Figura 22. Sistema de monitorización de la bodega “Las Pastoras”

El intervalo de medición se fijó en 15 min para todos los registradores. Sin embargo, durante el proceso de monitorización, uno de los registradores de cuatro canales falló y por tanto no se han podido utilizar sus datos. De este modo, se dispuso de 350.400 datos interiores (245.280 de temperatura y 105.120 de humedad) por año monitorizado.

3.2.2.5 Bonanza

Se trata de una bodega de moderna cuya construcción se basa en los modelos de las bodegas tradicionales. Por un lado, se diseñó una estrategia de monitorización para la comprobación de la estratificación vertical ubicando dos registradores Hobo de 4 canales en el punto central de la nave, colocando los sensores a diferentes alturas entre 0 y 6 m, cubriendo gran parte del perfil vertical desde el suelo hasta la zona próxima al tejado. Por otro lado, se ubicó un único registradores Hobo Pro v2 a 10 m de altura (Figura 23). Todos los registradores fueron instalados en un único punto centro de la nave.

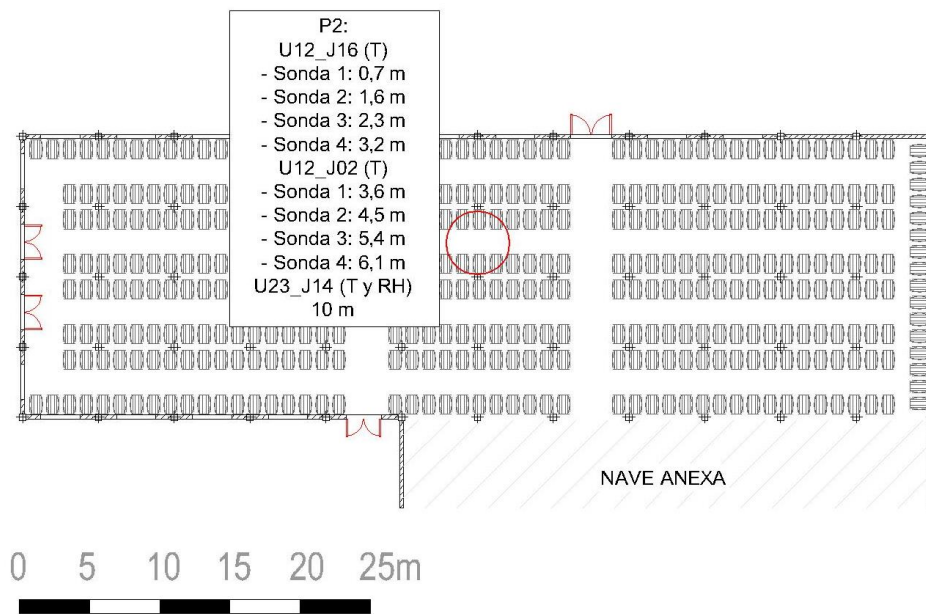


Figura 23. Sistema de monitorización de la bodega “Bonanza”

El intervalo de medición se fijó en 15 min para todos los registradores. De este modo, se dispuso de 350.400 datos interiores (315.360 de temperatura y 35.040 de humedad) por año monitorizado. Por su cercanía a la bodega La Arboledilla no fue necesario disponer de un sensor exterior.

3.2.2.6 Bodega la Goya

Inicialmente, esta bodega de moderna construcción, con una baja capacidad de ventilación por la falta de aperturas, parecía presentar escaso interés. Sin embargo, dado el interés del propietario de la bodega en conocer su ambiente interior, se llevó a cabo la monitorización con un único registrador de temperatura y humedad en el punto central de la bodega, a una altura intermedia de la zona de crianza (1,8 m). Tras el análisis posterior de los datos y dada la dedicación de la bodega a la crianza de vino de alta calidad, se decidió su incorporación en el estudio.

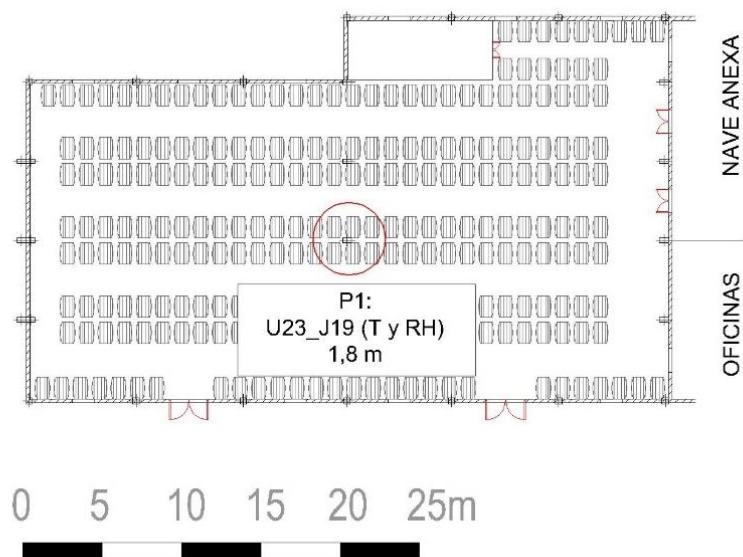


Figura 24. Sistema de monitorización de la bodega “La Goya”

La monitorización del ambiente interior se llevó a cabo utilizando un único registrador de temperatura y humedad Hobo Pro v2. El sensor se colocó a una altura intermedia de almacenamiento del producto (1,6 m) en la zona de crianza. La monitorización del ambiente exterior se realizó con un registradore Hobo Pro v2 de segunda generación (Hobo®), dentro de una carcasa protectora ubicado en la bodega anexa de Barbiana. De este modo, se dispuso de 70.080 datos interiores (35.040 de temperatura y 35.040 de humedad) y 70.080 datos interiores (35.040 de temperatura y 35.040 de humedad) por año monitorizado. En esta bodega no se ha realizado el estudio de estratificación vertical ni de uniformidad horizontal.

3.2.2.7 **Condiciones exteriores**

Para la monitorización de las condiciones exteriores se han utilizado registradores Hobo Pro v2 instalados en el interior de carcasas protectoras para exterior que mantenían los sensores protegidos de la lluvia y de la radiación solar directa. Además, estos sensores se instalaron en zonas resguardados de las inclemencias y de difícil acceso para protegerlos de posibles daños.

Dada la cercanía entre algunas bodegas pertenecientes al mismo complejo bodeguero, se decidió la instalación de registradores de exterior únicamente en las bodegas: La Arboledilla, Hidalgo la Gitana y Barbiana. Estos datos han sido utilizados para la caracterización del resto de las bodegas anexas.

3.4 CARACTERIZACIÓN DEL AMBIENTE HIGROTÉRMICO DE LAS BODEGAS

El objetivo principal de esta tesis es caracterizar el comportamiento higrotérmico del interior de las bodegas Catedral. De ese modo, de los años que duró la monitorización se seleccionó un año representativo, en el cual se garantizase disponer del total de la serie histórica de datos.

Los datos de los registradores fueron descargados periódicamente y se crearon bases de datos para cada una de las bodegas por separado. En la Figura 25 se muestra un ejemplo de los datos en bruto preparados en formato Excel para su posterior análisis.

RELOJ	Pext	P4			P2			P1			P1			P1			P1			P3			P3			P3					
	U23_J04_ext	U23_J05	U23_J06	U12_J05	U12_J05	U12_J05	U12_J05	U12_J05	U12_J06	U12_J06	U12_J06	U12_J06	U12_J06	U12_J07	U12_J07	U12_J07	U12_J07	U12_J07	U12_J07	U12_J07	U12_J07	U12_J07	U12_J07	U12_J07	U12_J07	U12_J07	U12_J07	U12_J07			
	1.8m	1.8m	1.8m	0.1m	1.2m	2.4m	3.6m	4.8m	6.0m	7.2m	8.0m	0.1m	1.2m	2.4m	3.6m	4.8m	0.1m	1.2m	2.4m	3.6m	4.8m	0.1m	1.2m	2.4m	3.6m	4.8m					
00:00:00	10,467	10,883	10,932	10,81	10,761	10,736	10,761	10,785	10,834	10,932	10,98	10,761	10,858	10,81	10,956	10,883															
00:15:00	10,394	10,834	10,883	10,81	10,7365	10,687	10,6995	10,724	10,7605	10,8465	10,9315	10,7485	10,8095	10,7485	10,883	10,8095															
00:30:00	10,271	10,785	10,858	10,81	10,712	10,638	10,638	10,663	10,687	10,761	10,883	10,736	10,761	10,687	10,81	10,736															
00:45:00	10,198	10,761	10,883	10,81	10,6995	10,626	10,626	10,6505	10,687	10,7485	10,8465	10,7485	10,761	10,675	10,7975	10,724															
01:00:00	10,1	10,761	10,834	10,81	10,687	10,614	10,614	10,638	10,687	10,736	10,81	10,761	10,761	10,663	10,785	10,712															
01:15:00	10,051	10,736	10,81	10,81	10,675	10,602	10,5895	10,626	10,6625	10,724	10,7975	10,7365	10,7365	10,6385	10,7485	10,6875															
01:30:00	9,977	10,736	10,834	10,81	10,663	10,59	10,565	10,614	10,638	10,712	10,785	10,712	10,712	10,614	10,712	10,663															
01:45:00	9,879	10,687	10,785	10,761	10,6505	10,553	10,455	10,5405	10,5895	10,663	10,736	10,651	10,6385	10,5405	10,6385	10,5775															
02:00:00	9,805	10,565	10,785	10,712	10,638	10,516	10,345	10,467	10,541	10,614	10,687	10,59	10,565	10,467	10,565	10,492															
02:15:00	9,756	10,541	10,785	10,6995	10,614	10,4915	10,3205	10,406	10,504	10,5775	10,6505	10,5165	10,516	10,4305	10,516	10,406															
02:30:00	9,706	10,443	10,761	10,687	10,59	10,467	10,296	10,345	10,467	10,541	10,614	10,443	10,467	10,394	10,467	10,332															
02:45:00	9,583	10,345	10,687	10,577	10,5165	10,3815	10,198	10,296	10,3815	10,4795	10,5775	10,2835	10,357	10,247	10,3445	10,2465															
03:00:00	9,46	10,271	10,59	10,467	10,443	10,296	10,1	10,247	10,296	10,418	10,541	10,124	10,247	10,1	10,222	10,173															
03:15:00	9,361	10,247	10,565	10,406	10,394	10,2225	10,0385	10,21	10,2715	10,3835	10,5165	10,112	10,21	10,0875	10,1975	10,1485															
03:30:00	9,287	10,271	10,541	10,345	10,345	10,149	9,977	10,173	10,247	10,369	10,492	10,1	10,173	10,075	10,173	10,124															
03:45:00	9,238	10,222	10,443	10,455	10,4305	10,2225	10,0505	10,1365	10,1855	10,2835	10,4185	10,1735	10,1975	10,075	10,0995	10,075															
04:00:00	9,089	10,149	10,296	10,565	10,516	10,296	10,124	10,1	10,124	10,198	10,345	10,247	10,222	10,075	10,026	10,026															
04:15:00	8,916	10,124	10,198	10,3815	10,3325	10,161	9,9275	10,014	10,0625	10,1735	10,308	10,0995	10,075	9,903	9,9525	9,9155															
04:30:00	8,792	10,026	10,247	10,198	10,149	10,026	9,731	9,928	10,001	10,149	10,271	9,952	9,928	9,731	9,879	9,805															
04:45:00	8,717	10,001	10,222	10,21	10,1735	10,0385	9,768	9,9035	9,9645	10,1	10,1975	9,952	9,94	9,7925	9,891	9,805															
05:00:00	8,668	10,026	10,173	10,222	10,198	10,051	9,805	9,879	9,928	10,051	10,124	9,952	9,952	9,854	9,903	9,805															

Figura 25. Ejemplo tabla de datos obtenido de los registradores para una de las bodegas

Posteriormente estos datos fueron analizados utilizando plantillas de Microsoft Excel desarrolladas en VBA (*Visual Basic for Applications*), calculando así automáticamente cada uno de los datos estadísticos en los diferentes intervalos: horarios, diarios, mensuales y anuales (Figura 26).

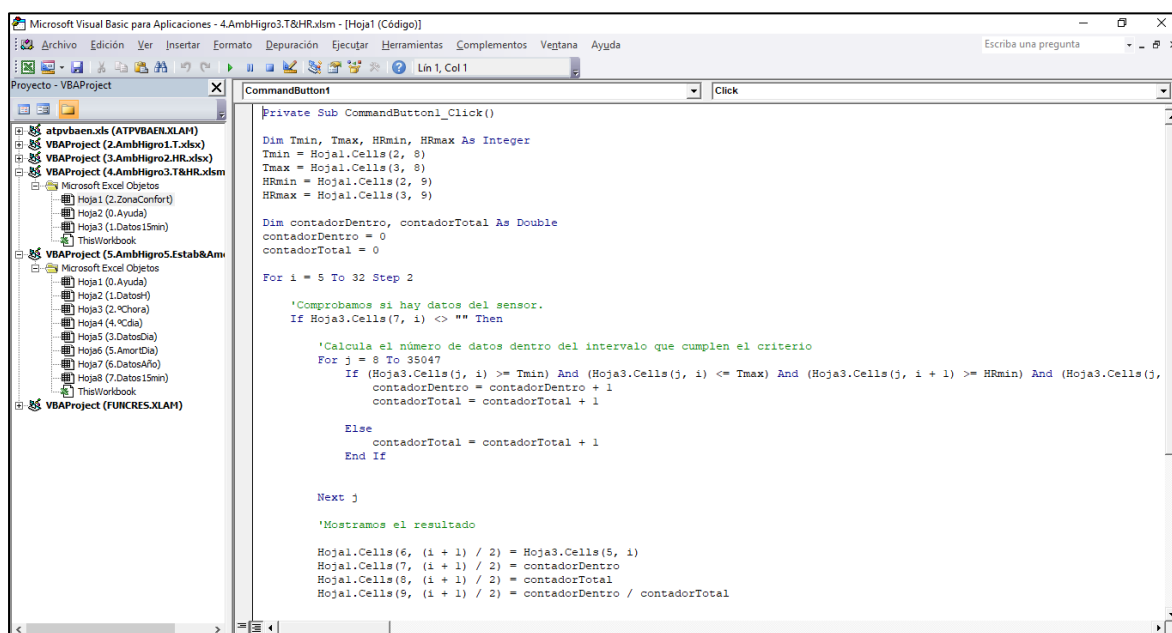


Figura 26. Detalle de las plantillas desarrolladas en VBA.

Se pretende así sintetizar el comportamiento higrotérmico de las bodegas y especialmente de la zona de crianza (espacio ocupado por las botas) en un reducido conjunto de figuras y tablas, mediante el análisis de diferentes aspectos complementarios y la combinación de diferentes periodos de visualización (diario, mensual, anual).

A continuación, se detallan cada uno de los apartados analizados.

3.4.1 COMPORTAMIENTO GLOBAL

En este apartado se trata de representar la evolución anual y mensual de la temperatura y la humedad del conjunto de sensores de la zona de crianza y comparar los resultados con los datos recogidos en el exterior, con objeto de proporcionar una primera visión global del comportamiento higrotérmico interior de la bodega.

En este apartado tiene especial relevancia representar mediante histogramas las frecuencias de la temperatura y de la humedad relativa con objeto de identificar los posibles intervalos de confort.

1. **Comportamiento global de la temperatura.** Se proponen las siguientes figuras y tablas:
 - a. Tabla comparativa en la que se muestran valores representativos de temperatura en el exterior (ext) y en la zona de crianza (int). En este caso los

valores propuestos son: media (promedio), mediana, moda, desviación estándar, varianza, curtosis, coeficiente de asimetría, rango, mínimo, máximo y por último los percentiles.

- b. Figura que representa la evolución anual de la temperatura diaria del aire en el interior de la zona de crianza, mediante los valores de promedio, máximo, mínimo y variación diaria (diferencia entre el valor máximo y el valor mínimo diario).
 - c. Tabla de frecuencias de temperatura tanto en el exterior como en la zona de crianza para cada uno de los meses del año.
 - d. Figura que representa el histograma anual de frecuencias de la temperatura del aire, a partir de los datos de la tabla anterior, comparando el exterior de la bodega con la zona de crianza y observando el rango de temperaturas en el que se desarrolla el vino.
 - e. Figura que representa para cada uno de los meses el histograma de frecuencias de la temperatura del aire en la zona de crianza, con objeto de observar gráficamente los rangos de temperatura para cada uno de los meses.
2. **Comportamiento global de la humedad relativa.** Las figuras y tablas propuestas para representar esta componente son:
- a. Tabla comparativa en la que se muestran valores representativos de humedad relativa en el exterior (ext) y en la zona de crianza (int). De nuevo, los valores propuestos son: media (promedio), mediana, moda, desviación estándar, varianza, curtosis, coeficiente de asimetría, rango, mínimo, máximo y por último los percentiles.
 - b. Figura que representa la evolución anual de la humedad relativa del aire en el interior de la zona de crianza, mediante los valores de promedio, máximo, mínimo y variación diaria (diferencia entre el valor máximo y el valor mínimo diario).
 - c. Tabla de histograma de frecuencias de la humedad relativa tanto en el exterior como en la zona de crianza para cada uno de los meses del año.
 - d. Figura que representa el histograma anual de frecuencias de la humedad relativa del aire, comparando el exterior de la bodega con la zona de crianza.
 - e. Figura que representa la evolución a lo largo de cada mes del histograma frecuencias de la humedad relativa del aire en la zona de crianza.

3.4.2 DIAGRAMAS PSICOMÉTRICOS

Los diagramas psicométricos representan de forma conjunta la temperatura y humedad relativa. Estos diagramas permiten interpretar gráficamente las áreas de confort y el

desempeño de los edificios. Además, pueden ser de gran utilidad para analizar aspectos clave como las mermas por evaporación e identificar las épocas del año con mayor riesgo.

