

Manual técnico

Buenas prácticas para
la gestión del O₂ en bodega

Coordinadores: María del Álamo Sanza e Ignacio Nevares Domínguez



INSTITUTO
TECNOLÓGICO
AGRARIO



Junta de
Castilla y León



Universidad de Valladolid



Parque Científico
Universidad de Valladolid



CARBUROS
METALICOS
Grupo Air Products



ivg colbachini spa

Manual técnico

Buenas prácticas para
la gestión del O₂ en bodega

Serie: CIENCIAS, nº 35

Manual técnico : buenas prácticas para la gestión del O₂ en bodega / María del Álamo Sanza, Ignacio Nevares Domínguez, coords. ; autores, María del Álamo Sanza ... [et al.]. - Valladolid : Ediciones Universidad de Valladolid, 2023

264 p. : 27 cm. - (Ciencias : 35)
ISBN 978-84-1320-264-8

1. Vinos y vinificación 2. Bodegas - Ventilación 3. Oxígeno I. Álamo Sanza, María del, coord. y coaut. II. Nevares Domínguez, Ignacio, coord. y coaut. III. Universidad de Valladolid, ed. IV. Serie

663.285:697.95
697.95:663.285

Coordinadores

MARÍA DEL ÁLAMO SANZA | IGNACIO NEVARES DOMÍNGUEZ

Autores

María del Álamo Sanza	Maríoli Alejandra Carrasco Quiroz
María Asensio Cuadrado	Jordi Mallen Pomes
Rubén del Barrio Galán	Ana María Martínez Gil
Marta Bueno-Herrera	Ignacio Nevares Domínguez
Luis Miguel Cárcel Cárcel	Silvia Pérez-Magariño

Manual técnico

Buenas prácticas para
la gestión del O₂ en bodega



EDICIONES
Universidad
Valladolid



Universidad de Valladolid



Este libro está sujeto a una licencia "Creative Commons Reconocimiento-No Comercial - Sin Obra derivada" (CC-by-nc-nd).

LOS AUTORES, VALLADOLID, 2023

Primera edición: noviembre de 2023

ISBN: 978-84-1320-264-8

Elaborado por: Grupo UVaMOX

Diseño y maquetación: Capitán Quimera

Fotografía de portada:

imagen cedida por IVG Colbachini spa.

Coordinadores

María del Álamo Sanza

Catedrática de Universidad
Química Analítica
Grupo UVaMOX-E.T.S. Ingenierías Agrarias
Universidad de Valladolid
maria.alamo.sanza@uva.es

Ignacio Nevares Domínguez

Catedrático de Universidad
Ingeniería Agrícola y Forestal
Grupo UVaMOX-E.T.S. Ingenierías Agrarias
Universidad de Valladolid
ignacio.nevares@uva.es

Lista de los autores que han intervenido en esta obra

María del Álamo Sanza

Catedrática de Universidad
Química Analítica
Grupo UVaMOX-E.T.S. Ingenierías Agrarias
Universidad de Valladolid
maria.alamo.sanza@uva.es
<https://orcid.org/0000-0002-0833-6081>

María Asensio Cuadrado

Investigadora
Grupo UVaMOX-E.T.S. Ingenierías Agrarias
Universidad de Valladolid
maria.asensio.cuadrado@uva.es
[linkedin.com/in/maria-asensio-cuadrado-9b5324151](https://www.linkedin.com/in/maria-asensio-cuadrado-9b5324151)

Rubén del Barrio Galán

Profesor ayudante doctor
Química Analítica
Grupo UVaMOX-E.T.S. Ingenierías Agrarias
Universidad de Valladolid
ruben.barrio@uva.es
<https://orcid.org/0000-0002-0054-728X>

Marta Bueno-Herrera

Técnico
Instituto Tecnológico Agrario de Castilla y León
Consejería de Agricultura y Ganadería
bueherma@itacyl.es
<https://orcid.org/0000-0002-8711-534X>

Luis Miguel Cárcel Cárcel

Profesor Titular de Universidad
Ingeniería Agrícola y Forestal
Grupo UVaMOX-E.T.S. Ingenierías Agrarias
Universidad de Valladolid
luismiguel.carcel@uva.es
<https://orcid.org/0000-0002-2872-0961>

Marioli Alejandra Carrasco Quiroz

Ingeniera Agrónoma-doctoranda
Grupo UVaMOX-E.T.S. Ingenierías Agrarias
Universidad de Valladolid
mariolialejandra.carrasco@estudiantes.uva.es
<https://orcid.org/0000-0002-1573-1821>

Jordi Mallen Pomes

Product Manager food & Leisure
Carbuos Metálicos, S.A.
MALLENJ@carbuos.com

Ana María Martínez Gil

Profesora contratada doctor
Química Analítica
Grupo UVaMOX-E.T.S. Ingenierías Agrarias
Universidad de Valladolid
anamaria.martinez.gil@uva.es
<https://orcid.org/0000-0002-2193-3956>

Ignacio Nevares Domínguez

Catedrático de Universidad
Ingeniería Agrícola y Forestal
Grupo UVaMOX-E.T.S. Ingenierías Agrarias
Universidad de Valladolid
ignacio.nevares@uva.es
<https://orcid.org/0000-0002-9057-255X>

Silvia Pérez-Magariño

Investigadora
Instituto Tecnológico Agrario de Castilla y León
Consejería de Agricultura y Ganadería
permagsi@itacyl.es
<https://orcid.org/0000-0002-0880-7154>

CONTENIDO

CAPÍTULO 1- El oxígeno disuelto y su medida	19
1.1 El oxígeno atmosférico en la industria.....	20
1.2 Descripción fisicoquímica del oxígeno gaseoso.....	21
1.3 La medida del oxígeno.....	21
1.3.1 La ley de los gases ideales.....	22
1.3.2 La ley de Dalton de las presiones parciales.....	23
1.3.3 La ley de Henry para gases disueltos en líquidos.....	30
1.3.4 La solubilidad del oxígeno en el vino.....	32
1.3.5 Unidades de medida de la concentración de oxígeno en un fluido.....	34
1.3.6 Sistemas de medida.....	39
1.3.7 Factores que afectan la medida.....	39
1.3.8 La calibración de los equipos de medida de oxígeno disuelto.....	42
1.3.8.1 Calibración del cero.....	43
1.3.8.2 Calibración de la pendiente o de la respuesta del sensor.....	43
1.4 Referencias.....	45
CAPÍTULO 2- Efecto del oxígeno en los mostos y vinos	47
2.1 Introducción.....	48
2.2 Reacciones del oxígeno.....	49
2.3 Sustratos susceptibles de oxidarse.....	49
2.4 Mosto (oxidación enzimática e hiperoxidación).....	54
2.5 Fermentación (alcohólica y maloláctica).....	56
2.6 Maduración de los vinos.....	56
2.6.1 Efecto del oxígeno en el aroma de los vinos.....	57
2.6.2 Efecto del oxígeno en el color de los vinos.....	60
2.7 Conclusiones.....	63
2.8 Referencias.....	64
CAPÍTULO 3- Los gases para desplazar el oxígeno en enología	67
3.1 Introducción.....	68
3.2 Tipos de gases utilizados en enología para desplazar el oxígeno.....	69
A. Dióxido de carbono (CO ₂).....	69
B. Nitrógeno (N ₂).....	69
C. Argón (Ar).....	69
D. Mezclas de gases.....	71
Mezcla de CO ₂ en N ₂	71
Mezcla de CO ₂ en Ar.....	71
3.3 La importancia de estos gases en enología.....	72
3.4 Métodos de aplicación de los gases para desplazar al oxígeno.....	73
3.5 Consideraciones de seguridad y regulaciones.....	75

3.6 Conclusiones.....	77
3.7 Referencias.....	77

CAPÍTULO 4- La oxigenación de vinos en las operaciones en bodega 79

4.1 Introducción	80
4.2 Incorporación de oxígeno al vino en las diferentes operaciones en bodega	81
4.2.1 Estrujado y prensado de la uva.....	81
4.2.2 Bombeo	81
4.2.3 Filtración.....	82
4.2.4 Centrifugación.....	83
4.2.5 Estabilización tartárica en continuo.....	83
4.2.6 Conservación de vinos.....	84
4.2.7 El transporte de vino en cisterna	85
4.2.8 El embotellado	85
4.3 Conclusiones.....	86
4.4 Referencias.....	86

CAPÍTULO 5- Importancia de los materiales en la oxigenación durante el movimiento de vino en bodega 89

5.1 Introducción	91
5.2 Desarrollo de los experimentos.....	91
5.3 Resultados.....	95
5.3.1 Efecto del tipo y junta de conexión en la incorporación de oxígeno al vino.....	95
5.3.2 Efecto del tipo de manguera.....	97
5.3.3 Inertización de mangueras.....	98
5.4 Conclusiones.....	102
5.5 Referencias.....	103

CAPÍTULO 6- Trasiegos: aplicación de gases de inertizado para prevenir la incorporación de oxígeno al vino 105

6.1 Introducción	106
6.2 Desarrollo de los experimentos	107
6.3 Resultados.....	109
6.3.1 Aplicación de gases para el inertizado de un depósito vacío antes del trasiego (purging o flushing).....	109
6.3.2 Determinación del volumen de gas para el inertizado total de un depósito vacío (relación coste beneficio).....	111
6.3.3 Optimización del proceso de inertizado.....	112
6.3.4 Eficacia de la cobertura de gas (blanketing) en el depósito origen con diferentes gases y diferente volumen de gas adicionado.....	114
6.4 Conclusiones.....	116
6.5 Referencias.....	117