Se proponen una serie de diagramas con objeto de obtener diferentes interpretaciones:

1. Un primer diagrama con la representación de los valores promedios diarios en la zona de crianza. En esta figura se puede observar la tendencia anual, lo que da una visión general del comportamiento global de la bodega.
2. Un segundo diagrama con la representación de los valores promedios horarios en la zona de crianza. En esta figura se puede observar la diferencia con la figura anterior y analizar la dispersión a nivel horario.
3. Por último, se propone una serie de seis diagramas, cada uno representando dos meses opuestos del año (enero-julio, febrero-agosto, marzo-septiembre, abril-octubre, mayo-noviembre, junio-diciembre) en los que se incluyen los valores promedios horarios en la zona de crianza comparados con el exterior de la bodega. En estas gráficas se observa el desempeño del edificio y su capacidad de amortiguamiento de los valores extremos exteriores.

3.4.3 ESTABILIDAD

La estabilidad determina la rapidez con la que varían la temperatura y la humedad relativa a lo largo del día en un mismo punto. Es importante conocer la capacidad que tienen los edificios para mantener unas condiciones lo más estables posibles en la zona de crianza. En este sentido, se proponen una serie de figuras:

1. **Temperatura:**
 - a. Una primera figura que representa el promedio de la variación horaria de la temperatura, en grados centígrados por hora ($^{\circ}\text{C}/\text{h}$), junto con su desviación estándar, para cada uno de los meses de año, comparando la zona de crianza y el exterior de la bodega.
 - b. Una segunda figura que representa el promedio de la variación diaria de la temperatura, en grados centígrados por día ($^{\circ}\text{C}/\text{día}$), junto con su desviación estándar, para cada uno de los meses de año, comparando la zona de crianza y el exterior de la bodega.
2. **Humedad relativa:**
 - a. Una primera figura que representa el promedio de la variación horaria de la humedad relativa (% h.r.), junto con su desviación estándar, para cada uno

de los meses de año, comparando la zona de crianza y el exterior de la bodega.

- b. Una segunda figura que representa el promedio de la variación diaria de la humedad relativa (% h.r.), junto con su desviación estándar, para cada uno de los meses de año, comparando la zona de crianza y el exterior de la bodega.

3.4.4 UNIFORMIDAD

La uniformidad analiza las diferencias de temperatura y humedad relativa existentes entre todos los sensores del interior de la bodega en un instante determinado. El estudio trata tanto la estratificación vertical en una localización concreta de la nave como la uniformidad horizontal en varios puntos para una altura determinada. La información sobre las diferencias existentes entre distintos puntos de la bodega puede ser de gran utilidad a la hora de seleccionar la ubicación de las botas para los diferentes sistemas de criaderas.

1. **Estratificación** o uniformidad vertical. A través de una serie de figuras y tablas se trata de representar y cuantificar el fenómeno de la estratificación que se produce en cada una de las bodegas. Se analizan cada uno de los puntos monitorizados. Con este fin se proponen las siguientes tablas y figuras:
 - a. Una primera figura representa la evolución anual de la estratificación, mediante el promedio diario de la temperatura interior para cada uno de los sensores colocados en cada una de las alturas y la variación diaria entre los sensores extremos (diferencia entre máximo y mínimo).
 - b. Una tabla que muestra los valores representativos de la estratificación de la temperatura en ese punto de la nave para cada instante monitorizado, considerando por un lado la variación de los dos sensores opuestos, es decir toda la altura de la nave de barricas ($^{\circ}\text{C}$), y por otro esta misma variación de la temperatura expresada por metro lineal ($^{\circ}\text{C}/\text{m}$). Los valores propuestos son: media (promedio), mediana, moda, desviación estándar, varianza, curtosis, coeficiente de asimetría, rango, mínimo, máximo y por último los percentiles. De manera equivalente, en las bodegas con sensores U23 dispuestos a diferentes alturas, se calcula la estratificación de humedad relativa.
 - c. La siguiente figura representa los promedios mensuales de estratificación de temperatura para cada punto analizado de cada bodega, tomando como referencia el sensor más cercano al suelo. Junto a la figura se muestran los datos del ajuste de regresión realizado, que permite estimar la estratificación

en función de la altura. Esta figura es interesante para analizar la variación de la estratificación en la zona de crianza comparado con el resto de la bodega.

- d. La última figura representa la evolución de la estratificación de la temperatura a lo largo del día, a través de los promedios mensuales de la estratificación media ($^{\circ}\text{C}/\text{m}$), en toda la altura analizada. En este caso se pueden observar las diferencias de estratificación según la hora del día.

2. **Uniformidad horizontal de la temperatura:** De forma análoga, a través de una serie de figuras y tablas se trata de representar y cuantificar la variación de la temperatura en los diferentes puntos analizados para una altura determinada, con objeto de mostrar la capacidad del edificio para mantener unas condiciones homogéneas en toda la nave:

- a. La primera figura representa la evolución anual de la uniformidad, mediante el promedio diario de la temperatura interior para cada uno de los sensores colocados en cada una de las ubicaciones y la variación diaria entre los sensores de mayor y menor valor.
- b. La siguiente tabla muestra los valores representativos de la uniformidad de la temperatura a esa altura, considerando la diferencia de temperatura entre los dos sensores de mayor y menor valor para cada instante monitorizado. Los valores propuestos son: media (promedio), mediana, moda, desviación estándar, varianza, curtosis, coeficiente de asimetría, rango, mínimo, máximo y por último los percentiles.
- c. La siguiente figura representa para cada mes del año el promedio de las diferencias existentes en cada instante entre el punto a mayor temperatura y el de menor temperatura junto a su desviación estándar.
- d. La última figura representa la evolución de la uniformidad de la temperatura a lo largo del día, a través de los promedios mensuales de la diferencia de temperatura entre el punto de mayor temperatura y el de menor temperatura, para la altura analizada.

3. **Uniformidad horizontal de la humedad relativa:** a través de una serie de figuras y tablas se trata de representar y cuantificar la variación de la humedad relativa en los diferentes puntos analizados para una altura determinada.

- a. La primera figura representa la evolución anual de la uniformidad, mediante el promedio diario de la humedad relativa interior para cada uno de los sensores colocados en cada una de las ubicaciones y la variación diaria entre los sensores de mayor y menor valor.

- b. La siguiente tabla muestra los valores representativos de la uniformidad de la humedad relativa a esa altura, considerando la diferencia de humedad relativa entre los dos sensores de mayor y menor valor para cada instante monitorizado. Los valores propuestos son: media (promedio), mediana, moda, desviación estándar, varianza, curtosis, coeficiente de asimetría, rango, mínimo, máximo y por último los percentiles.
- c. La siguiente figura representa para cada mes del año el promedio de las diferencias existentes en cada instante entre el punto a mayor y el de menor humedad relativa junto a su desviación estándar.
- d. La última figura representa la evolución de la uniformidad de la humedad relativa a lo largo del día, a través de los promedios mensuales de la diferencia de humedad relativa entre el punto de mayor y el de menor valor, para la altura analizada.

3.4.5 AMORTIGUAMIENTO

El amortiguamiento relaciona el ambiente higrotérmico interior con el exterior, cuantificando la efectividad de la construcción para reducir las variaciones de temperatura y humedad relativa del exterior. Se expresa como porcentaje de la variación exterior $[(\text{variación exterior} - \text{variación interior}) / \text{variación exterior}]$, siendo más efectiva cuanto mayor amortiguamiento se consiga.

De esta manera se proponen una serie de figuras que tratan de representar el desempeño de las bodegas a través de este componente:

1. **Amortiguamiento de la temperatura:** muestra la eficacia del edificio para amortiguar los cambios diarios de la temperatura exterior.
 - a. Una primera figura muestra la evolución anual de las temperaturas máximas y mínimas diarias, comparando la zona de crianza y el exterior de la bodega.
 - b. Una segunda figura representa el amortiguamiento mensual de la temperatura exterior logrado por la construcción $[(\text{variación mensual exterior} - \text{variación mensual interior}) / \text{variación mensual exterior}]$.
 - c. Una última figura representa el promedio del amortiguamiento diario de la temperatura exterior logrado por la construcción $[(\text{variación diaria exterior} - \text{variación diaria interior}) / \text{variación diaria exterior}]$.
2. **Amortiguamiento de la humedad relativa:** muestra la eficacia del edificio para amortiguar los cambios diarios de la humedad relativa exterior.

- a. Una primera figura muestra la evolución anual de la humedad relativa máxima y mínima diaria, comparando la zona de crianza y exterior de la bodega.
- b. Una segunda figura representa el amortiguamiento mensual de la humedad relativa exterior logrado por la construcción $[(\text{variación mensual exterior} - \text{variación mensual interior}) / \text{variación mensual exterior}]$.
- c. Una última figura representa el promedio del amortiguamiento diario de la humedad relativa exterior logrado por la construcción $[(\text{variación diaria exterior} - \text{variación diaria interior}) / \text{variación diaria exterior}]$.

3.5 MODELO DE SIMULACIÓN ENERGÉTICA

Las bodegas Catedral se proponen como modelos de edificios de consumo de energía casi nulo (NZEB), que permiten, sin la necesidad de sistemas de climatización, mantener unas condiciones ambientales adecuadas para el desarrollo del velo de flor. Sin embargo, este proceso de producción tan fuertemente influido por las condiciones climáticas puede verse claramente afectado por el fenómeno del calentamiento, de manera que en muchos casos podrían dejar de cumplir las funciones para las que fueron diseñados.

En este sentido, uno de los objetivos de esta tesis ha sido desarrollar y validar por primera vez un modelo de simulación energética para este tipo de edificios que permita anticipar los efectos del cambio climático y a su vez desarrollar y probar estrategias que mejoren el desempeño de estos edificios.

Para ello se utilizó el programa de simulación energética de edificios denominado EnergyPlus™ utilizando como interfaz el software DesignBuilder® versión 7.0.0.

Con este fin se ha desarrollado y validado un modelo energético que a continuación se desarrolla.

3.5.1 SOFTWARE EMPLEADO

DesignBuilder es un software especializado en la simulación ambiental y energética de edificios. Concebido para facilitar los procesos de simulación. Entre sus principales aplicaciones, de cara a los objetivos perseguidos en la presente tesis, se destacan: el cálculo mediante simulaciones dinámicas con datos climáticos reales, evaluar de manera detallada las condiciones ambientales, calcular las transferencias energéticas, la simulación de ventilación



natural de edificios como recurso de enfriamiento pasivo, análisis comparativo de distintas configuraciones arquitectónicas (ubicación, orientación, distribución, etc.), compara el impacto energético de diferentes materiales y sistemas constructivos empleados en la envolvente de los edificios, evaluar el impacto energético de dispositivos de sombreado y control solar (laminas, voladizos, persianas, pantallas, etc.) (Ordóñez García, 2016).

Se ha utilizado la versión 7.0.0 de DesignBuilder con la versión 9.4 del módulo EnergyPlus.

DesignBuilder permite, desde una interfaz de ventanas y pestañas, generar un modelo en 3D del edificio, en el que se definen zonas o estancias térmicas independientes que constituyen los espacios de cálculo. De forma detallada se asignan los elementos constructivos y de

funcionamiento (actividades, cerramientos, aberturas, iluminación y HVAC), se imputan las condiciones exteriores de ubicación, datos climatológicos y finalmente devuelve los resultados ambientales interiores estimados.

3.5.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE DEFINICIÓN DEL MODELO

A continuación, se describe detalladamente el proceso utilizado para la definición del modelo de simulación energética.

3.5.2.1 Bodega seleccionada

Se seleccionó la bodega Catedral tradicional centenaria “Hidalgo La Gitana”, por tratarse de una de las bodegas disponibles en el estudio de mayor prestigio internacional. Además, su simplicidad constructiva facilitaba el desarrollo del modelo. La bodega, tiene una estructura arquitectónica sencilla (Figura 27), compuesta por un gran espacio rectangular diáfano,

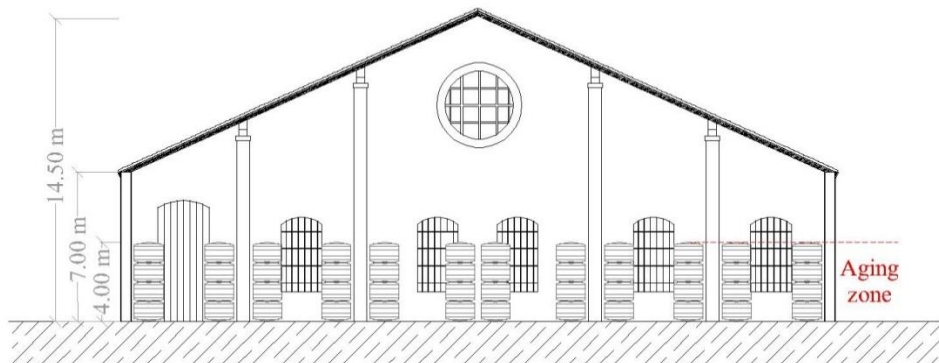


Figura 27. Sección interior de la bodega “Hidalgo la Gitana”

Inicialmente, desde la interfaz del programa se establecieron los “datos del sitio”:

Ubicación.....latitud 36,78; longitud -6,35)

Zona climáticaASHRAE (3A)

Elevación sobre el nivel del mar 12 m

Nivel de exposición al viento.....2.normal

Orientación del emplazamiento327°

Las temperaturas de la superficie del suelo, para cada mes, se establecieron a partir de la media mensual de las temperaturas recogidas por los sensores situados a nivel del suelo.

Los “datos climáticos para la simulación” se introdujeron a partir de los datos del sensor exterior, para lo que fue necesario generar un archivo de datos “EnergyPlus Weather” (EPW) a partir de estos.

A continuación, se generó el “bloque” del edificio con una única “zona térmica” a partir de las dimensiones básicas del edificio (71 x 33 m). Además, se tuvieron en consideración las siguientes características: el tejado a dos aguas tiene un ángulo de inclinación de 24°, la altura de los muros laterales es de 7 m y la altura bajo cubierta es de 14,5 m. Las fachadas principales (norte y sur) presentan una ligera rotación de 5,5° dirección norte respecto del plano perpendicular a las fachadas secundarias (oeste y este). El edificio dispone su eje longitudinal rotado 33° en dirección oeste respecto del norte geográfico.

3.5.2.2 Definición de los cerramientos

DesignBuilder permite caracterizar cada uno de los elementos de la envolvente del edificio atribuyendo valores que se traducen en un comportamiento térmico determinado. En base a las características constructivas de la bodega (Figura 28), se establecieron los siguientes elementos de cerramiento:

- **Suelos sobre el terreno:** Para la simulación del suelo original de albero que cubre la bodega se utilizó una capa de material limo-arcillos de la base de la librería de capas de DesignBuilder con las características que se muestran en la Tabla 4.
- **Muros exteriores:** Este cerramiento se programó incorporando tres capas según los elementos que los constituyen en la propia bodega, a partir de la biblioteca de materiales del Código Técnico de la Edificio (CTE, 2021): una capa externa de mortero de cal y arena de 2,5 cm, una capa intermedia de 60 cm de mampostería de piedra caliza porosa (piedra ostionera) y una capa interna de 2,5 cm de mortero de cal y arena.
- **Cubierta inclinada (ocupadas):** De la misma forma que el caso anterior esta capa se definió representando los elementos que constituyen la cubierta: una capa externa de teja árabe de arcilla cocida, una capa intermedia de mortero de cal y arena y una capa interna de ladrillo tosco calcáreo.

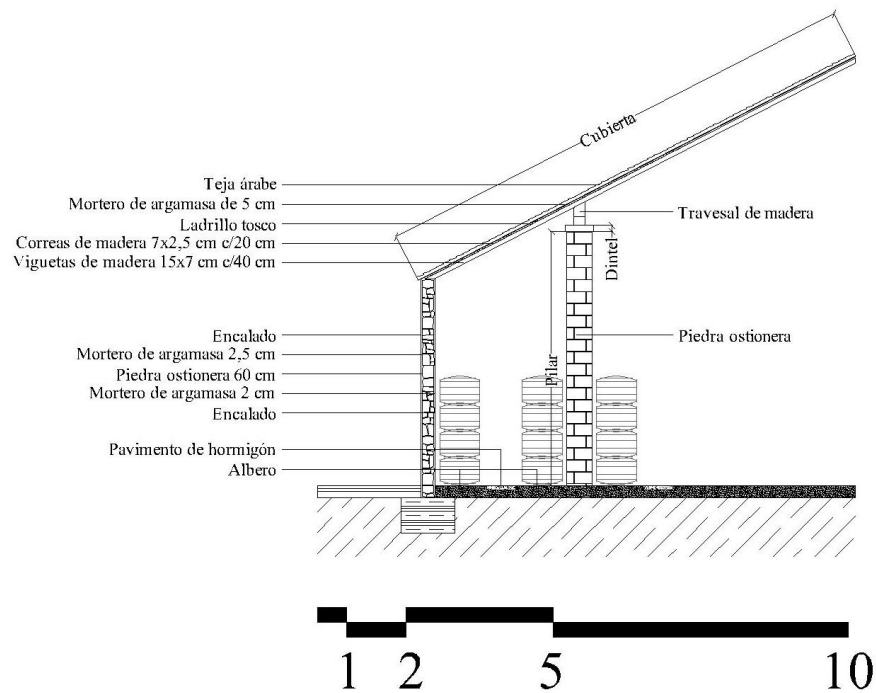


Figura 28. Características constructivas del cerramiento de la bodega "Hidalgo la Gitana": suelo, muros y cubierta.

En la Tabla 4 se describen las características térmicas de los cerramientos utilizados en el modelo de simulación (CTE, 2021).