CAPÍTULO 7- Retirada de oxígeno mediante borboteo de gases 119

7.1 Introducción.....	120
7.2 Métodos para retirar el oxígeno disuelto en el vino mediante borboteo de gas de inertizado	121
7.3 Experiencias de retirada de oxígeno en vino modelo.....	123
7.3.1 Optimización del caudal de N ₂ para la retirada de oxígeno del vino y la utilización de otros gases.....	123
7.3.2 Escalado en el uso de N ₂ para la retirada de oxígeno en vino modelo.....	124
7.4 Experiencias de retirada de oxígeno en vino blanco y tinto.....	125
7.5 Conclusiones.....	128
7.6 Referencias.....	129

CAPÍTULO 8- Persistencia de la cobertura con gas de inertizado durante el almacenamiento de vinos 131

8.1 Introducción	132
8.2 Estudio de la persistencia del inertizado de depósitos	133
8.2.1 Forma de aplicación del gas de inertizado.....	134
8.2.2 Optimización del volumen de gas de inertizado empleado.....	136
8.2.3 La persistencia a medio plazo.....	137
8.2.4 Tratamiento del espacio vacío con SO ₂	139
8.3 Conclusiones.....	139
8.4 Referencias.....	140

CAPÍTULO 9- El aporte de oxígeno en el embotellado 141

9.1 Introducción.....	142
9.2 El oxígeno disuelto (OD) del vino embotellado.....	143
9.3 Equipos de embotellado	143
9.3.1 Fundamentos de los sistemas de embotellado.....	143
9.3.1.1 Enjuagado y soplado de las botellas.....	144
9.3.1.2 Llenado.....	144
Llenadoras volumétricas.....	144
Llenado isobárico.....	144
Llenado por gravedad.....	144
Llenado isobárico por depresión.....	144
Llenado isobárico por sobrepresión.....	144
Llenado a vacío	144
9.3.1.3 Taponado	145
9.4 Aportes de oxígeno en el embotellado.....	146
9.4.1 Depósito pulmón.....	147
9.4.2 Bomba de alimentación.....	147
9.4.3 Inertizado de las botellas.....	148
9.4.4 Operación de llenado.....	148
9.4.5 Taponado.....	148

9.5 Tecnología disponible para la reducción del aporte de oxígeno.....	149
9.5.1 Inertizado de las botellas	149
9.5.2 Llenado	150
9.5.3 Taponado.....	153
9.6 Conclusiones.....	154
9.7 Referencias.....	154
CAPÍTULO 10- Contenido de oxígeno en el vino embotellado.....	157
10.1 Introducción.....	158
10.2 El oxígeno disuelto (OD) del vino embotellado	159
10.3 El oxígeno en el espacio de cabeza (HSO)	160
10.4 El oxígeno que entra por el tapón.....	166
10.5 Medida del oxígeno en el vino embotellado.....	167
10.5.1 Medida del oxígeno disuelto en el vino.....	168
10.5.2 Medida en el espacio de cabeza.....	168
10.6 Buenas prácticas en el embotellado	169
10.7 Referencias	170
CAPÍTULO 11- Diagnósticos en bodegas de Castilla y León.....	171
11.1 Introducción.....	173
11.2 Casos prácticos: A- TRASIEGOS	174
A.1 - Incorporación de oxígeno durante el trasiego de vino Verdejo.....	174
A.2 - Incorporación de oxígeno durante el trasiego de vino Verdejo a 7 depósitos con diferentes niveles de llenado.....	175
A.3 - Incorporación de oxígeno durante un trasiego y filtración con nitrógeno	178
A.4 - Incorporación de oxígeno durante el trasiego de vino Tempranillo con diferentes gases de inertizado.....	181
A.5 - Incorporación de oxígeno durante un trasiego con inertización completa	183
A.6 - Incorporación de oxígeno durante el vaciado de barricas con y sin inertizado.....	185
A.7 - Incorporación de oxígeno durante un trasiego con diferente modos y gases de inertizado.....	187
A.8 - Comparación del nivel de inertizado durante un trasiego de vino Tinta de Toro.....	190
A.9 - Incorporación de oxígeno durante un trasiego con transporte en cisterna entre bodegas.....	192
11.3 Casos prácticos: B- EMBOTELLADOS.....	195
B.1 -Incorporación de oxígeno en un vino Verdejo durante el trasiego y embotellado con inyección de CO ₂	195
B.2 - Incorporación de oxígeno durante el trasiego con inyección de N ₂ y filtración a vacío en el embotellado de vino Verdejo I.....	198
B.3 - Incorporación de oxígeno durante el trasiego con inyección de N ₂ y filtración a vacío en el embotellado de vino Verdejo II.....	200
B.4 - Incorporación de oxígeno durante el trasiego con cobertura de N ₂ y embotellado con vacío e inyección de N ₂ de vino Verdejo	203

B.5 -Incorporación de oxígeno durante el trasiego y embotellado con inyección de CO ₂ de vino Verdejo.....	205
B.6 - Incorporación de oxígeno durante el trasiego con cobertura de N ₂ con bomba y gravedad para el embotellado con inyección de N ₂ de vino Tinta de Toro.....	208
B.7 - Incorporación de oxígeno durante el trasiego inertizado y embotellado de vino tinto Tempranillo.....	212
B.8 - Incorporación de oxígeno durante el trasiego sin inertizado y embotellado de vino tinto Tempranillo.....	214
B.9 - Incorporación de oxígeno durante el trasiego y embotellado con inyección de N ₂ de vino tinto Tempranillo	217
11.4 Casos prácticos: C- OTROS ENSAYOS	
C.1 – Caracterización del inertizado y del OTR de un depósito de inoxidable.....	220

CAPÍTULO 12- Efecto en el vino del oxígeno recibido en el embotellado..... 223

12.1 Introducción	224
12.2 Análisis realizados en los vinos embotellados.....	224
12.3 Efecto del oxígeno en los vinos	225
12.3.1 Vinos blancos	225
12.3.2 Vinos tintos.....	232
12.4 Conclusiones.....	235
12.5 Referencias.....	235

CAPÍTULO 13- Recomendaciones y protocolos de manejo de gases en bodega 237

13.1. Introducción.....	238
13.2 Materiales y sistemas	238
13.3 La medida del volumen de gas dosificado	239
13.4 La inertización de mangueras	241
13.5 La inertización de depósitos vacíos: flushing	243
13.6 La cobertura de depósitos llenos: blanketing.....	244
13.7 La cobertura en el almacenamiento de vinos	246
13.8 La retirada de oxígeno disuelto en vinos mediante el borboteo de gases de inertizado.....	246
13.9 La embotelladora	247
13.10 La gestión del embotellado para minimizar la incorporación de oxígeno	247

AGRADECIMIENTOS

Este libro ha sido posible gracias a la participación de muchas personas y entidades que de forma directa o indirecta han facilitado su realización:

- Gracias a la financiación de la Junta de Castilla y León en el marco del Convenio entre el Instituto Tecnológico Agrario de Castilla y León, la Universidad de Valladolid y la Fundación Parque Científico de la Universidad de Valladolid para la realización de Actividades de Investigación, Promoción de la Innovación y la Transferencia del Conocimiento sobre productos alimentarios y optimización de los procesos productivos en Sectores Estratégicos de Castilla y León: Sector Vitivinícola
- Gracias a la colaboración de distintas bodegas de Castilla y León que han cedido generosamente sus instalaciones acogiéndonos para realizar las medidas presentadas en los casos prácticos,
- Gracias a las entidades colaboradoras que han financiado la realización de los experimentos y de este manual:
 - » Carbueros Metálicos S.A (Grupo Air Products)
 - » IVG Colvachini spa
- Gracias especialmente a todos los enólogos que desde el grupo UVaMOX participaron en el desarrollo de los experimentos presentados:
 - » Ainara Fernández Díaz
 - » Roberto Francia Sendino
 - » Isaac Daniel Bartolomé de la Fuente
 - » Paloma Franch Uso
 - » Elena Pérez Cardo
 - » Adrián Espinosa Hernández

PRÓLOGO

Es para mí un auténtico privilegio el poder prologar este libro que aborda una de las temáticas más importantes y quizás más olvidadas de la enología. Vivimos en una atmosfera que contiene un 21 % de oxígeno y por tanto este elemento químico es omnipresente y participa en infinidad de procesos sin que en ocasiones seamos conscientes de ello. De hecho, está muy claro que el vino evoluciona gracias al oxígeno. Ya en 1866, el gran Louis Pasteur escribió en su famoso libro "Estudios sobre el vino" las siguientes frases: "Es el oxígeno el que hace al vino; es por su influencia que envejece". Como pueden ver, Louis Pasteur ya era consciente de la gran importancia que tiene el oxígeno en la vida del vino.

Cada vez que el vino entra en contacto con el aire se incorpora algo de oxígeno, el cual será consumido posteriormente generando pequeños cambios en su composición química, lo que puede tener consecuencias en su aroma, en su color y en su textura. Estas consecuencias pueden ser positivas o negativas dependiendo del tipo de vino y/o del momento de su elaboración.

Así, mediante los remontados durante la vinificación en tinto se busca, además de favorecer la extracción de la materia colorante una cierta oxigenación que favorezca la multiplicación de las levaduras y evite la aparición de olores de reducción. Mediante los trasiegos se persigue eliminar las lías e introducir algo de oxígeno, evitando también de este modo la aparición de notas de reducción. Y naturalmente, mediante la crianza en barricas o mediante la aplicación de la microoxigenación se pretende estabilizar el color de los vinos tintos y suavizar su astringencia. Sin embargo, un exceso de oxígeno o su aplicación en determinados momentos de su elaboración puede ser negativo para la calidad del vino y por esa razón el enólogo debe proteger al vino de la oxidación.

Es por todas estas razones que el presente libro es muy necesario ya que desarrolla de forma extensa, profunda y clara todo aquello que los enólogos necesitan saber sobre la intensa relación entre el vino y el oxígeno.