Tabla 4

Valor térmico de los cerramientos utilizados en el modelo de simulación

	e	ρ	Cp	μ	λ	R
Suelo de albero						
Suelo limo-arcillos	0.30	1600	1000	50	2.00	0.15
Resistencia superficial interior						0.17
Resistencia superficial exterior						0.04
ΣR						0.36
U						2.77

	<i>e</i>	ρ	<i>C_p</i>	μ	λ	<i>R</i>
Muros exteriores						
Mortero	0.025	2100	1000	10	1.3	0.019
Mampostería (piedra ostionera)	0.600	2050	1000	250	0.55	1.091
Mortero	0.025	2100	1000	10	1.3	0.019
Resistencia superficial interior						0.13
Resistencia superficial exterior						0.04
					ΣR	1.30
					<i>U</i>	0.77
Tejado						
Teja árabe (arcilla cocida)	0.020	2000	800	30	1.00	0.020
Mortero	0.030	2100	1000	10	1.3	0.023
Ladrillo tosco calcáreo	0.050	2300	1000	10	0.85	0.059
Resistencia superficial interior						0.10
Resistencia superficial exterior						0.04
					ΣR	0.24
					<i>U</i>	4.13

Dónde:

- e* = Espesor (m).
- ρ = Densidad (kg/m³).
- C_p* = Calor específico (J/kg·K).
- μ = Factor de resistencia a la difusión del vapor de agua (adimensional).
- λ = Conductividad térmica (W/m·K).
- R* = Resistencia térmica (m²·K/W).
- U* = Transmitancia térmica (W/m²·K).

Siendo la resistencia térmica el producto del espesor y el calor específico; la resistencia total igual al sumatorio de las resistencias de cada elemento más las resistencias térmicas superficiales y la transmitancia térmica la inversa de la resistencia total (Ecuación 1).

$$R = \frac{e}{c_p} \quad y \quad U = \frac{1}{R}$$

Ecuación 1

El volumen total del vino en el interior de la bodega supone una masa térmica con una inercia importante. DesignBuilder permite hacer una aproximación mediante el establecimiento de un coeficiente de capacitancia de la zona, en este caso se aplicó un valor de 10.

3.5.2.3 Aperturas

A partir de este modelo se incluyeron las aperturas de puertas y ventanas con las siguientes características:

- Ventanas tipo A: De dimensiones 2,5 m de ancho por 1,3 m de alto con la parte superior de medio arco de 2,15 m de radio. Las ventanas quedan elevadas 3,5 m del piso.
- Ventana tipo B: De 1,80 de ancho por 3,80 m de alto con la parte superior en arco de medio punto de 2,15 m de radio. Las ventanas quedan elevadas 1 m sobre el piso.
- Ventana tipo C: De 1.80 de ancho por 1,5 de alto con la parte superior en arco de medio punto de 2,15 m de radio. La ventana se eleva 3,3 sobre el piso.
- Oculos: De 3,5 m de diámetro.
- Puerta A: De madera maciza de doble hoja, de 2,1 de ancho por 4,40 m de alto con la parte superior de medio arco de 2,15 m de radio.

La distribución de las aperturas fue la siguiente:

- La fachada este presenta 11 ventanas de tipo "A" a 3,5 m de elevación sobre el piso.
- La fachada oeste presenta 10 ventanas de tipo "A" a 3,5 m de elevación sobre el piso y 2 puertas de tipo "A" en la posición central y en su extremo sur.
- La fachada sureste presenta 4 ventanas de tipo "B", una ventana de tipo "C" en posición central y un óculo de 3,5 m de diámetro cuya parte inferior está a 8 m de altura sobre el piso.
- La fachada noroeste presenta 5 ventanas de tipo "B", una puerta de tipo "A".

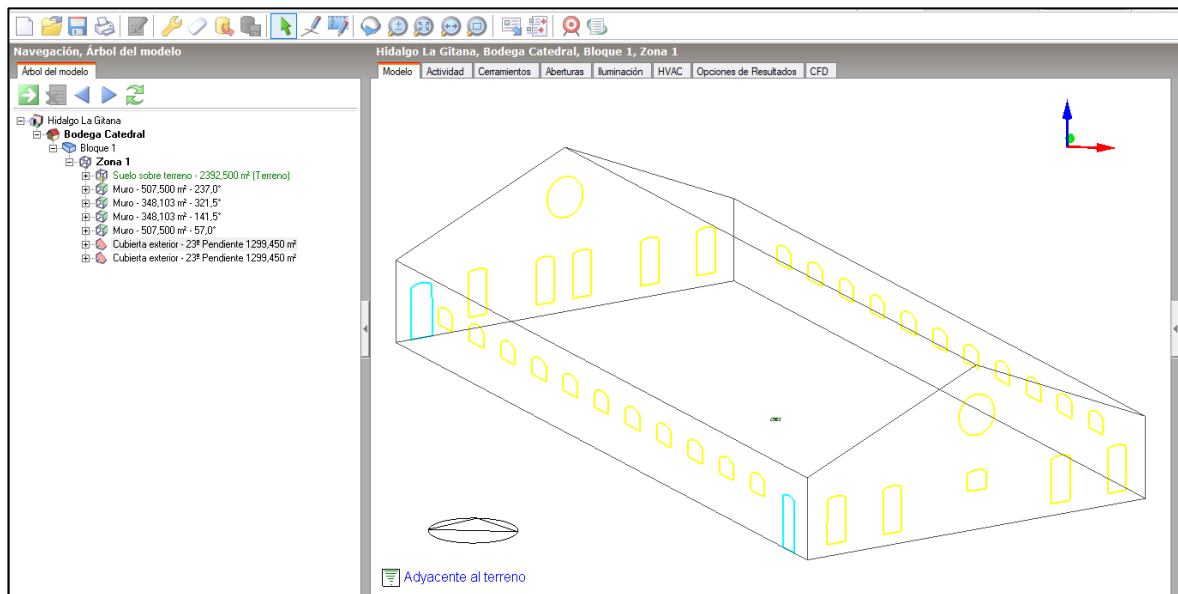


Figura 29. Representación en 3D del modelo del edificio en DesignBuilder.

Todas las aperturas se definen como ventanas exteriores sin cristales con sistemas de sombreado.

3.5.2.4 Otros elementos de programación

En cuanto a los componentes del módulo de “actividad” se programaron de la siguiente manera:

- **Ocupación:** Se definió una densidad de ocupación de 0,0001 (personas/m²) con una programación de tipo “On 24/7”.
- **Actividad:** Se estableció una actividad “Light manual work” (Fuente Librería de tasas metabólicas de DesignBuilder)
- **El resto de las opciones** como el control ambiental, computadoras, equipos de oficina, misceláneos, cocina y procesos se mantienen desconectados.

En cuanto a la programación de las componentes de módulo “HVAC” (calefacción, ventilación y aire acondicionado) se asignaron las siguientes consignas:

- **Ventilación Natural:** se programó con el método de “definición del aire” establecido en “1- Por zona”, con una tasa de “Aire exterior” (renovaciones por hora) de 1,30 y un funcionamiento mediante programación del tipo “On14/7” (fuente: biblioteca DesignBuilder)
- **El resto de las opciones** como ventilación mecánica, energía auxiliar, calefacción, refrigeración o control de humedad fueron desactivados.

3.5.3 OBTENCIÓN DE LOS DATOS CLIMÁTICOS

La bodega se monitorizó durante cuatro años. La evolución de la temperatura interior durante este periodo fue similar, con una desviación típica entre años de 1,4 °C y diferencias en la temperatura máxima anual de menos de 2 °C. Por desgracia, los problemas con los sensores afectaron al segundo y tercer año de datos, dejando sólo dos años completos (1º y 4º) para la validación del modelo y la caracterización de la temperatura interior.

Para demostrar la representatividad de la temperatura exterior monitorizada, se han utilizado los datos de una estación climatológica que el instituto de investigación y formación agraria y pesquera de la Junta de Andalucía mantuvo en la localidad de Sanlúcar (IFAPA, 2022). La estación climatológica sólo estuvo operativa entre 2004 y 2011 (2010 incompleto). No obstante, esta serie histórica sirvió para el propósito de esta tesis.

Para la transformación de los datos meteorológicos disponibles en archivos de formato EPW que pudieran ser introducidos en el programa DesignBuilder se seleccionó un archivo EPW de la localidad de Sanlúcar de Barrameda, manteniendo los datos de radiación e insolación, y se sustituyeron los datos de ubicación, temperatura y humedad, a partir de los datos promedio horarios de cada año.

3.5.4 VALIDACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN

El modelo, una vez desarrollado fue validado a partir de las recomendaciones propuestas por el “Federal Energy Management Program” (FEMP) (Webster et al., 2015) y la American Society of Heating, Ventilating, and Air Conditioning Engineers (ASHRAE, 2014). En ambos casos, los principales índices de estimación de errores utilizados fueron: Error de Sesgo Medio Normalizado (NMBE, por sus siglas en inglés) (Ecuación 2), Coeficiente de Variación del Error Medio Cuadrático [CV(RMSE) , por sus siglas en inglés] (Ecuación 3) y coeficiente de determinación (R^2) (Ecuación 4) (Ruiz and Bandera, 2017):

$$NMBE = \frac{\sum_{i=1}^n (m_i - s_i)}{\sum_{i=1}^n m_i} \times 100 (\%) \quad (\text{Ecuación 2})$$

$$CV(RMSE) = \frac{1}{\bar{m}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (m_i - s_i)^2}{n}} \times 100 (\%) \quad (\text{Ecuación 3})$$

$$R^2 = \left(\frac{n \sum_{i=1}^n m_i s_i - \sum_{i=1}^n m_i \sum_{i=1}^n s_i}{\sqrt{(n \sum_{i=1}^n m_i^2 - (\sum_{i=1}^n m_i)^2) \cdot (n \sum_{i=1}^n s_i^2 - (\sum_{i=1}^n s_i)^2)}} \right)^2 \quad (\text{Ecuación 4})$$

Dónde:

m_i = Valor medido de la temperatura.

s_i = Valor simulado de la temperatura.

\bar{m} = Valor medio de la temperatura medido.

n = El número de puntos de datos medidos.

El modelo se validó utilizando promedios horarios y diarios calculados a partir de los datos de los dos años monitorizados. Así, los índices de estimación del error se han calculado a escala horaria y diaria.

3.6 TRANSFORMACIÓN DE LOS DATOS METEOROLÓGICOS

Una vez desarrollado y validado el modelo de simulación energética de la bodega y siguiendo los objetivos propuestos en esta tesis, se precisa de un procedimiento para la modificación de los datos climatológicos exteriores para las condiciones de un escenario de cambio climático.

En su Informe Especial sobre Escenarios de Emisiones (IE-EE), el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) postula cuatro posibles escenarios (A1, A2, B1 y B2) basados en las emisiones futuras de gases de efecto invernadero (GEI) (Nakicenovic and Swart, 2000).

Para evaluar los efectos del cambio climático, es necesario disponer de un modelo de predicción de las condiciones meteorológicas futuras. Para ello se ha utilizado una herramienta informática basada en Excel llamada "The climate change world weather generator" (CCWorldWeatherGen), en su versión 1.9, desarrollada en el año 2012 por el grupo de investigación de energía sostenible de la facultad de Energía y Medio ambiente de la Universidad de Southampton en Reino Unido (Jentsch et al., 2017).

Esta herramienta se basa en la metodología de morfismo (Belcher et al., 2005) que permite transformar archivos de datos meteorológicos de EnergyPlus (EPW) en EPW modificados para un escenario de cambio climático para tres intervalos de tiempo: 2020, 2050 y 2080, según las predicciones del Modelo de Circulación General "Hadley Center Climate" (HadCM3) para un escenario de emisiones medias-altas (A2) (Jentsch et al., 2013).

A este respecto, cabe señalar que Touhami et al. (2015), en su estudio sobre el impacto del cambio climático en un acuífero situado en una zona semiárida del sureste español, estudiaron los tres modelos de circulación general más utilizados en la región europea según los datos del "Data Distribution Centre" (DDC) del IPCC (2021) llegando a la conclusión que HadCM3 era el que mejor representaba las condiciones climáticas (datos históricos y datos futuros) en el lugar de estudio.

Las series climáticas históricas de temperatura de la estación climatológica de Sanlúcar (de 2004 a 2011, excepto 2010), junto con dos años de datos monitorizados en el exterior de la bodega, fueron utilizadas para disponer de un conjunto de datos de entrenamiento suficientemente amplio. Como resultado se analizaron el efecto del cambio climático en el confort interior basándose en 9 años diferentes (9 archivos climatológicos distintos).

4 RESULTADOS

4.1 INTRODUCCIÓN

Una vez seleccionadas y caracterizadas las bodegas a estudio, propuesto y desarrollado el plan de monitorización y desarrollado el modelo de simulación energético, en los siguientes apartados se desarrollan los resultados obtenidos ordenados según los objetivos planteados en esta tesis siguiendo la metodología propuesta anteriormente:

1. Caracterizar el ambiente higrotérmico interior en las bodegas monitorizadas a partir del análisis estadístico de los datos obtenidos.
2. Comprobar si en ellas se cumplen las condiciones de confort térmico propuestos por los autores en la bibliografía, y definir nuevos intervalos de confort para la crianza biológica de vinos de Jerez basados en los resultados obtenidos de bodegas de gran prestigio.
3. Validar el modelo de simulación mediante protocolos de “medición y verificación”.
4. Evaluar el impacto futuro sobre el desempeño de las bodegas Catedral en un escenario de cambio climático a partir del modelo de simulación desarrollado.

4.2 ANÁLISIS HIGROTÉRMICO DEL CONJUNTO DE LAS BODEGAS

En el anexo II (CARACTERIZACIÓN HIGROTÉRMICA DE LAS BODEGAS ANALIZADAS), se desarrolla el análisis del comportamiento higrotérmico de cada una de las bodegas monitorizadas por separado, caracterizando la evolución anual de su ambiente higrotérmico interior, siguiendo el diseño descrito en la metodología (comportamiento global de temperatura y humedad relativa, diagramas psicométricos, estabilidad, estratificación, uniformidad horizontal y amortiguamiento). En la mayoría de los casos los resultados se refieren al volumen de aire ocupado por las botas (zona de crianza). En el análisis de estratificación también se incluyen análisis de toda la altura de la bodega, o al menos de la altura alcanzado con los sensores, en cada caso. En el estudio de la estabilidad horizontal, los análisis se focalizan en una altura intermedia de la zona de crianza (1,8 m).

No obstante, es necesario recalcar en este punto que no es objeto de esta tesis evaluar el funcionamiento o el desempeño de las características constructivas de cada una de las bodegas, ni mucho menos compararlas con objeto de emitir juicios de valor o caer en la soberbia de pretender concluir en cuál de ellas se observan mejores condiciones para la crianza biológica de vino de Jerez en base a los resultados analizados, ya que eso supondría entrar en una peligrosa simplificación sin tener en cuenta otras variables que sólo pueden ser analizados por enólogos profesionales. Por esa razón, el objetivo que se ha planteado en esta tesis es, a

partir de los datos recopilados en su conjunto, suponiendo que en todas las bodegas analizadas se obtiene productos de muy alta calidad, a tenor de los resultados obtenidos por los diferentes vinos allí producidos, analizar y sintetizar los resultados para el conjunto de todas las bodegas con objeto de poder obtener conclusiones ponderadas que puedan orientar en el futuro a otros investigadores o empresas bodegueras en la toma de decisiones.

Por este motivo, los siguientes apartados se desarrollan según la metodología propuesta, pero para el conjunto global de las bodegas:

- a) Comportamiento global (temperatura y humedad relativa)
- b) Diagrama psicrométrico
- c) Estabilidad
- d) Uniformidad

4.2.1 COMPORTAMIENTO GLOBAL HIGROTÉRMICO

El histograma de frecuencias muestra importantes variaciones de temperatura a lo largo del año. Durante el verano, la temperatura interior se mantuvo entre 21 °C y 31 °C y durante el invierno, entre 6 °C y 16 °C (Figura 30). Cabe destacar que fuera de estas estaciones la dispersión mensual fue mucho mayor pero siempre dentro de estos intervalos. Durante el verano y el invierno la temperatura se concentró en torno a valores que alcanzaban frecuencias cercanas al 30-35%: $11\text{ °C} \leq T < 12\text{ °C}$ en enero, $12\text{ °C} \leq T < 13\text{ °C}$ en febrero, $24\text{ °C} \leq T < 25\text{ °C}$ en agosto, etc. Por el contrario, como ya se ha mencionado, la primavera y el otoño fueron periodos de transición, con una mayor dispersión y frecuencias máximas más bajas.

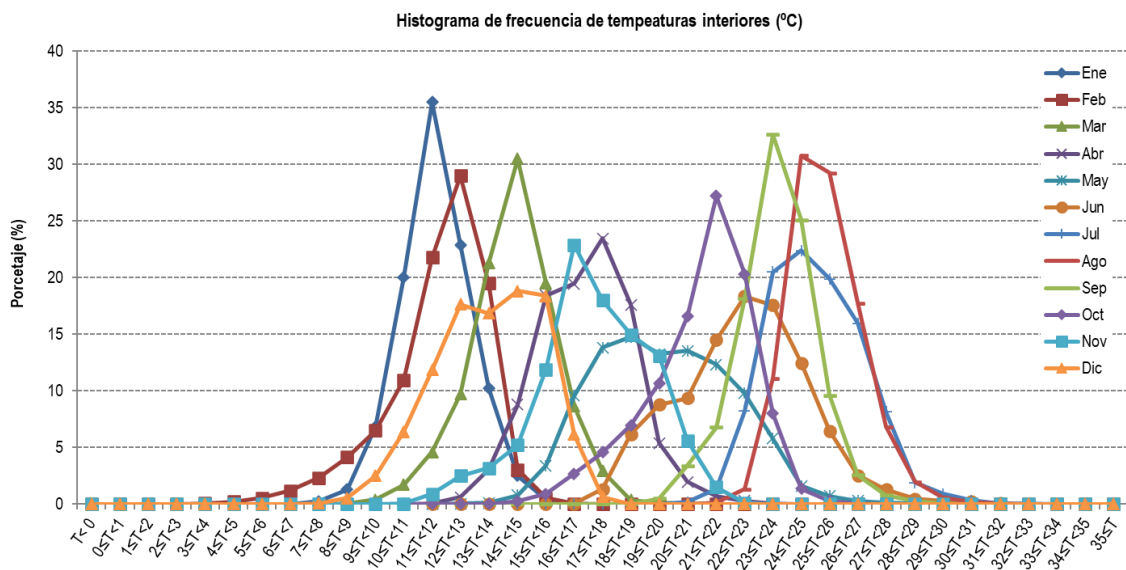


Figura 30. Histograma de frecuencias de la temperatura del aire interior en la zona de crianza.