Los autores de esta obra, miembros del grupo de investigación UVaMOX de la Universidad de Valladolid, con algunas colaboraciones externas, llevan años trabajando en la temática y son unos verdaderos expertos en la materia. Fruto de su gran experiencia es este libro, en el que abordan temas tales como la medida del oxígeno, las leyes que rigen su comportamiento, el efecto del oxígeno en mostos y vinos, cómo afectan las diferentes operaciones y materiales de bodega a los aportes de oxígeno al vino y cómo podemos aumentarlos o minimizarlos, cuál es el aporte de oxígeno durante el embotellado y cuáles son sus posibles consecuencias en la evolución del vino, cuál es la permeabilidad al oxígeno de los tapones, ... Y sobre todo formulan varias recomendaciones y protocolos de manejo de gases en bodega que serán de gran utilidad para los enólogos.

Por todo lo expuesto considero que este manual debería estar presente en todas las bodegas ya que sin lugar a dudas será de gran utilidad para mejorar los procesos de elaboración y conservación del vino.

Fernando Zamora
Catedrático de Universidad
Facultad de Enología de Tarragona (Universidad Rovira i Virgili)
Presidente de la Comisión de Enología de la OIV

PRESENTACIÓN

Es para mí una gran satisfacción participar en la presentación de este libro por varios motivos, tanto por mi trayectoria como responsable de la Estación Enológica de Castilla y León, como por mi labor docente en el Departamento de Química Analítica de Universidad de Valladolid y dentro de los estudios de Enología. En primer lugar, se trata del primer texto dirigido al sector sobre un aspecto de gran relevancia en la elaboración del vino, como es la oxigenación no controlada del mosto y del vino durante los distintos momentos de la vinificación. Por otro lado, conozco a los autores desde hace más de 25 años y sé que su empeño por conocer las implicaciones de la gestión del oxígeno en bodega viene de largo, prueba de ello son los numerosos proyectos de investigación, artículos, tesis... desarrollados sobre distintos aspectos de este tema, y además, su nombre, UVaMOX, un juego de letras que aúna no solo a la uva y a nuestra casa, la Universidad de Valladolid, si no también al oxígeno.

El papel del oxígeno en los procesos enológicos es un factor muy importante en la calidad del vino final, es por ello que este manual traslada al sector enológico aspectos teóricos esenciales desde una perspectiva muy práctica, lo que permite entender los puntos críticos en la incorporación de oxígeno al vino en bodega y en la expresión del oxígeno en el vino. Además, también recoge casos reales que reflejan la repercusión de las prácticas realizadas en las bodegas de Castilla y León, sobre la oxigenación del vino durante la elaboración. Otros capítulos se centran en describir los gases en enología, los efectos del oxígeno en el vino o la importancia del equipamiento empleado, dedicando también una parte importante a la optimización de los procesos de control de la oxigenación oculta.... para finalmente, en el último capítulo, ofrecer las recomendaciones y actuaciones a realizar en bodega de una forma sencilla y eficaz para evitar la incorporación no deseada de oxígeno.

Por ello considero este tratado una herramienta esencial de consulta para que el enólogo conozca los procesos y decida qué hacer en cada momento para mejorar y mantener su buen hacer en la elaboración de vinos de calidad.

José Antonio Fernández Escudero

Exresponsable de la Estación Enológica de Castilla y León

Instituto Tecnológico Agrario de Castilla y León

Colaborador Honorífico de la Universidad de Valladolid



Capítulo 1

El oxígeno disuelto y su medida

Ignacio Nevares Domínguez y María del Álamo Sanza
Grupo UVaMOX- Universidad de Valladolid



1.1. El oxígeno atmosférico en la industria

1.2. Descripción fisicoquímica del oxígeno gaseoso

1.2.1 La ley de los gases ideales

1.2.2 La ley de Dalton de las presiones parciales

1.2.3 La ley de Henry para gases disueltos en líquidos

1.2.4 La solubilidad del oxígeno en el vino

1.2.5 Unidades de medida de la concentración de oxígeno en un fluido

1.2.6 Sistemas de medida

1.2.7 Factores que afectan la medida

1.2.8 La calibración de los equipos de medida de oxígeno disuelto

1.2.8.1 Calibración del cero

1.2.8.2 Calibración de la pendiente o de la respuesta del sensor

1.3 Referencias

1.1.- El oxígeno atmosférico en la industria

El oxígeno (O_2) es un gas esencial para la vida en la Tierra, es uno de los componentes principales de la atmósfera terrestre siendo utilizado por organismos aeróbicos para la respiración celular. Sin embargo, a pesar de su importancia para la vida, el oxígeno también puede ser perjudicial en algunos casos, especialmente en la industria alimentaria y vitivinícola.

La presencia de oxígeno en los alimentos y bebidas puede llevar a la oxidación de sus componentes, lo que provoca la degradación de los nutrientes, el sabor, el color y la textura del producto final. En la industria vitivinícola, el oxígeno puede contribuir a la formación de compuestos no deseados en el vino que pueden afectar negativamente el sabor y la calidad del vino (ver [Capítulo 2](#)). Además, la presencia de oxígeno en el vino también puede favorecer el crecimiento de microorganismos no deseados, como las bacterias acéticas, lo que puede llevar a la degradación del vino.