Las diferencias de humedad relativa entre meses fueron mucho menores que en el caso de la temperatura (Figura 31). El 84% del año la humedad relativa se mantuvo entre el 60% h.r. y el 90% h.r., lo que parece ser consecuencia de la humedad relativa exterior y de la efectividad de ciertas estrategias generalizadas para su control como el riego del albero.

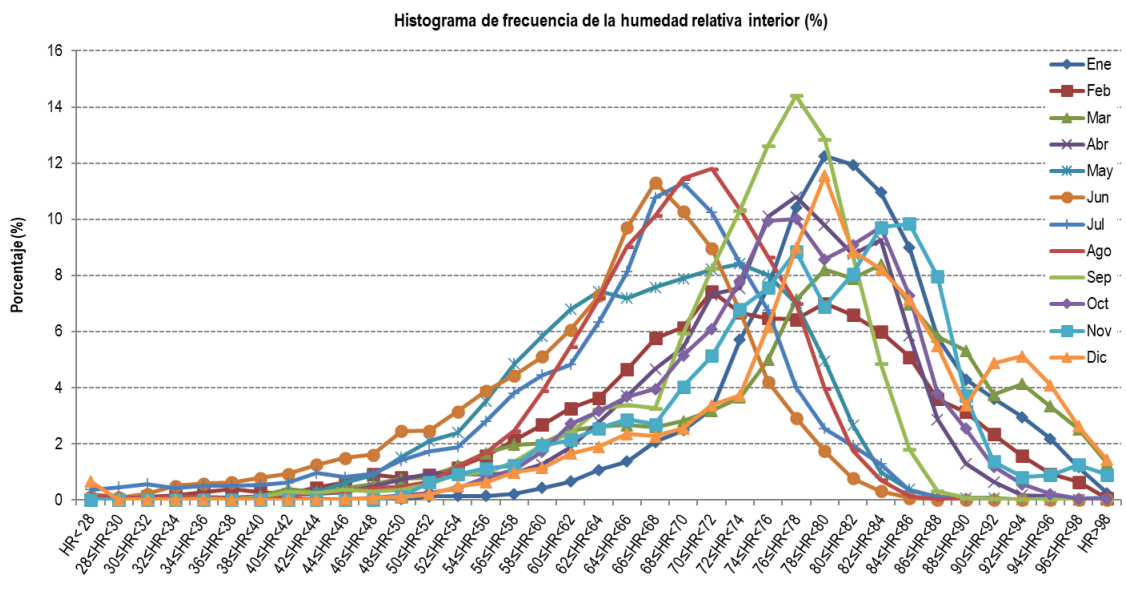


Figura 31. Histograma de frecuencias de la humedad relativa del aire interior en la zona de crianza.

Durante los meses de verano, la humedad relativa fue inferior a la del resto del año, con valores inferiores al 85% h.r. y con una frecuencia máxima cercana al 70% h.r. El resto de los

meses, la humedad osciló entre el 50% h.r. y el 100% h.r., con una frecuencia máxima que se situó habitualmente entre el 75% h.r. y el 85% h.r.

La dispersión mensual fue mucho mayor que en el caso de la temperatura. Todos los meses, la diferencia entre los valores máximos y mínimos registrados superaba el 50% h.r. El intervalo mensual con la mayor frecuencia apenas representó el 10% de los valores totales.

4.2.2 DIAGRAMA PSICOMÉTRICO

El diagrama psicrométrico de la Figura 32 resume la evolución de la temperatura y la humedad relativa en la zona de crianza para el conjunto de las bodegas. Esta figura muestra la evolución del ambiente higrotérmico real a lo largo del año, las variaciones entre las diferentes estaciones y permite identificar los meses con mayor riesgo para la crianza del vino.

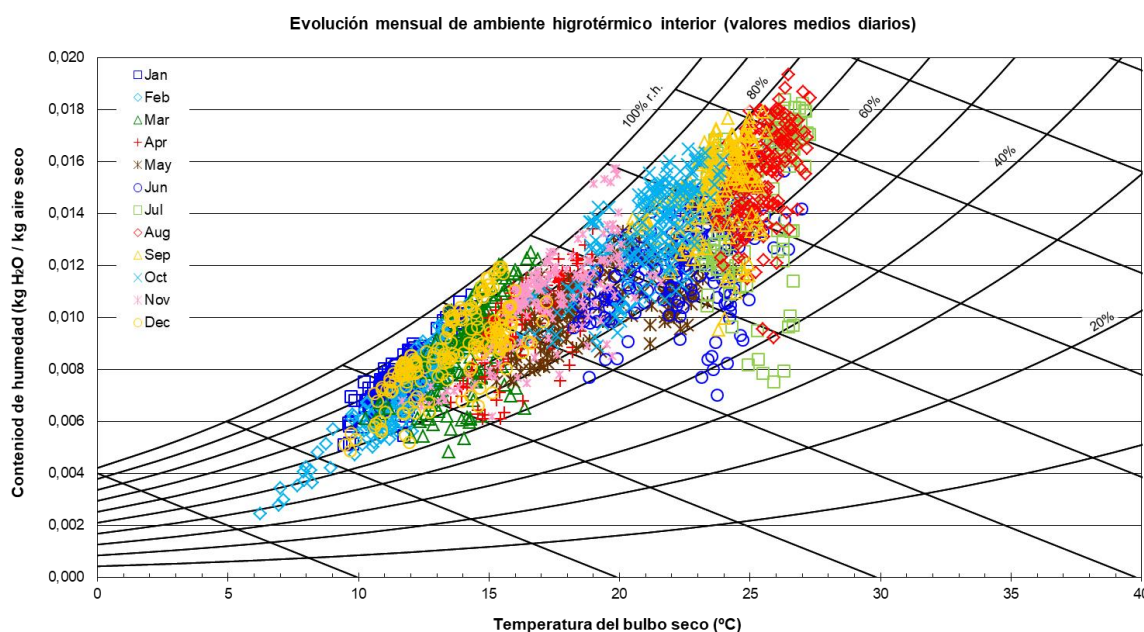


Figura 32. Evolución mensual del ambiente higrotérmico interior en el conjunto de las bodegas (medias diarias de los sensores T-h.r. en la zona de crianza).

De esta manera, los meses de julio y agosto parecen ser los de mayor riesgo de pérdidas por evaporación, combinando muchos días de altas temperaturas y baja humedad relativa. Durante estos meses, el enfriamiento evaporativo mediante riego puede ser una práctica interesante para reducir las pérdidas de vino y controlar el aumento de la temperatura. Por el

contrario, los meses de invierno combinaron las temperaturas más bajas del año con valores elevados de humedad relativa.

4.2.3 ESTABILIDAD

El estudio de la estabilidad (rapidez con que varían las condiciones en un mismo punto) mostró variaciones de temperatura similares a lo largo del año, con una media anual de $2,0 \pm 0,8$ °C por día (Figura 33) y $0,14 \pm 0,12$ °C (Figura 34) por hora. Los meses de mayor temperatura exterior fueron los de la menor estabilidad interna, con variaciones por encima de los 2 °C, siguiendo la tendencia de la variación externa.

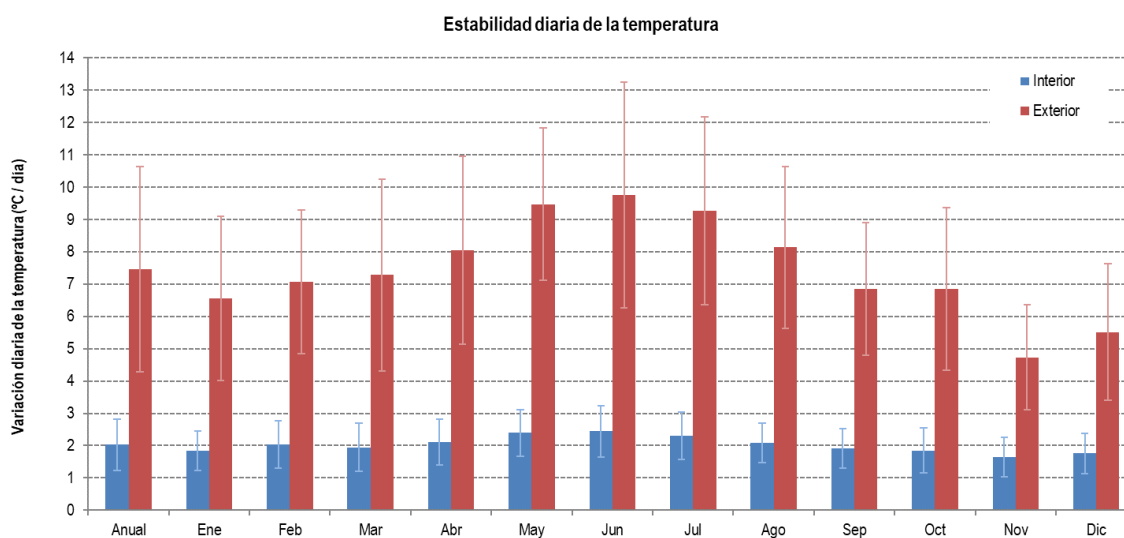


Figura 33. Media mensual de la variación diaria de la temperatura (°C/día) en la zona crianza y en el exterior del conjunto de las bodegas.

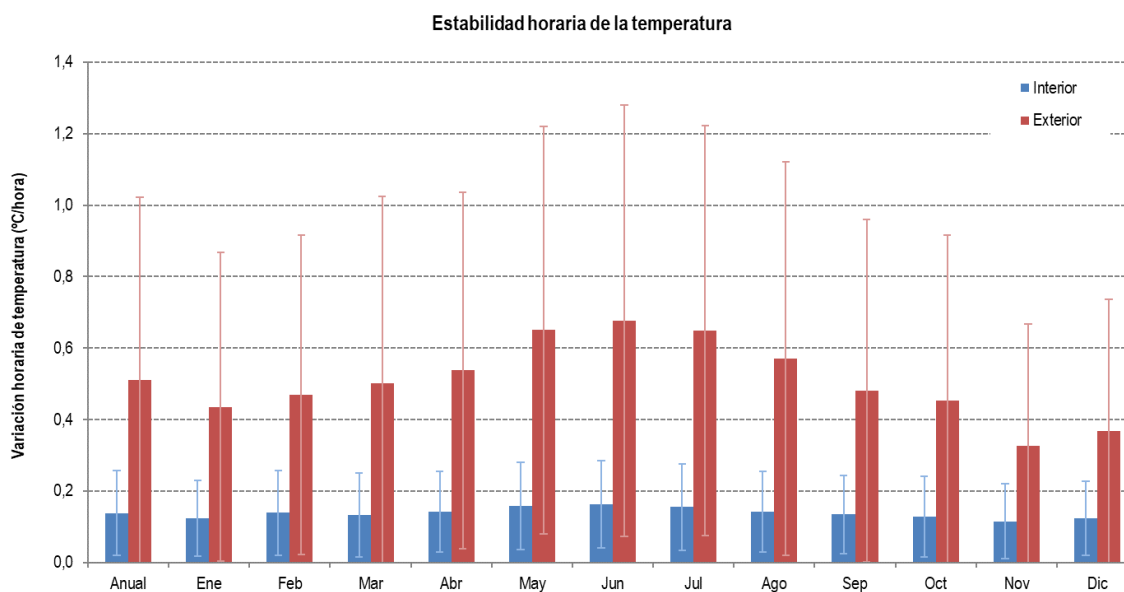


Figura 34. *Media mensual de la variación horaria de la temperatura (°C/h) en la zona crianza y en el exterior del conjunto de las bodegas.*

Las características de la construcción de las bodegas Catedral las hace ineficaces para reducir las variaciones mensuales de temperatura, manteniendo una temperatura media mensual y anual prácticamente igual en el interior y el exterior, con diferencias máximas de 2 °C en el mes de julio, en el mejor de los casos. Sin embargo, a escala diaria y horaria, consiguen mantener un ambiente mucho más estable, en este caso la estabilidad interior fue mucho mayor que la exterior, donde se alcanzaban en verano variaciones medias diarias de casi 10 °C. El gran volumen de aire interior, sumado a la inercia térmica de las botas, podría explicar este comportamiento. Por lo tanto, la levadura de flor no está sometida a los bruscos cambios exteriores, sino que evolucionó a lo largo del año de una forma más progresiva en un entorno más estable.

Así, la crianza biológica de los vinos Generosos se produce en un entorno menos estable que la crianza del vino tinto. Las condiciones interiores varían más rápidamente que en las bodegas de vino tinto, donde la variación media diaria oscila entre 0,1 °C/día en bodegas subterráneas y hasta 1 °C/día en bodegas elevadas con aire acondicionado (Cañas et al., 2012).

La estabilidad de la humedad relativa tuvo mayores diferencias que la temperatura, con una media anual de $11 \pm 7\%$ h.r. por día (Figura 35) y $1,0 \pm 1,1\%$ h.r. por hora (Figura 36). En general, las mayores variaciones de humedad relativa se produjeron en los meses de verano. Tal y como se puso de manifiesto en la introducción de esta tesis, las variaciones bruscas de la humedad relativas no parecen ser un factor que penalice el desarrollo del velo de flor, sino que

más bien pueden estar relacionadas con las mermas de producto por evapotranspiración. Sin embargo, las variaciones diarias fueron tres veces inferiores a las del exterior, lo que pone de relieve la eficacia de las bodegas a la hora de proporcionar un entorno más estable para la crianza biológica.

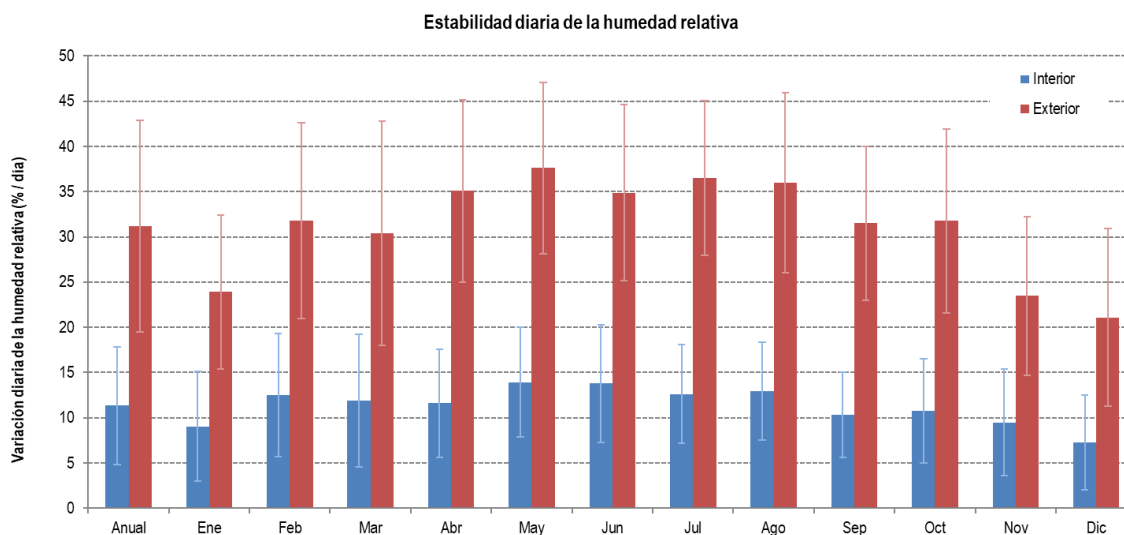


Figura 35. Media mensual de la variación diaria de la humedad relativa (% h.r./día) en la zona de crianza y en el exterior para el conjunto de las bodegas.

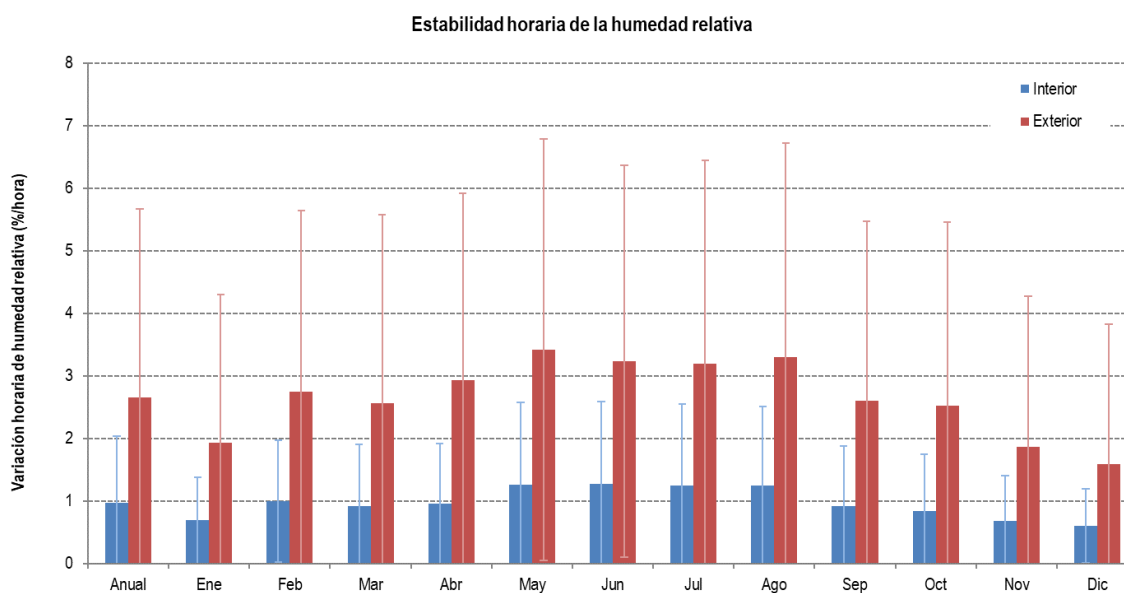


Figura 36. Media mensual de la variación horaria de la humedad relativa (% h.r./h) en la zona de crianza y en el exterior para el conjunto de las bodegas.

4.2.4 UNIFORMIDAD

El análisis de la uniformidad (diferencias en toda la bodega al mismo tiempo) mostró que las diferencias en altura eran mucho mayores que las encontradas en el plano horizontal. En el caso de la uniformidad de la temperatura, la media anual en el plano vertical era casi el doble que en el plano horizontal, con una desviación típica mucho mayor (Figura 37). En humedad relativa, las diferencias fueron aún mayores (Figura 38). En los meses de verano, estas diferencias aumentaron, siendo tres veces mayores en el caso de la temperatura y cuatro veces mayores en el caso de la humedad relativa.



Figura 37. Media mensual de la uniformidad de la temperatura (vertical y horizontal).

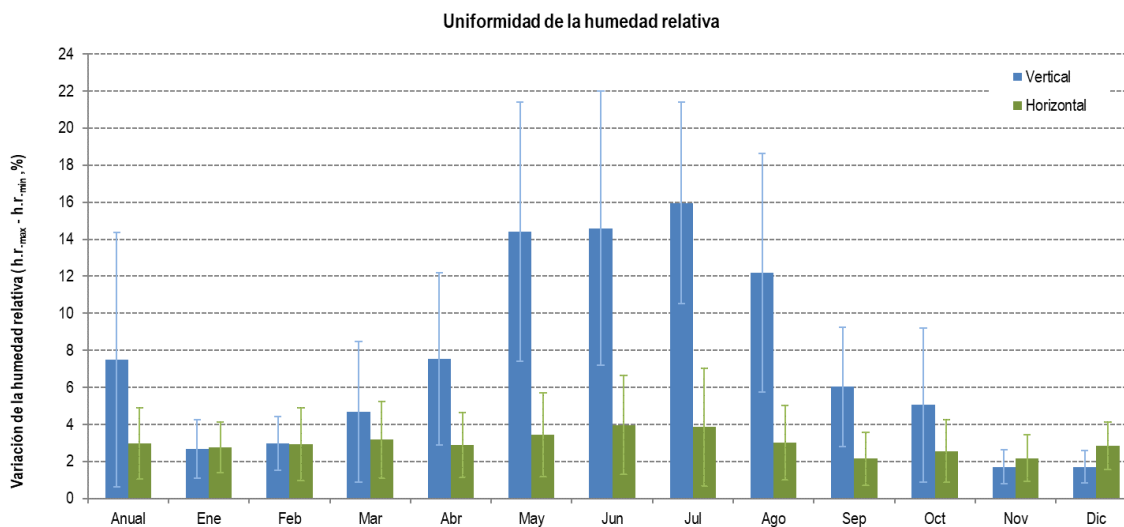


Figura 38. Media mensual de la uniformidad de la humedad relativa (vertical y horizontal).

Por lo tanto, la toma de decisión de los bodegueros de ubicar los diferentes productos a diferentes alturas parece ser un factor más decisivo que la decisión de ubicarlas en distintas zonas de la bodega en busca de un desarrollo diferenciado según la calidad del producto.

Las bodegas eran bastante uniformes en el plano horizontal, considerando la misma altura. Las diferencias de temperatura entre los distintos sensores colocados en ellas solían ser de unas décimas de grado, siendo la media de la diferencia entre el punto de mayor y menor temperatura de 0,6 °C, tan sólo el doble de la precisión de los sensores utilizados.

Del mismo modo, la media de la diferencia máxima de humedad relativa entre los sensores de la bodega era de alrededor del 3% h.r., cerca de la precisión de los sensores utilizados.

Por el contrario, la estratificación vertical fue notable en primavera y verano, con valores próximos de 2 °C (0,5 °C/m) (Figura 37) y 12% h.r. (3% h.r./m) (Figura 38) de media mensual entre el suelo y la altura superior de las botas en la zona de crianza. La zona próxima al suelo se mantuvo siempre a una temperatura inferior y mayor humedad relativa que la zona superior.

Esta diferencia se incrementaba notablemente al considerar la evolución a lo largo de cada día, con picos de estratificación por la tarde que superaron 1 °C por metro lineal de media mensual en los meses más calurosos (Figura 39). Como resultado, las botas de los niveles superiores estuvieron sometidos a temperaturas más altas y menor humedad relativa que las del nivel inferior durante varios meses al año. Estas diferencias justifican la utilidad del sistema tradicional de "criaderas y soleras", en el que el vino de mayor antigüedad y valor se sitúa en el nivel inferior, sometido a menor temperatura (hasta 4 °C de diferencia en las horas más calurosas) y mayor humedad relativa, que garantiza menores pérdidas de producto por evapotranspiración.

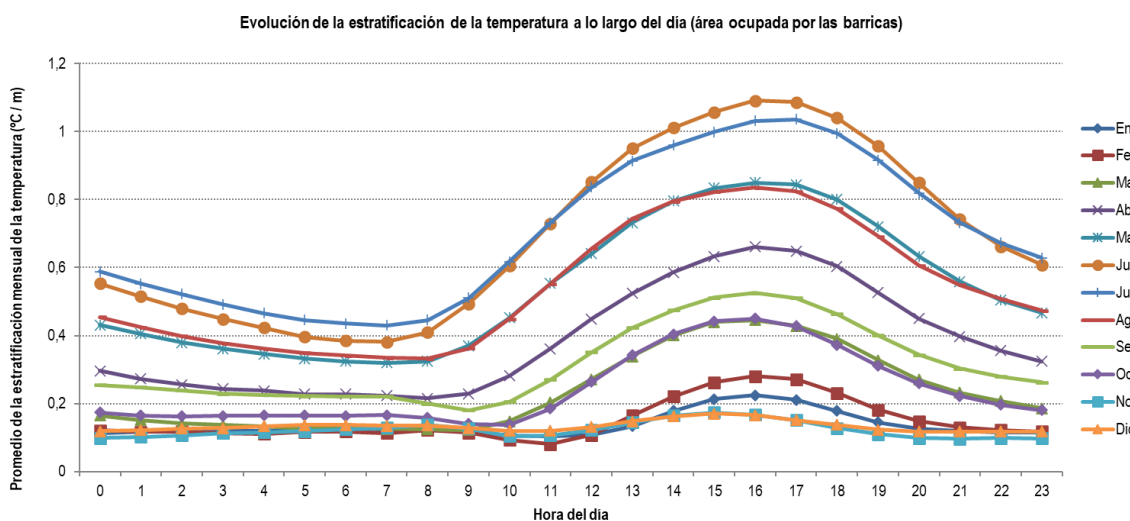


Figura 39. *Estratificación media (°C/m) a lo largo del día en la zona crianza para el conjunto de las bodegas.*

Al descender la temperatura exterior, se redujo la estratificación debido al rápido enfriamiento del aire en la zona superior por el efecto de la ventilación existente. En este sentido, la estrategia tradicional constructiva de instalar las aperturas de ventilación por encima del nivel de las botas, aun quedando abiertas de manera continua, parece tener un doble efecto, por un lado, favorece la estratificación en las peores horas de las tardes de verano y por otro, favorece la rápida oxigenación de las bodegas con la brisa a menor temperatura en las horas nocturnas del día.

Por lo tanto, considerando cada día, la estratificación más baja se produjo durante las últimas horas de la tarde (Figura 39). A lo largo del año, la estratificación más baja se produjo en invierno, con valores medios mensuales de 0,5 °C (Figura 37) y 2% h.r. (Figura 38). Por lo tanto, en los meses de invierno, la altura de las barricas no debería ser un factor a tener en cuenta en el proceso de envejecimiento.

4.3 INTERVALOS DE CONFORT

El ambiente interior no solía mantenerse dentro de los rangos óptimos de crianza mencionados por diferentes autores (Figura 40). En verano, la temperatura registrada en las bodegas superó con creces los valores óptimos recomendados por la mayoría de los autores. La mayor similitud con la realidad se produjo en los meses de primavera y otoño, aunque en la mayoría de los casos no alcanzó el 50% del tiempo. Por tanto, el porcentaje anual dentro del rango descrito por la mayoría de los autores fue inferior al 30%.

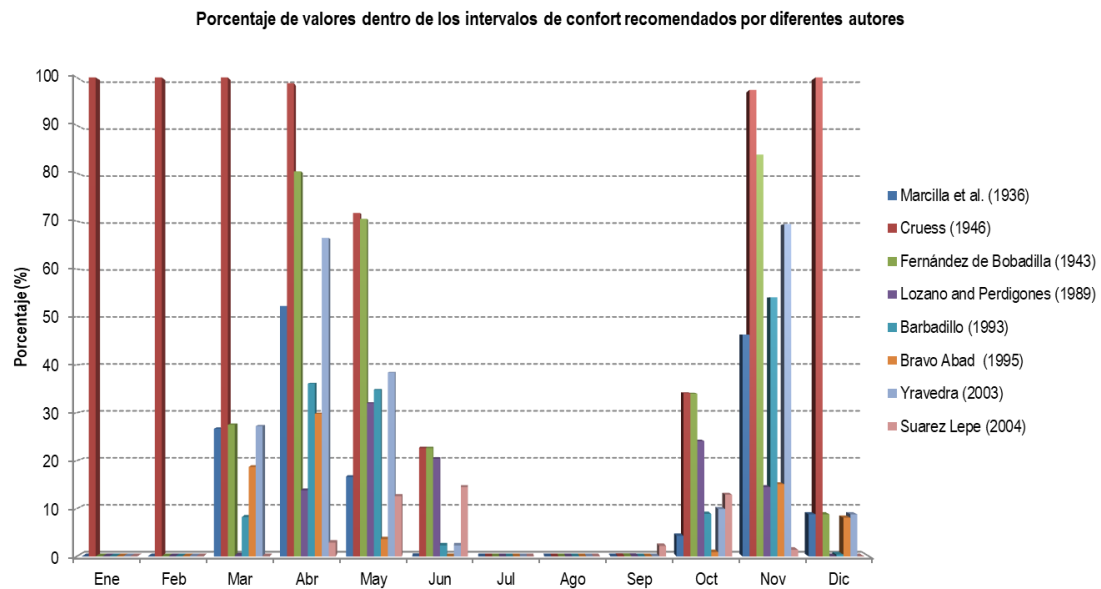


Figura 40. *Porcentaje de valores controlados dentro de los intervalos óptimos de confort descritos por distintos autores.*

Por el contrario, hubo mucha proximidad a la realidad cuando se trata de los rangos límite. El porcentaje aumentó significativamente, con una media anual entre el 70% y el 99%. Los intervalos citados en la bibliografía reflejan la realidad de las épocas más activas de desarrollo del velo, alcanzando el 100% en abril, mayo, octubre y noviembre. Sin embargo, la mayoría de los autores son demasiado restrictivos en los meses de verano e invierno, dejando los valores reales fuera de los límites (Figura 41).

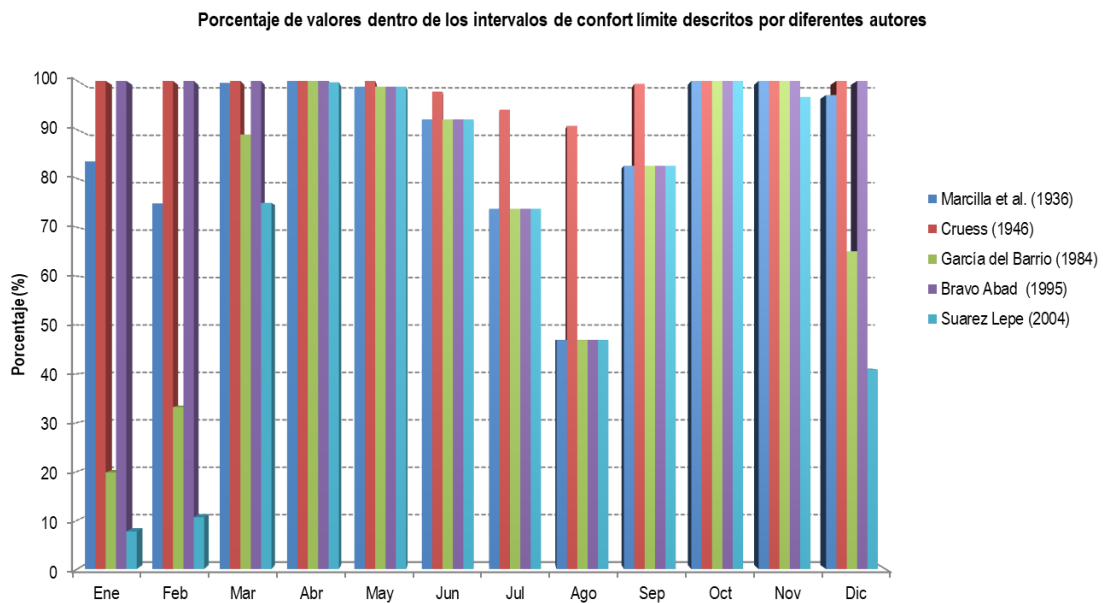


Figura 41. *Porcentaje de valores controlados dentro de los límites de confort descritos por distintos autores.*

Teniendo en cuenta las diferencias encontradas entre la bibliografía existente y la realidad, en la Figura 42 se propone un diagrama psicrométrico de referencia. Este diagrama representa la evolución mensual del ambiente higrotérmico que garantiza un buen desarrollo del velo de flor. El diagrama se refiere a los valores medios diarios de la zona de crianza. Las zonas de confort serían más amplias si se tuvieran en cuenta las variaciones existentes dentro de las bodegas para la uniformidad y la estabilidad. El diagrama sólo refleja zonas contrastadas de crianza de vinos de Jerez basadas en los valores reales de bodegas de gran prestigio, lo que no implica que fuera de estas zonas no se pueda realizar la crianza.

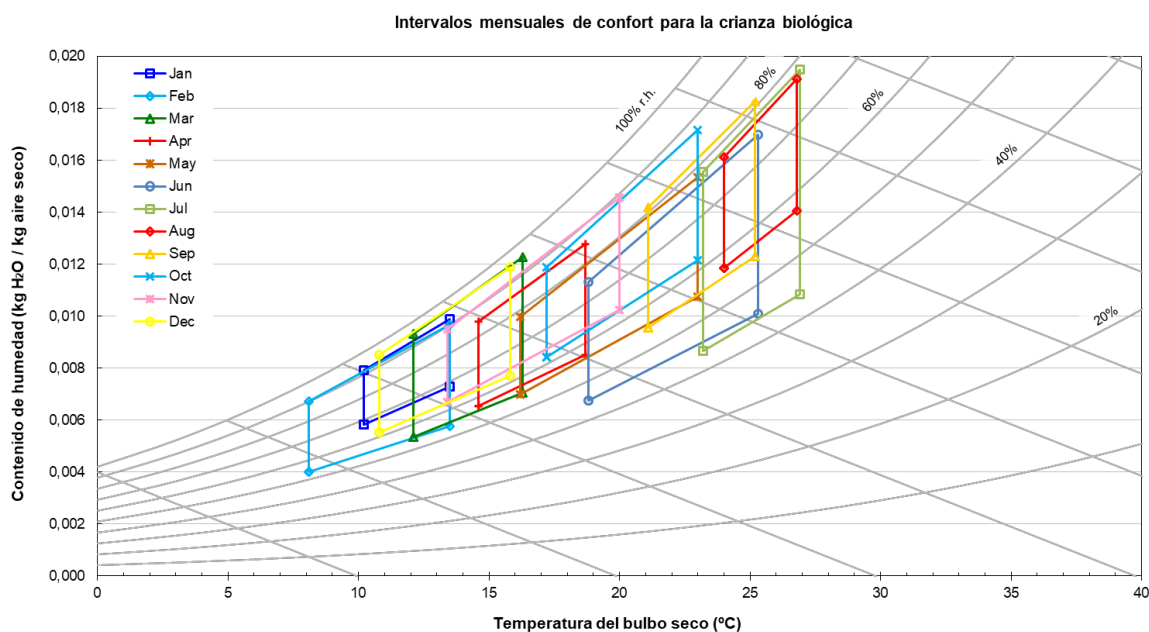


Figura 42. Intervalos mensuales de confort contrastados para la crianza biológica del vino de Jerez.

Para el cálculo de los límites mensuales recomendados, se ha decidido eliminar los valores extremos, utilizando datos comprendidos entre el percentil 5 y el percentil 95. En el Tabla 5 se resumen los límites para cada periodo.

Tabla 5

Intervalos mensuales de confort contrastados que aseguran la adecuada crianza del vino de Jerez

	Temperatura (°C)		Humedad relativa (%h.r.)	
	Límite inferior	Límite superior	Límite inferior	Límite superior
Ene	10,2	13,5	68	92
Feb	8,1	13,5	54	90
Mar	12,1	16,3	55	95
Abr	14,6	18,7	57	85
May	16,2	23,0	55	78
Jun	18,8	25,3	45	75
Jul	23,2	26,9	44	78
Ago	24,0	26,8	57	77
Sep	21,1	25,2	55	81
Oct	17,2	23,0	62	87
Nov	13,4	20,0	63	89
Dic	10,8	15,8	62	95

4.4 VALIDACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN

El modelo de simulación energética obtenido utilizando el software DesignBuilder, a partir de los dos años completos monitorizados de la bodega Hidalgo la Gitana, fueron validados en base a las recomendaciones propuestas por la FEMP (Webster et al., 2015) y ASHRAE (2014). En la Tabla 6 se muestran los valores obtenidos de NMBE, CV y R² para los resultados diarios y horarios.

Tabla 6

Índices de validación del modelo desarrollado, calculados con datos monitorizados a una escala diaria (izquierda) y a una escala horaria (derecha).