Por lo tanto, es crucial controlar la cantidad de oxígeno presente en los alimentos y bebidas durante todo el proceso de producción. En este contexto, la medición y el control del oxígeno en la producción de vinos es de suma importancia para garantizar la calidad y la seguridad de los productos. En la industria vitivinícola, existen varios métodos para medir el oxígeno, cada uno con sus ventajas y desventajas.

En este capítulo, se revisarán los principios básicos de la medida de oxígeno en enología, incluyendo sus aplicaciones y limitaciones, y se realizará una revisión exhaustiva de la metodología de medición de oxígeno describiendo las mejores prácticas para el control del oxígeno en la industria vitivinícola, con el objetivo de ayudar a los productores a mejorar sus procesos y productos.

1.2.- Descripción fisicoquímica del oxígeno gaseoso

El oxígeno posee una amplia gama de propiedades físicas y químicas que lo hacen único. En este apartado, se explorarán las principales propiedades del oxígeno, abarcando tanto sus características físicas como químicas.

A. Propiedades físicas

Estado físico y densidad: El oxígeno es un gas en condiciones normales de temperatura y presión (CNTP). Se encuentra en estado gaseoso en la atmósfera terrestre y constituye aproximadamente el 21% de su composición. En cuanto a su densidad, el oxígeno gaseoso tiene una densidad de aproximadamente $1,43 \text{ kg/m}^3$ a 0°C y presión atmosférica (1 atmósfera).

Punto de ebullición y congelación: El oxígeno tiene un punto de ebullición de -183°C y un punto de congelación de -219°C . Esto significa que, a temperaturas por encima de -183°C , el oxígeno se evapora y se convierte en gas, mientras que a temperaturas por debajo de -219°C , se solidifica en forma de hielo de oxígeno.

Solubilidad en agua y otros líquidos: El oxígeno es moderadamente soluble en agua y en muchos otros líquidos. La solubilidad del oxígeno en el agua depende de la temperatura y de la presión parcial de oxígeno. A temperaturas bajas y altas presiones de oxígeno, la solubilidad aumenta. Esta propiedad es de particular importancia en los sistemas acuáticos y en la respiración de los organismos acuáticos, algo extrapolable a la gestión del oxígeno en bodega.

B. Propiedades químicas

Reactividad y estabilidad: El oxígeno es un elemento altamente reactivo. Es capaz de reaccionar con la mayoría de los elementos y compuestos, lo que lo convierte en un agente oxidante. Sin embargo, el oxígeno en sí mismo es relativamente estable debido a la configuración electrónica de su capa de valencia, que está compuesta por seis electrones.

Afinidad electrónica y electronegatividad: El oxígeno tiene una alta afinidad electrónica, lo que significa que tiene una tendencia a ganar electrones y formar iones negativos. Además, tiene una alta electronegatividad, lo que indica que atrae fuertemente los electrones en un enlace químico. Estas propiedades hacen que el oxígeno sea un elemento crucial en las reacciones de oxidación y reducción.

Oxidación y reducción: El oxígeno es un poderoso agente oxidante y participa en muchas reacciones de oxidación en la naturaleza y en la industria. Durante estas reacciones, el oxígeno gana electrones y se reduce. Por otro lado, el oxígeno también puede actuar como agente reductor en ciertas condiciones, especialmente en presencia de sustancias altamente reactivas.

1.3.- La medida del oxígeno

La medida del oxígeno disuelto en el vino requiere de una serie de reflexiones para entender la importancia de la medida en distintas situaciones. En primer lugar, cuando en un depósito que no está completamente lleno de vino hay un espacio gaseoso, es la **Ley de los gases ideales** la que permite conocer el contenido en oxígeno en este espacio gaseoso y en condiciones normales, lleno de aire a la presión atmosférica. Otra situación diferente es cuando el espacio de cabeza gaseoso está a una presión superior a la atmosférica, por ejemplo, de 2 bar.

Para calcular la presión parcial del oxígeno es necesario considerar la contribución de otros gases presentes, empleando la **Ley de Dalton** que establece que la presión parcial de un gas en una mezcla es igual a la presión total de la mezcla multiplicada por la fracción molar del gas. Sin embargo, cuando se quiere conocer la cantidad de oxígeno disuelto en un vino que está en equilibrio con el espacio de cabeza

del depósito, se considera la **Ley de Henry** que establece que la cantidad de oxígeno disuelto es directamente proporcional a la presión parcial del oxígeno en el gas en equilibrio con el vino.