Indices	Escala diaria			Escala horaria		
	Año 1	Año 2	Tolerancia	Año 1	Año 2	Tolerancia
NMBE	1.02 %	0.75 %	±5%	1.02 %	0.75 %	±10%
CV (RMSE)	2.77 %	2.41 %	±5%	5.44 %	5.08 %	±30%
R ²	99.16 %	99.36 %	>75%	96.57 %	97.07 %	>75%

Respecto al comportamiento diario, el modelo reproduce con gran precisión la evolución de las temperaturas. Así, el coeficiente de determinación diario obtenido es del 99% en los dos años analizados. Teniendo en cuenta que el valor umbral mínimo recomendado es del 75%, se puede afirmar que el modelo es válido para reproducir la evolución anual a lo largo del año con gran precisión. Como ejemplo gráfico, la Figura 43 muestra la temperatura media diaria en el interior de la bodega comparada con el resultado obtenido por simulación.

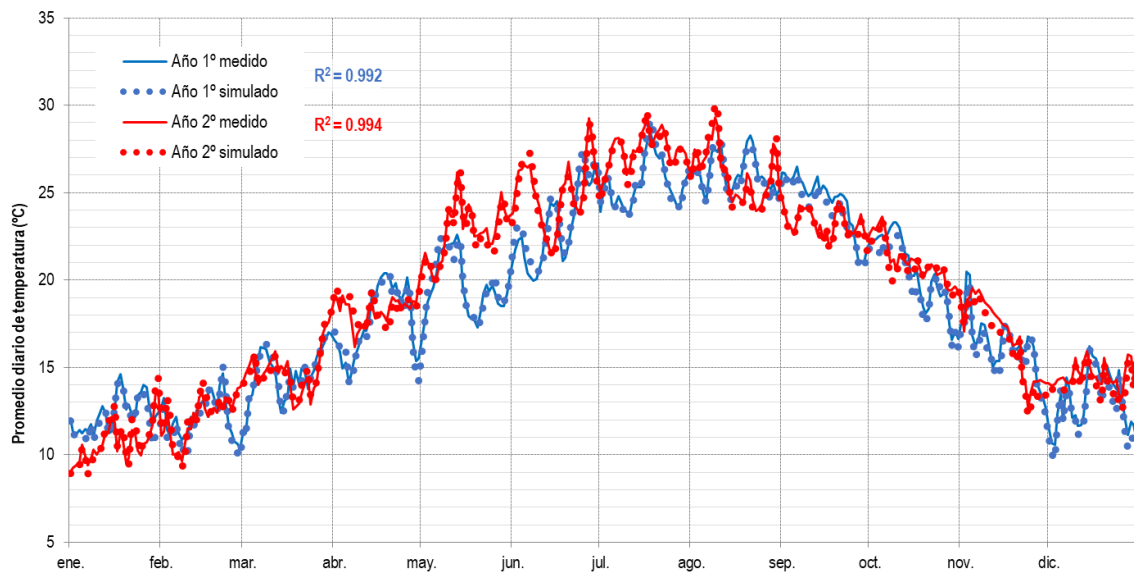
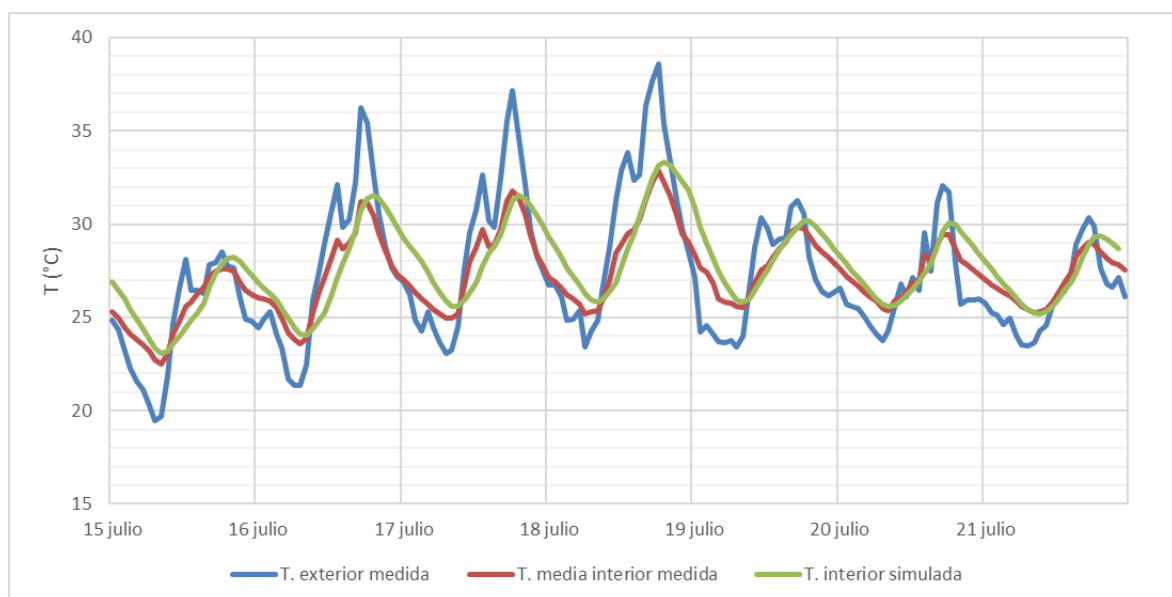


Figura 43. Tendencia de la temperatura media (medida y simulada) en el interior de la bodega a lo largo del año.

En cuanto al comportamiento horario, el modelo también reproduce con alta precisión las variaciones de temperatura a lo largo de cada día, a pesar de la fuerte ventilación de la bodega. A modo de ejemplo, la Figura 44 muestra la evolución diaria de la temperatura de las semanas más cálida y más fría de un año. El modelo tiene un coeficiente de determinación horaria del 97%. Como en el caso anterior, teniendo en cuenta que el mínimo recomendado es del 75%, se puede afirmar que el modelo es válido a escala horaria.



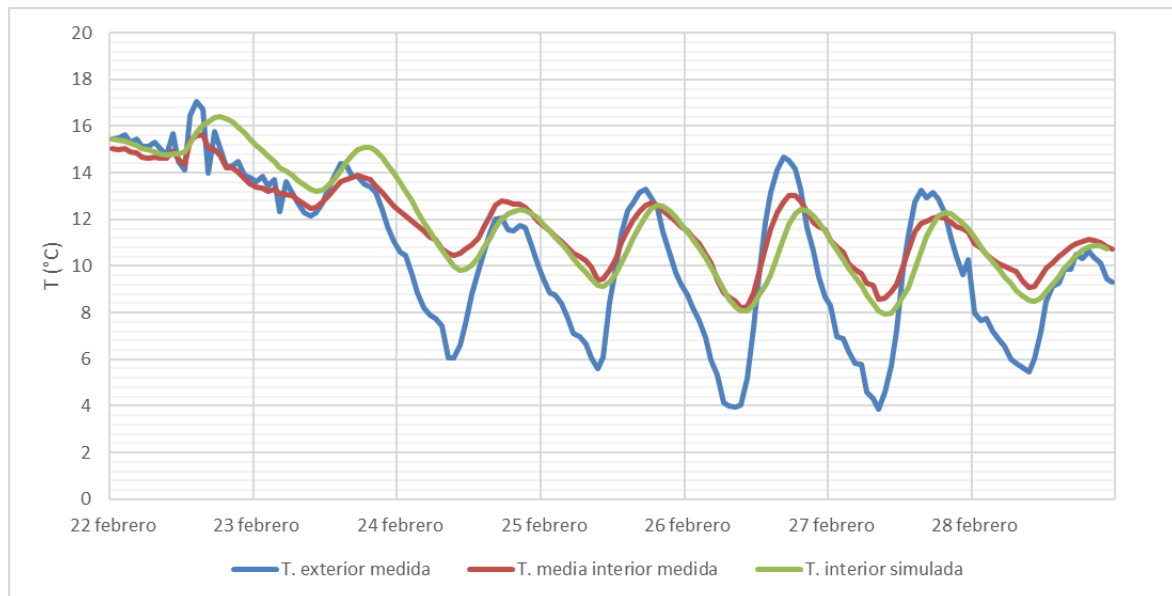


Figura 44. Tendencia horaria de la temperatura (medida y simulada) en la semana más calurosa (arriba) y en la semana más fría (abajo) del año.

La comparación de los datos de temperatura exterior monitorizados con las series históricas del observatorio climatológico de Sanlúcar de Barrameda demuestra la representatividad de los años utilizados para la validación (Figura 45).

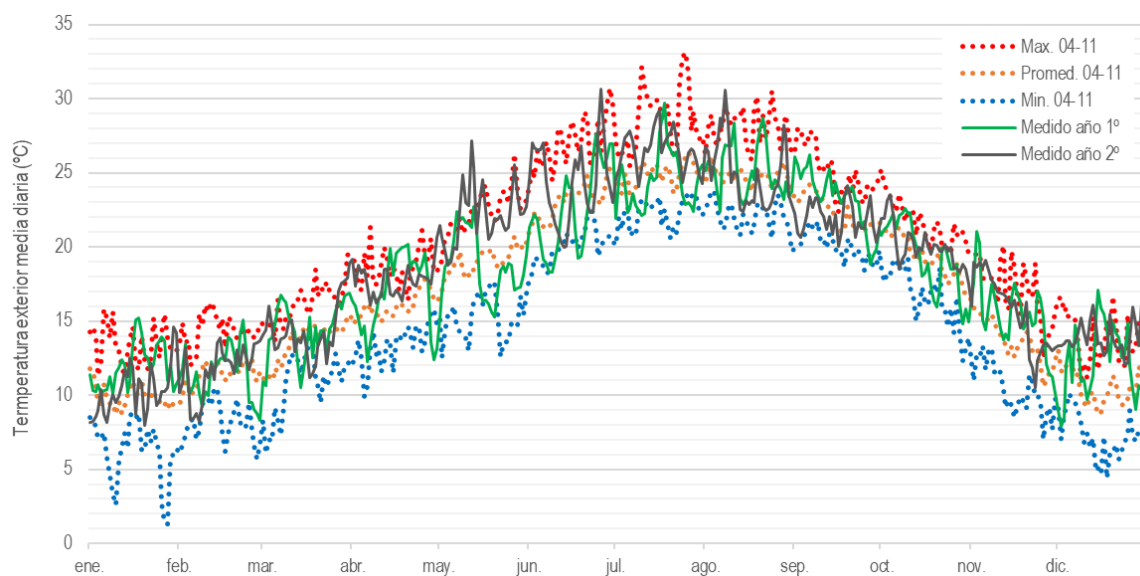


Figura 45. Valores representativos de la serie histórica de 2004 a 2011 frente a los dos años monitorizados de temperatura exterior.

La mayor parte del año, los valores monitorizados están dentro del rango de las series históricas. La temperatura media anual es de 18 °C y 18,7 °C para los años 1 y 2, respectivamente, cercanos al valor medio de la serie histórica (17,4 °C).

4.5 ANÁLISIS DE LAS CONDICIONES AMBIENTALES EN UN ESCENARIO DE CAMBIO CLIMÁTICO

Los archivos de datos EPW (que incluyen las series históricas y los dos años monitorizados) se transformaron utilizando el software "CCWorldWeatherGen", de acuerdo con las predicciones de HadCM3, para los periodos temporales 2050 (CC2050) y 2080 (CC2080) (Figura 46). Para el escenario CC2050, considerando la media de las series históricas, se observa un aumento de la temperatura media anual de 2,3 °C, con un aumento de la temperatura máxima de 3,6 °C en verano. Considerando los valores máximos de la serie histórica, la temperatura podría aumentar más de 4 °C en los veranos de los años más cálidos.

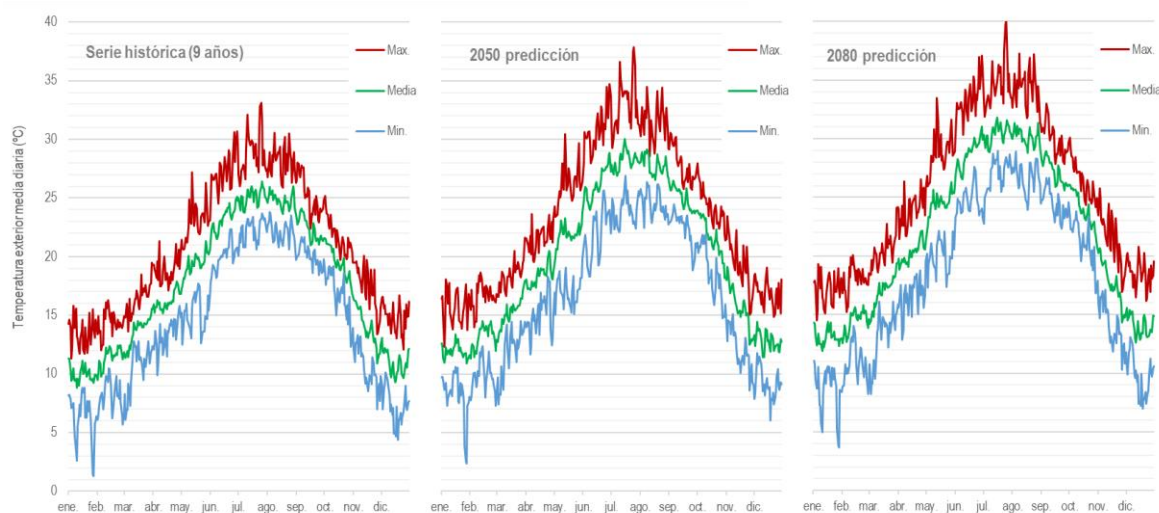


Figura 46. Efecto del cambio climático en la temperatura exterior (promedio diario) según la predicción HadCM3 para 2050 y 2080 (CCWorldWeatherGen).

Para el escenario CC2080, la predicción es aún peor. Considerando la media de los 9 años, la temperatura media anual aumentaría en 4,2 °C y la temperatura máxima en verano podría aumentar en 5,4 °C. Considerando los valores máximos de la serie histórica, la temperatura podría aumentar 7 °C en los veranos más calurosos.

En este sentido, cabe destacar que otros autores obtienen predicciones similares para sus estudios en diferentes regiones de España. Así Ribalaygua et al. (2013) analizaron cuatro

modelos climáticos bajo diferentes escenarios futuros de emisiones sobre la región española de Aragón y predijeron, para mediados de siglo, un aumento de la temperatura media de entre 1,5 y 2,5 °C. Portero Serrano et al.(2020) analizaron 14 proyecciones climáticas dinámicas regionalizadas diferentes y predijeron un aumento de más de 5 °C, para finales del siglo XXI, en el suroeste de España. Por lo tanto, la predicción de la temperatura media realizada por la herramienta CCWorldWeatherGen parece estar respaldada por otros trabajos científicos en la zona de estudio.

Los ficheros climatológicos (EPW) no sólo predicen el aumento de la temperatura media, sino que también permiten simular variaciones de temperatura horarias y diarias basadas en las que se producen en la actualidad. Este aspecto es fundamental a la hora de estimar correctamente el efecto del cambio climático en las bodegas de Jerez, debido a las grandes variaciones anteriormente descritas como consecuencia de la ventilación. Sin reproducir estos cambios de temperatura, los resultados serían incompletos. Este no es el caso de las bodegas de vino tinto, donde la estabilidad es mucho más pronunciada: las variaciones diarias pueden alcanzar un valor medio de 0,1 °C/día (Cañas et al., 2012).

4.6 IMPACTO DEL DESEMPEÑO DE LA BODEGA EN UN ESCENARIO DE CAMBIO CLIMÁTICO

4.6.1 SITUACIÓN ACTUAL

A partir de los datos de monitorización, se comprueba que la temperatura de la zona de crianza se encuentra dentro de la zona de confort establecida en el apartado 4.3 (INTERVALOS DE CONFORT) en el 93% de los valores medidos cada 15 min. Los cambios bruscos de temperatura debidos a la ventilación hacen que se superen los límites. Sin embargo, estos excesos suelen ser de muy corta duración, por lo que no deberían afectar al velo de flor en el interior de las botas. De este modo, si se tiene en consideración únicamente los valores promedios diarios, la temperatura de la zona de crianza superó el límite de confort en tan solo el 4% de los valores, y en la mayoría de los días sólo en unas décimas de grado. Teniendo en cuenta la inercia térmica del vino y el aislamiento de la propia bota, el vino debería estar dentro del intervalo de confort la práctica totalidad del año. Por tanto, en un escenario actual, se confirma que las bodegas cumplen la función para la que fueron diseñadas, manteniendo la temperatura de la zona de crianza dentro de los límites establecidos.

La temperatura en la zona de crianza obtenida mediante simulación con DesignBuilder utilizando los datos climatológicos de las series históricas de temperatura del observatorio

meteorológico de Sanlúcar de Barrameda, corrobora el comportamiento descrito. Así, la temperatura media de los nueve años simulados se mantiene dentro de la zona de confort durante todo el año (Figura 47).

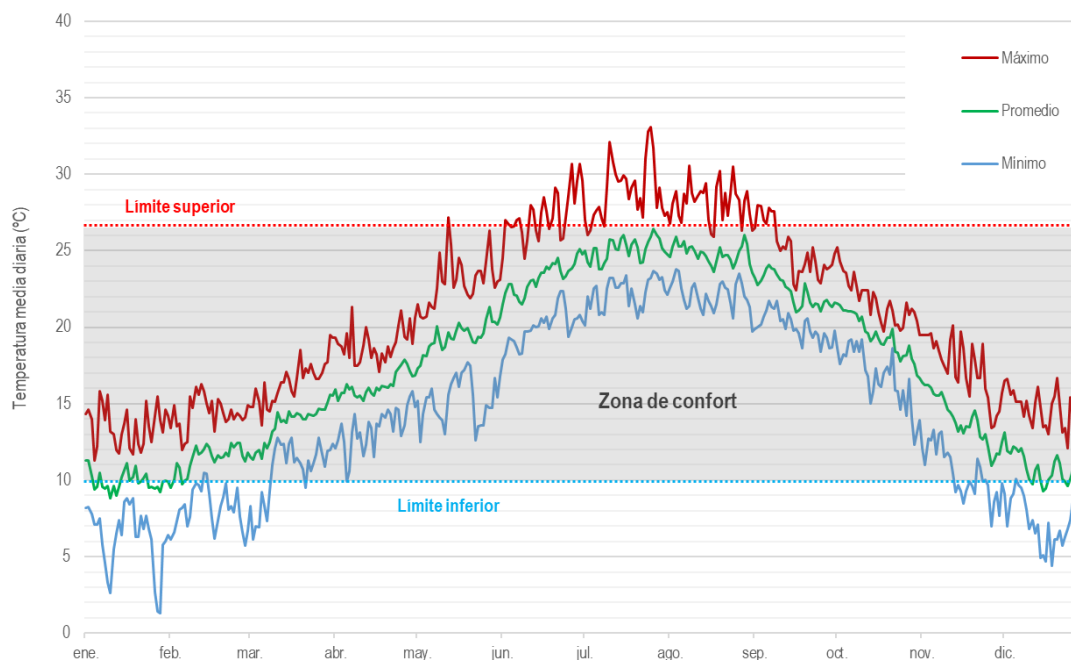


Figura 47. Evolución anual simulada de la temperatura en la zona de crianza para la serie histórica de datos climáticos del observatorio meteorológico de Sanlúcar de Barrameda.

Sólo se superan ligeramente los límites en los años de temperaturas más extremas (valores máximos y mínimos de los 9 años).

4.6.2 PREDICCIÓN FUTURA EN ESCENARIO DE CAMBIO CLIMÁTICO

El programa de simulación energética (EnergyPlus) asume de forma simplificada el espacio total de la zona de simulación. Sin embargo, como se ha explicado anteriormente, existe una diferencia sustancial entre la temperatura media de la bodega y la temperatura de la zona de crianza, debido al fenómeno de estratificación. En este sentido, para los resultados de la simulación de los escenarios “CC2050”, “CC2080” y situación actual, los valores de temperatura media de la zona de envejecimiento se han estimado interpolando la variación porcentual de la estratificación, obtenida de los datos experimentales.

A partir del modelo validado, se ha realizado la simulación de los escenarios de cambio climático utilizando nueve ficheros climatológicos transformados de la serie histórica para 2050

y otros nueve para 2080. Para el escenario CC2050, considerando la media de la serie histórica, el modelo predice que el 19% de los valores estarán fuera de la zona de confort descrita (apartado 4.3), o lo que es lo mismo, la bodega estará fuera de la zona de confort durante un periodo de 68 días (Figura 48). Este periodo se incrementaría hasta los 124 días considerando los valores extremos de la serie histórica. Para el escenario "CC2080", los valores medios estarían fuera de la zona de confort un 27% (98 días). Si los valores umbrales de supervivencia del "velo de flor" propuestos son correctos, tantos días de exceso de temperatura acabarían afectando al velo y provocando su muerte. Esto ocurriría casi continuamente durante el periodo estival (Figura 48).

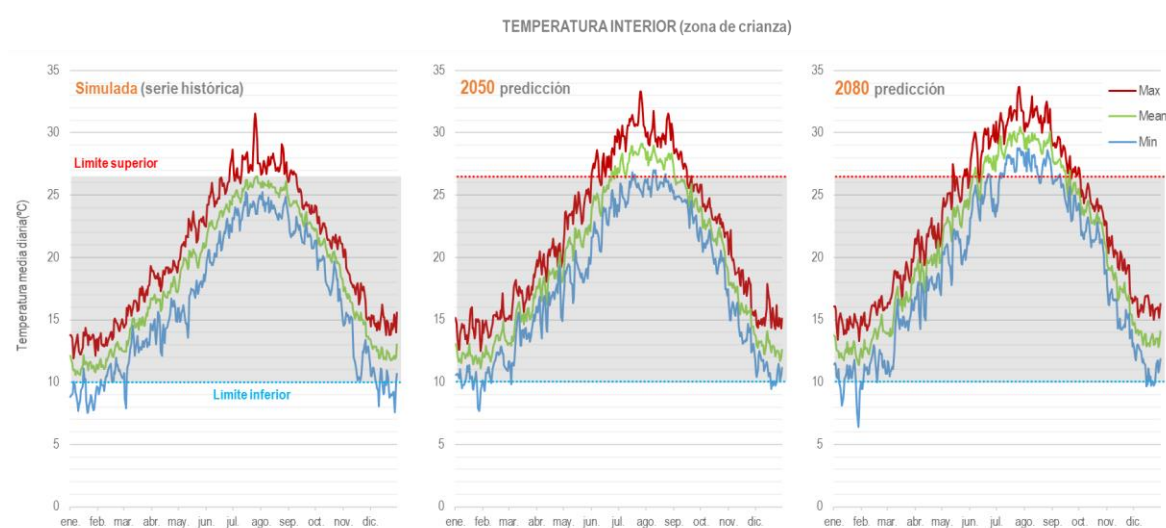


Figura 48. Efecto del cambio climático sobre la temperatura en la zona de crianza, según la predicción HadCM3 para 2050 y 2080 (CCWorldWeatherGen).

Además, durante la primavera y el otoño, cuando la actividad de las levaduras está en su pico (Domecq, 2011), la temperatura media aumentará 1,4 °C y 1,0 °C respectivamente en el escenario CC2050. Con esta predicción, el aumento alcanzará 2,9 °C y 2,2 °C para el escenario CC2080. Por lo tanto, el desarrollo de levaduras también se vería afectado de forma significativa.

De confirmarse las predicciones futuras de cambio climático descritas por organismos con el IPCC, las bodegas Catedral tendrán dificultades para mantener la temperatura de confort en el interior de la zona de crianza, sin modificar los niveles actuales de ventilación natural. La necesidad de refrigerar un gran caudal de aire exterior para mantener los valores de ventilación que requiere el "velo de flor" supondría un coste energético muy elevado, lo que podría impactar en la competitividad y viabilidad del sector. La introducción de modificaciones constructivas o

la incorporación de tecnologías de control ambiental serán aspectos clave a analizar en un futuro próximo.

5 CONCLUSIONES

La presente tesis confirma, con datos experimentales, las conclusiones puestas de manifiesto por los diferentes autores de la bibliografía, sobre cómo las bodegas Catedral son capaces de proporcionar, de forma pasiva, las condiciones ambientales necesarias para la crianza biológica de vinos Generosos, sin necesidad de sistemas de climatización, gracias a las estrategias constructivas aplicadas en estos edificios, fruto de la experiencia bodeguera de la región a lo largo de los siglos.

Se puede concluir, que la inercia térmica y el fenómeno de estratificación son los principales responsables de la capacidad de estos edificios para amortiguar las condiciones ambientales del exterior. Ambos factores están relacionados con las dimensiones de las bodegas, su altura y el volumen de producto almacenado, es decir, que estos factores juegan un papel decisivo en la regulación higrotérmica del ambiente interior. Otra característica que parece ser decisiva, pero que no ha sido objeto de análisis en esta tesis, es la ventilación.

Otros factores, también tienen un impacto decisivo en la calidad del producto y no deben ser menospreciados, como son: el emplazamiento elegido para la bodega, su orientación, la elección de sus elementos constructivos y ciertas operaciones de manejo de las instalaciones como el riego o el control de la ventilación.

Los resultados del análisis de las condiciones higrotérmicas de las bodegas monitorizadas pusieron de manifiesto las peculiaridades de la crianza biológica y las claras diferencias con la crianza del vino tinto como eran:

- Importantes variaciones de temperatura a lo largo del año en el interior de las bodegas con valores límite de entre 5 °C y 31 °C y humedad relativa mantenida habitualmente entre el 50% y el 90%.
- Menor estabilidad debido a la elevada ventilación, con valores promedios anuales de $2,0 \pm 0,8$ °C de temperatura y $11 \pm 7\%$ de humedad relativa al día.
- Una elevada estratificación vertical en primavera y verano con valores promedios de 0,5 °C/m de temperatura y 3%r.h./m de humedad relativa que justifican la utilidad del sistema tradicional de "criaderas y soleras".

Esta tesis también ha puesto de manifiesto las diferencias entre los intervalos de confort recomendados en la bibliografía (intervalos anuales, generalmente sólo de temperatura) y el entorno real monitorizado. Por ello se han proporcionado intervalos mensuales de confort higrotérmico que garantizan un buen desarrollo de la película de levadura de flor. El diagrama psicrométrico que resume los intervalos de confort debería ser una herramienta útil para la industria vitivinícola, a fin de controlar y mejorar la crianza biológica de los vinos de Jerez.

En la actualidad, la crianza biológica del vino Generoso en el Marco de Jerez es un proceso industrial sostenible gracias a las características constructivas de las bodegas Catedral, que las convierte en un buen ejemplo de edificios de consumo de energético casi nulo (NZEB). Sus sencillas pero eficaces estrategias constructivas permiten mantener el confort térmico necesario para la crianza biológica, incluso con una necesidad constante de ventilación. Estos edificios pueden lograr reducciones de temperatura en su interior de hasta 9 °C en las horas más calurosas sin ningún tipo de sistemas de refrigeración, gracias a los fenómenos térmicos del amortiguamiento (inercia térmica) y de la estratificación.

Esta tesis analiza por primera vez el impacto que tendrá el cambio climático en este proceso. La bibliografía pone de manifiesto la sensibilidad del velo de flor a las condiciones ambientales adversas, especialmente a las altas temperaturas. Los resultados de la caracterización higrotérmica de las bodegas Catedral revelan el delicado equilibrio en el que se encuentra para seguir manteniendo su desempeño, mostrando que con una pequeña variación de la temperatura exterior estos edificios pueden quedar fuera de la zona de confort para la que fueron diseñados, perdiendo parte de su función.

De cumplirse las predicciones de calentamiento global que pronostican organismos internacionales como El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), o incluso organismos nacionales como la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), en 2050 la temperatura media en el sur de España podría aumentar en 2,3 °C. En este escenario estos edificios no están preparados para absorber estos incrementos de temperatura. Como muestra el modelo desarrollado, la bodega objeto de estudio podría superar los límites de confort durante el 19% de los días del año, y en la mayoría de los casos de forma continua. Como consecuencia, el velo de flor no podría mantener su actividad durante un periodo prolongado, lo que afectaría a las características y la calidad del vino. La necesidad urgente del sector del vino de Jerez de aplicar nuevas estrategias y adaptar los edificios a los cambios que se producirán en las próximas décadas es evidente. Sin embargo, la difícil situación económica que atraviesa el sector en los últimos años, inmerso en un proceso de reestructuración, puede agravar esta situación. En este sentido el modelo de simulación energética desarrollado debería ser una herramienta útil para evaluar medidas de adaptación de estos edificios.

Pero la industria del vino de Jerez no es la única víctima de este problema. Numerosas actividades industriales desarrolladas en edificios NZEB tendrán que adaptarse al nuevo contexto en los próximos años si quieren seguir manteniendo un modelo de producción sostenible. En este sentido, existe la necesidad en el mundo de la investigación de desarrollar nuevos trabajos que anticipen soluciones para el inevitable futuro cambio.

6 FUTURAS INVESTIGACIONES

Uno de los tres aspectos más importantes que afectan a la crianza biológica de los vinos Generosos y que no ha sido objeto de análisis en esta tesis es la ventilación de las bodegas, que claramente juega un papel importante tanto en el desarrollo de las levaduras del velo de flor, por la necesidad que presentan de disponer de oxígeno en abundancia para su desarrollo, como por la capacidad de controlar las condiciones de temperatura y humedad en el interior de la bodega. El conocimiento mediante el estudio y análisis de la influencia y necesidad de esta componente podría suponer de vital importancia en el futuro para procurar estrategias activas que permitan mejorar el desempeño de estos edificios bodegueros, actuales y futuros, especialmente en un escenario de cambio climático.

Los datos obtenidos en el proceso de monitorización de las bodegas todavía pueden ser analizados con múltiples objetos que no han sido objeto de esta tesis. Por ejemplo, los datos de la bodega Barbiana que fue ampliamente monitorizada para su análisis mediante dinámica de fluido computacional (CFD) con objeto de analizar el comportamiento interior del aire en la bodega relacionando los procesos de ventilación, se encuentran todavía en proceso.

El modelo de simulación energética desarrollado en esta tesis y que reproduce con precisión las condiciones reales de una bodega puede ser utilizado para analizar estrategias que permitan mejorar el desempeño de estos edificios como puedan ser la propuesta de modificantes arquitectónicas, implantación de sistemas de ventilación forzada, sistemas de climatización, o incluso la modificación de las condiciones climáticas con objeto de evaluar diferentes emplazamientos para conocer su viabilidad para la crianza biológica.

7 BIBLIOGRAFÍA

- ACEVIN, 2019. Informe de visitantes a bodegas asociadas a las rutas del vino de España, Asociación Española de Ciudades del Vino, Madrid.
- AEMET, 2021. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Agencia Estatal de Meteorología. Informe sobre el estado del clima de España 2020. Resumen ejecutivo, Madrid.
- Aladro-Prieto, J.M., 2012. La construcción de la "Ciudad Bodega": arquitectura del vino y transformación urbana en Jerez de la Frontera en el siglo XIX. Tesis Doctoral. Universidad de Sevilla.
- Alexandre, H., 2013. Flor yeasts of *Saccharomyces cerevisiae*-Their ecology, genetics and metabolism. *International Journal of Food Microbiology*, 167(2): 269-275.
- Allen, M.R., O.P. Dube, W. Solecki, F. Aragón-Durand, W. Cramer, S. Humphreys, M. Kainuma, J. Kala, N. Mahowald, Y. Mulugetta, R. Perez, M. Wairiu, and K. Zickfeld, 2018. Framing and Context. In: *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty.*
- Andalucía, J., 2002. Empresa Pública de Desarrollo Agrario y Pesquero. Consejería de Agricultura y Pesca. Junta de Andalucía. Diagnóstico del sector vitivinícola y de las bodegas en el Marco de Jerez.
- Andalucía, J., 2013. Junta de Andalucía. Orden de 2 de agosto de 2013, por la que se modifica la de 13 de mayo de 2013, por la que se aprueba el Reglamento de las Denominaciones de Origen «Jerez-Xérès-Sherry» y «Manzanilla-Sanlúcar de Barrameda», así como sus correspondientes Pliegos de Condiciones. *Boletín Oficial de la Junta de Andalucía*, núm. 155, pp.145. 8 de agosto de 2013.
- Andalucía, J., 2022. Junta de Andalucía. Orden de 4 de octubre de 2022, por la que se aprueban las solicitudes de modificación normales de los pliegos de condiciones de las Denominaciones de Origen Protegidas «Jerez-Xérès-Sherry» y «Manzanilla-Sanlúcar de Barrameda».. *Boletín Oficial de la Junta de Andalucía*, núm. 195, pp. 15774/1 a 15774/3. 10 de octubre de 2022.
- ASHRAE, 2014. The American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. *Guideline 14-2014. Measurement of Energy, Demand, and Water Savings*, Atlanta, GA.
- Avdanina, D. and Zghun, A., 2022. Sherry Wines: Worldwide Production, Chemical Composition and Screening Conception for Flor Yeasts. *Fermentation*, 8(8).

- Barbadillo, A., 1993. Historia de las Bodegas Barbadillo. Bodegas Antonio Barbadillo S.A., Sanlúcar de Barrameda.
- Barbaresi, A., De Maria, F., Torreggiani, D., Benni, S. and Tassinari, P., 2015a. Performance assessment of thermal simulation approaches of wine storage buildings based on experimental calibration. *Energy and Buildings*, 103: 307-316.
- Barbaresi, A., Torreggiani, D., Benni, S. and Tassinari, P., 2014. Underground cellar thermal simulation: Definition of a method for modelling performance assessment based on experimental calibration. *Energy and Buildings*, 76: 363-372.
- Barbaresi, A., Torreggiani, D., Benni, S. and Tassinari, P., 2015b. Indoor air temperature monitoring: A method lending support to management and design tested on a wine-aging room. *Building and Environment*, 86: 203-210.
- Barquín, J., 2009. Vinos históricos de Jerez. Fundación para la cultura del vino, Madrid.
- Belcher, S.E., Hacker, J.N. and Powell, D.S., 2005. Constructing design weather data for future climates. *Building Services Engineering Research and Technology*, 26(1): 49-61.
- Benni, S., Torreggiani, D., Barbaresi, A. and Tassinari, P., 2013. Thermal performance assessment for energy-efficient design of farm wineries. *Transactions of the ASABE*, 56(6): 1483-1491.
- Borrego Plá, M.d.C., 1998. El Jerez, Hacedor de cultura. I Génesis de una expansión: desde los orígenes hasta 1942, I. Caja San Fernando y Consejo Regulador de las D.O. "Jerez-Xérès-Sherry" y "Manzanilla", Jerez de la Frontera.
- Boutelou, E., 1807. Memorias sobre el cultivo de la vid en Sanlúcar de Barrameda y Jerez de la Frontera. Imp. Villalpando, Madrid.
- Bravo Abad, F., 1995. Del vino y otros temas. EYPASA, Madrid.
- Cañas, I., Cid-Falceto, J. and Mazarrón, F.R., 2012. Wine cellars built underground: Soil properties in the "Ribera del Duero" (Spain). *Informes de la Construcción*, 64(527): 287-296.
- Cañas, I. and Mazarrón, F.R., 2009. The effect of traditional wind vents called zarceras on the hygrothermal behaviour of underground wine cellars in Spain. *Building and Environment*, 44(9): 1818-1826.
- Carbonero-Pacheco, J., Moreno-García, J., Moreno, J., García-Martínez, T. and Mauricio, J.C., 2022. Revealing the Yeast Diversity of the Flor Biofilm Microbiota in Sherry Wines Through Internal Transcribed Spacer-Metabarcoding and Matrix-Assisted Laser Desorption/Ionization Time of Flight Mass Spectrometry. *Frontiers in Microbiology*, 12.