1.3.1.- La ley de los gases ideales

La ley de los gases ideales es una relación matemática que describe el comportamiento de los gases en condiciones ideales. **Esta ley establece que, a una temperatura y volumen constantes, la presión de un gas es directamente proporcional a la cantidad de moles del gas presente.** Matemáticamente, se expresa de la siguiente manera:

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

Donde:

- P es la presión del gas en unidades de presión (por ejemplo, atmósferas, kilopascales).
- V es el volumen del gas en unidades de volumen (por ejemplo, litros).
- n es la cantidad de moles del gas.
- R es la constante de los gases ideales (0,0821 atm·L/mol·K o 8,314 J/mol·K).
- T es la temperatura absoluta en unidades de temperatura (por ejemplo, Kelvin).

Esta ecuación muestra que, a temperatura y volumen constantes, si la cantidad de moles de gas aumenta, la presión también aumentará.

Ejemplo 1:

Para ilustrar el uso de la ley de los gases ideales en la vinificación, se considera un depósito que contiene 500 litros de gas. Si la temperatura del depósito se mantiene constante a 25°C (298 K) y la cantidad de moles de oxígeno presente es de 2 moles, se puede calcular la presión del oxígeno utilizando la ley de los gases ideales.

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

$$P \cdot 500 \text{ L} = 2 \text{ mol} \cdot 0,0821 \text{ atm} \cdot \text{L/mol} \cdot \text{K} \cdot 298 \text{ K}$$

Despejando P:

$$P = (2 \text{ mol} \cdot 0,0821 \text{ atm} \cdot \text{L/mol} \cdot \text{K} \cdot 298 \text{ K}) / 500 \text{ L}$$

Calculando el resultado, se obtiene:

$$P = 0,098 \text{ atm}$$

Para convertir la presión del oxígeno de 0,098 atm a hPa, hay que recordar que 1 atmósfera equivale a 1013,25 hPa. Utilizando esta conversión, se puede realizar el cálculo:

$$\text{Presión en hPa} = \text{Presión en atm} \cdot 1013,25 \text{ hPa/atm}$$

$$\text{Presión en hPa} = 0,098 \text{ atm} \cdot 1013,25 \text{ hPa/atm}$$

$$\text{Presión en hPa} = 99,25 \text{ hPa}$$

Por lo tanto, la presión parcial del oxígeno en el depósito es aproximadamente igual a 99,25 hPa.

La ley de los gases ideales es una herramienta fundamental en la comprensión del comportamiento de los gases en la vinificación y otras aplicaciones industriales. Permite estimar la presión de los gases y su relación con la cantidad de moles presentes, lo cual es crucial para controlar y regular la concentración de oxígeno durante la vinificación y otros procesos relacionados con alimentos y bebidas.

1.3.2.- La ley de Dalton de las presiones parciales

La ley de Dalton de las presiones parciales establece que la presión total de una mezcla de gases es igual a la suma de las presiones parciales individuales de cada gas presente. Esta ley es aplicable cuando los gases no reaccionan químicamente entre sí y ocupan el mismo volumen.

Matemáticamente, la ley de Dalton se expresa de la siguiente manera:

$$P_{\text{total}} = P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_n$$

Donde:

- P_{total} es la presión total de la mezcla de gases.
- $P_1, P_2, P_3, \dots, P_n$ son las presiones parciales de los gases individuales presentes en la mezcla.

La ley de Dalton es útil en vinificación para calcular la presión parcial del oxígeno en un depósito o en el espacio de cabeza de una botella de vino, considerando la contribución de otros gases presentes, como el dióxido de carbono producido durante la fermentación.

Ejemplo 2:

Un ejemplo de cómo utilizar la ley de Dalton en la vinificación. Suponiendo que en un depósito de fermentación se encuentra una mezcla de gases que consiste en 0,9 atmósferas de dióxido de carbono (CO_2) y 0,1 atmósferas de oxígeno (O_2), se determina la presión total en el depósito.

Para convertir atmósferas a hPa, se utiliza la relación de conversión $1 \text{ atm} = 1013,25 \text{ hPa}$.

Por lo tanto, se realiza el cálculo:

$$\text{Presión en hPa del } \text{CO}_2 = \text{Presión en atm} \cdot 1013,25 \text{ hPa/atm} = 0,9 \text{ atm} \cdot 1013,25 \text{ hPa/atm} \approx 912,93 \text{ hPa}$$

$$\text{Presión en hPa del } \text{O}_2 = \text{Presión en atm} \cdot 1013,25 \text{ hPa/atm} = 0,1 \text{ atm} \cdot 1013,25 \text{ hPa/atm} \approx 101,325 \text{ hPa}$$

Aplicando la ley de Dalton, se suman las presiones parciales de CO_2 y O_2 :

$$P_{\text{total}} = P_{\text{CO}_2} + P_{\text{O}_2}; P_{\text{total}} = 912,93 \text{ hPa} + 101,325 \text{ hPa}$$

$$P_{\text{total}} = 1014,25 \text{ atm}$$

Por lo tanto, la presión total en el depósito de fermentación sería prácticamente de 1,0 atmósferas.