- Carlos Pérez, J.L.G., 1997. Manual práctico de la vida autosuficiente. Elaboración artesanal del vino. Ediciones BLUME.
- Cordero-Bueso, G. et al., 2018. The Microbial Diversity of Sherry Wines. *Fermentation-Basel*, 4(1): 19-Article No.: 19.
- Cortes, I.M., 1968. *Enología*. Editorial Alambra, S.A.
- Cruces-Montes, S.J., Merchán-Clavellino, A., Romero-Moreno, A. and Paramio, A., 2020. Perception of the attributes of sherry wine and its consumption in young people in the South of Spain. *Foods*, 9(4).
- Cruess, W.V., 1946. *Investigations of the Flor Sherry Process*.
- CTE, 2021. Código Técnico de la Edificación (CTE WEB). Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja y el ICCL, Instituto de la Construcción de Castilla y León. <http://cte-web.iccl.es/>. (Accessed 12 Noviembre 2021).
- Chamorro, A.C. and Carrillo, I.a., 1987. Observaciones sobre la regulación y ordenación del mercado del vino de Jerez de la Frontera 1850-1935: los antecedentes del consejo regulador de la denominación de origen "Jerez-Xérès-Sherry". *Agricultura y Sociedad*, 44: 171-197.
- Christaki, T. and Tzia, C., 2002. Quality and safety assurance in winemaking. *Food Control*, 13(8): 503-517.
- David-Vaizant, V. and Alexandre, H., 2018. Flor Yeast Diversity and Dynamics in Biologically Aged Wines. *Frontiers in Microbiology*, 9.
- Domecq, B., 2011. *El jerez y sus misterios. Cata y degustación*. EH Editores, Jerez de la Frontera.
- Dos Santos, A.M., Feuillat, M. and Charpentier, C., 2000. Flor yeast metabolism in a model system similar to cellar ageing of the French "Vin Jaune": Evolution of some by-products, nitrogen compounds and polysaccharides. *Vitis*, 39(3): 129-134.
- Eldarov, M.A. et al., 2018. Whole-Genome Analysis of Three Yeast Strains Used for Production of Sherry-Like Wines Revealed Genetic Traits Specific to Flor Yeasts. *Frontiers in Microbiology*, 9.
- Esteve-Zarzoso, B., Peris-Toran, M.J., Garcia-Maiquez, E., Uruburu, F. and Querol, A., 2001. Yeast population dynamics during the fermentation and biological aging of sherry wines. *Applied and Environmental Microbiology*, 67(5): 2056-2061.

- EU, 2009. The European Parliament and of the Council of the European Union. Commission Regulation (EC) No 606/2009 of 10 July 2009 laying down certain detailed rules for implementing Council Regulation (EC) No 479/2008 as regards the categories of grapevine products, oenological practices and the applicable restrictions. *Official Journal of the European Union*. L193, pp. 1-59, 24 July 2009.
- EU, 2010. The European Parliament and of the Council of the European Union. Directive 2010/31/EU of The European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast). *Official Journal of the European Union*. L153, 18 June 2010, 13-35.
- EU, 2013. The European Parliament and of the Council of the European Union. Regulation (EU) No 1308/2013 of the European Parliament and of the Council of 17 December 2013 establishing a common organization of the markets in agricultural products and repealing Council Regulations (EEC) No 922/72, (EEC) No 234/79, (EC) No 1037/2001 and (EC) No 1234/2007. *Official Journal of the European Union*. L347, pp. 671-854, 20 December 2013.
- EU, 2018. The European Parliament and of the Council of the European Union. Directive 2018/844 of The European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings and Directive 2012/27/EU on energy efficiency. *Official Journal of the European Union*. L156, 19 June 2018, 75-91.
- Fabios, M., Lopez-Toledano, A., Mayen, M., Merida, J. and Medina, M., 2000. Phenolic compounds and browning in sherry wines subjected to oxidative and biological aging. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 48(6): 2155-2159.
- Fernández de Bobadilla, G., 1956. *Viníferas jerezanas y de Andalucía Occidental*. Instituto Nacional de Investigaciones Agronómicas, Madrid.
- Foronda-Robles, C., 2018. The territorial redefinition of the Vineyard Landscape in the sherry wine region (Spain). *Miscellanea Geographica*, 22(2): 95-101.
- García de Luján, A., 1997. *La viticultura del jerez*. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid.
- García del Barrio Ambrosy, I., 1979. *La Tierra del Vino de Jerez*. Gráficas del Exportador.
- García del Barrio Ambrosy, I., 1984. *Las bodegas del vino de Jerez* (Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias. Cuaderno I.N.I.A. ; no. 16) Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Madrid.
- Giorgi, F. and Lionello, P., 2008. Climate change projections for the Mediterranean region. *Global and Planetary Change*, 63(2-3): 90-104.

- Gómez Díaz, A.M., 2002. La Manzanilla. Historia y Cultura. Las bodegas de Sanlúcar. Pequeñas Ideas Editoriales, Sanlúcar de Barrameda.
- González Gordon, M., 1970. Jerez-Xerez, Sherish, Jerez de la Frontera.
- Hidalgo, J. and Fielden, C., 2009. La Manzanilla. El vino de Sanlúcar. Almuzara, Córdoba.
- Hidalgo Togores, J., 2011. Tratado de Enología (Tomos I y II). Ediciones Mundi-Prensa, Madrid.
- Holmes, M.J. and Hacker, J.N., 2007. Climate change, thermal comfort and energy: Meeting the design challenges of the 21st century. *Energy and Buildings*, 39(7): 802-814.
- IFAPA, 2022. Instituto de investigación y formación agraria y pesquera (IFAPA). Consejería de Agricultura, Pesca, Agua y Desarrollo Rural. Junta de Andalucía. <https://www.juntadeandalucia.es>. (Accessed 21 September 2022).
- IPCC, 2021. Intergovernmental Panel on Climate Change Data Distribution Centre. <https://www.ipcc-data.org/>. (Accessed 21 November 2021).
- Jefferies, J., 2016. Sherry. Infinite Ideas Limited, Oxford.
- Jentsch, M.F., Bahaj, A.S. and James, P.A.B., 2017. Climate Change World Weather File Generator for World-Wide Weather Data – CCWorldWeatherGen (Version 1.9). University of Southampton. Faculty of Engineering and the Environment. Sustainable Energy Research Group, Southampton.
- Jentsch, M.F., James, P.A.B., Bourikas, L. and Bahaj, A.S., 2013. Transforming existing weather data for worldwide locations to enable energy and building performance simulation under future climates. *Renewable Energy*, 55: 514-524.
- Jerez-Xérès-Sherry, 2019. Consejo Regulador de las Denominaciones de Origen "Jerez-Xérès-Sherry", "Manzanilla-Sanlúcar de Barrameda" y "Vinagre de Jerez". Los vinos de Jerez. <https://www.sherry.wine/es>. (Accessed 12 December 2021), Jerez de la Frontera.
- Jerez-Xérès-Sherry, 2021. Consejo Regulador de las Denominaciones de Origen "Jerez-Xérès-Sherry", "Manzanilla-Sanlúcar de Barrameda" y "Vinagre de Jerez". Memoria de actividades 2021.
- JI Lozano and Perdignes, F., 1989. Estudio de parametros ambientales que condicionan la crianza del vino fino. V Jornadas Universitarias de Viticultura y Enología Jerez: 167.
- Kishkovskaia, S.A. et al., 2021. Screening for promising yeast strains for sherry wine production using genetic and enological markers. *Sel'skokhozyaistvennaya Biologiya*, 56(3): 537-548.

- Maldonado Rosso, J., 1999. La formación del capitalismo en el marco del Jerez : de la vitivinicultura tradicional a la agroindustria vinatera moderna (siglos XVIII y XIX). Huerga y Fierro, Madrid.
- Marcilla, J., Alas, G., y Feduchy, E., 1936. Contribución al estudio de las levaduras que forman velo sobre ciertos vinos de elevado grado alcohólico. Anales centro investigaciones vinícolas de Madrid., Madrid.
- Marcq, P. and Schieberle, P., 2021. Characterization of the Key Aroma Compounds in a Commercial Fino and a Commercial Pedro Ximénez Sherry Wine by Application of the Sensomics Approach. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 69(17): 5125-5133.
- Marin-Menguiano, M., Romero-Sanchez, S., Barrales, R.R. and Ibeas, J.I., 2017. Population analysis of biofilm yeasts during fino sherry wine aging in the Montilla-Moriles DO region. *International Journal of Food Microbiology*, 244: 67-73.
- Martin, S. and Canas, I., 2006. A comparison between underground wine cellars and aboveground storage for the aging of Spanish wines. *Transactions of the ASABE*, 49(5): 1471-1478.
- Mazarron, F.R. and Canas, I., 2008. Exponential sinusoidal model for predicting temperature inside underground wine cellars from a Spanish region. *Energy and Buildings*, 40(10): 1931-1940.
- Mazarrón, F.R. and Cañas, I., 2009. Seasonal analysis of the thermal behaviour of traditional underground wine cellars in Spain. *Renewable Energy*, 34(11): 2484-2492.
- Mazarrón, F.R. and Cañas, I., 2010. Traditional underground wine cellars of Spain: Building and morphological properties and hygrothermal behaviour - taking advantage of soil properties, *Buildings and the Environment*, pp. 235-252.
- Mazarrón, F.R., Cid-Falceto, J. and Cañas-Guerrero, I., 2012a. Assessment of aboveground winery buildings for the aging and conservation of wine. *Applied Engineering in Agriculture*, 28(6): 903-910.
- Mazarrón, F.R., Cid-Falceto, J. and Cañas, I., 2012b. An assessment of using ground thermal inertia as passive thermal technique in the wine industry around the world. *Applied Thermal Engineering*, 33-34(1): 54-61.
- Mazarrón, F.R., López-Ocón, E., Garcimartín, M.A. and Cañas, I., 2013. Assessment of basement constructions in the winery industry. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 35: 200-206.

- Mazarrón, F.R., Porras-Amores, C. and Cañas-Guerrero, I., 2015. Annual evolution of the natural ventilation in an underground construction: Influence of the access tunnel and the ventilation chimney. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 49: 188-198.
- Medina García De Polavieja, J., 2014. Pasado y futuro del Marco de Jerez. Consejo Regulador de las DD.OO. de Jerez-Xèrés-Sherry-Manzanilla de Sanlúcar y Vinagre de Jerez.
- Merida, J., Lopez-Toledano, A. and Medina, M., 2007. Immobilized yeasts in kappa-carragenate to prevent browning in white wines. *European Food Research and Technology*, 225(2): 279-286.
- Miró-Miró, C., Mayoral-Campa, E. and Pozo-Bernal, M., 2021. Dry cellar. The case of Bodegas Internacionales S. A. de Jerez. *Informes de la Construcción*, 73(561): 1-15.
- Montañés, E., 2017. Sherry wine and the replanting of vineyards, from 1894 to 1914: An entrepreneurial history perspective. *Historia Agraria*(71): 143-173.
- Moreno-García, J., Carlos Mauricio, J., Moreno, J. and Garcia-Martinez, T., 2016. Stress responsive proteins of a flor yeast strain during the early stages of biofilm formation. *Process Biochemistry*, 51(5): 578-588.
- Moreno-García, J., Raposo, R.M. and Moreno, J., 2013. Biological aging status characterization of Sherry type wines using statistical and oenological criteria. *Food Research International*, 54(1): 285-292.
- Moyano, L., Zea, L., Moreno, J.A. and Medina, M., 2010. Evaluation of the Active Odorants in Amontillado Sherry Wines during the Aging Process. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58(11): 6900-6904.
- Nakicenovic, N. and Swart, R., 2000. Special report on emissions scenarios. A special report of working group III of the intergovernmental panel on climate change., Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.
- Naumov, G.I., 2017. Genetic polymorphism of sherry *Saccharomyces cerevisiae* yeasts. *Microbiology*, 86(1): 19-31.
- Négre-Francot, E., 1980. Manual práctico de vinificación y conservación de vinos. 3ª Edición. José Monteso Editor.
- Ordóñez García, A., 2016. Manual de ayuda DesignBuilder en español. Versión del programa: 4.
- Ortega, A.F., Mayen, M. and Medina, M., 2008. Study of colour and phenolic compounds in two models of oxidative ageing for sherry type white wines. *Food Control*, 19(10): 949-956.

- Ough, C.S., 1996. Tratado básico de enología. Editorial Acribia, S.A.
- Pérez-Prieto, L.J., López-Roca, J.M., Martínez-Cutillas, A., Pardo Mínguez, F. and Gómez-Plaza, E., 2002. Maturing wines in oak barrels. Effects of origin, volume, and age of the barrel on the wine volatile composition. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50(11): 3272-3276.
- Porras-Amores, C., Mazarrón, F.R. and Cañas, I., 2014. Study of the vertical distribution of air temperature in warehouses. *Energies*, 7(3): 1193-1206.
- Porras-Amores, C., Mazarrón, F.R., Cañas, I. and Villoría Sáez, P., 2019. Natural ventilation analysis in an underground construction: CFD simulation and experimental validation. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 90: 162-173.
- Portero Serrano, J., Acero Díaz, F.J. and García García, J.A., 2020. Analysis of Extreme Temperature Events over the Iberian Peninsula during the 21st Century Using Dynamic Climate Projections Chosen Using Max-Stable Processes. *Atmosphere*, 11(5): 506.
- Ribalaygua, J. et al., 2013. Climate change scenarios for temperature and precipitation in Aragón (Spain). *Science of the Total Environment*, 463-464: 1015-1030.
- Ribéreau-Gayon, P.G., Y; Maujean, A; Dubourdieu, D., 2002. Tratado de enología. Volumen 2: Química del vino, estabilización y tratamientos. Editorial hemisferio Sur / Ediciones Mundi-Prensa.
- Rodríguez-García, J. and Vieira-Rodríguez, A., 2017. Analysis of the Jerez-Xeres-Sherry and Manzanilla de Sanlúcar de Barrameda Wines Market in the Period 1982-2012. *Revista De Estudios Andaluces*, 34(1): 155-200.
- Rosa, T.D., 1988. Tecnología del vino tinto. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid.
- Ruiz De Adana, M., López, L.M. and Sala, J.M., 2005. A Fickian model for calculating wine losses from oak casks depending on conditions in ageing facilities. *Applied Thermal Engineering*, 25(5-6): 709-718.
- Ruiz, G.R. and Bandera, C.F., 2017. Validation of Calibrated Energy Models: Common Errors. *Energies*, 10(10): 1587.
- Saavedra, I., 1959. La levadura de flor en la crinza del vino. Tesis Doctoral., Universidad Complutense de Madrid, Madrid.

- Santolini, E., Barbaresi, A., Torreggiani, D. and Tassinari, P., 2019. Numerical simulations for the optimisation of ventilation system designed for wine cellars. *Journal of Agricultural Engineering*, 50(4): 180-190.
- Schwarz, M. et al., 2021. Hplc-dad-ms and antioxidant profile of fractions from amontillado sherry wine obtained using high-speed counter-current chromatography. *Foods*, 10(1).
- Sociedad Enológica del Penedés, S.A., 1952. *Guía Práctica de Vinificación Moderna*. 4ª Edición. Ediciones SEPSA, Vilafranca, Barcelona.
- Stocker, T.F., Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley, 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Suárez Lepe, J.A., Íñigo Leal, B., 2004. *Microbiología enológica. Fundamentos de vinificación*. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid.
- Torreggiani, D., Barbaresi, A., Dallacasa, F. and Tassinari, P., 2018. Effects of different architectural solutions on the thermal behaviour in an unconditioned rural building. The case of an Italian winery. *Journal of Agricultural Engineering*, 49(1): 52-63.
- Touhami, I. et al., 2015. Assessment of climate change impacts on soil water balance and aquifer recharge in a semiarid region in south east Spain. *Journal of Hydrology*, 527: 619-629.
- Troost, G., 1985. *Tecnología del vino*. Ediciones Omega, S.A., Barcelona.
- Valcárcel-Muñoz, M.J., Guerrero-Chanivet, M., Rodríguez-Dodero, M.d.C., García-Moreno, M.d.V. and Guillén-Sánchez, D.A., 2022. Analytical and Chemometric Characterization of Fino and Amontillado Sherries during Aging in Criaderas y Solera System. *Molecules*, 27(2): 365.
- Villamiel, M., Carmen Polo, M. and Victoria Moreno-Arribas, M., 2008. Nitrogen compounds and polysaccharides changes during the biological ageing of sherry wines. *Lwt-Food Science and Technology*, 41(10): 1842-1846.
- Webster, L. et al., 2015. *M&V Guidelines: Measurement and Verification for Performance-Based Contracts*. Version 4.0, U.S. Department of Energy. Federal Energy Management Program, Washington, DC.
- Yravedra Soriano, M.J., 2003. *Arquitectura y cultura del vino: Andalucía, Cataluña, La Rioja y otras regiones*. Munilla-Lería, Madrid.

- Zamora, F., 2003. Elaboración y crianza del vino tinto: Aspectos científicos y prácticos. Ediciones AMV, Madrid.
- Zara, S. et al., 2005. FLO11-based model for air-liquid interfacial biofilm formation by *Saccharomyces cerevisiae*. *Applied and Environmental Microbiology*, 71(6): 2934-2939.
- Zara, S., Gross, M.K., Zara, G., Budroni, M. and Bakalinsky, A.T., 2010. Ethanol-Independent Biofilm Formation by a Flor Wine Yeast Strain of *Saccharomyces cerevisiae*. *Applied and Environmental Microbiology*, 76(12): 4089-4091.
- Zea, L., Moyano, L. and Medina, M., 2008. Odorant active compounds in Amontillado wines obtained by combination of two consecutive ageing processes. *European Food Research and Technology*, 227(6): 1687-1692.
- Zea, L., Moyano, L. and Medina, M., 2010. Changes in aroma profile of sherry wines during the oxidative ageing. *International Journal of Food Science and Technology*, 45(11): 2425-2432.
- Zou, Y., Lou, S., Xia, D., Lun, I.Y.F. and Yin, J., 2021. Multi-objective building design optimization considering the effects of long-term climate change. *Journal of Building Engineering*, 44.