La ley de Dalton también puede aplicarse en el embotellado para calcular la presión parcial del oxígeno en el espacio de cabeza de una botella de vino taponada. Si conocemos las presiones parciales de los gases presentes en el espacio de cabeza, podemos determinar la presión parcial del oxígeno utilizando la ley de Dalton.

Ejemplo 3:

Para determinar la presión parcial del oxígeno que está en equilibrio en un depósito parcialmente lleno de vino con un espacio de cabeza de aire a una presión de 2 bar, es necesario considerar la ley de Dalton, que establece que la presión parcial de un gas en una mezcla es igual a la presión total de la mezcla multiplicada por la fracción molar del gas.

En este caso, el aire en el espacio de cabeza contiene varios gases, incluyendo oxígeno. Si se asume que el oxígeno es el único gas relevante en términos de su presencia y solubilidad en el vino, se puede calcular su presión parcial. Dado que la presión total en el depósito es de 2 bar, se puede expresar la presión parcial del oxígeno (P_{O_2}) como:

$$P_{O_2} = \text{Presión total} \cdot \text{Fracción molar de oxígeno}$$

Para obtener la fracción molar del oxígeno, se necesitaría conocer la composición exacta del aire en el espacio de cabeza, lo cual puede variar. Sin embargo, como referencia, se estima que el oxígeno constituye aproximadamente el 21% del aire atmosférico.

Si se considera una composición del aire en el espacio de cabeza similar a la atmósfera (21% de oxígeno), se puede calcular la presión parcial del oxígeno:

$$P_{O_2} = 2 \text{ bar} \cdot 0,21 \approx 0,42 \text{ bar} = 425,46 \text{ hPa}$$

Por lo tanto, en este escenario, la presión parcial del oxígeno en el espacio gaseoso en equilibrio con el vino sería aproximadamente 0,42 bar.

Luego la presión del gas del espacio de cabeza de un depósito o de una botella cerrados tiene un papel fundamental en la determinación del oxígeno disuelto del líquido (en nuestro caso vino), ya que la presión parcial del gas en el líquido será la misma que la del espacio gaseoso con el que está en equilibrio (Figura 1.1)

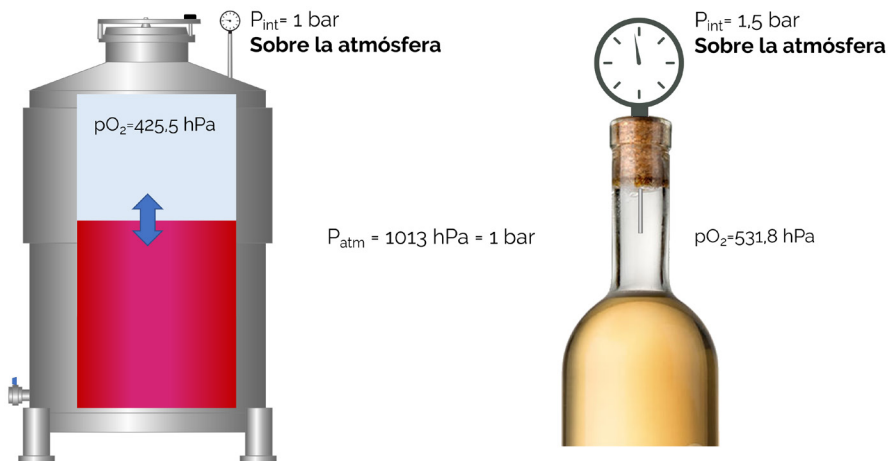


Fig. 1.1. Presión parcial del oxígeno en condiciones de presión total diferentes a la atmosférica. La presión total es la suma de la atmosférica y la que se mide con un manómetro.

Es importante tener en cuenta que la ley de Dalton asume que los gases no reaccionan químicamente entre sí y que ocupan el mismo volumen. En condiciones reales, pueden existir interacciones entre los gases y puede haber diferencias de solubilidad que afecten a las presiones parciales.

Sin embargo, para fines prácticos, **la ley de Dalton es una herramienta útil en la vinificación para estimar las presiones parciales de los gases presentes y evaluar su impacto en el proceso y en las propiedades del vino.**

Ejemplo 4:

En un depósito de fermentación se encuentra una mezcla de gases que consiste en 900 hPa de dióxido de carbono (CO_2) y 10 hPa de oxígeno (O_2), y la humedad relativa del aire en el depósito es del 80%. Se quiere determinar la presión parcial del oxígeno considerando el efecto de la presión parcial del vapor de agua. Se supone que la temperatura en el depósito es de 25°C.

La presión parcial del vapor de agua se puede calcular utilizando la relación de la humedad relativa y la presión de vapor saturado del agua a una determinada temperatura.

La presión de vapor saturado del agua a 25°C es de aproximadamente 238 hPa. La humedad relativa del 80% indica que el aire contiene el 80% de la cantidad máxima de vapor de agua que podría contener a esa temperatura.

Por lo tanto, la presión parcial del vapor de agua sería: $P_{\text{v}_{\text{H}_2\text{O}}} = 0,80 \cdot 238 \text{ hPa} = 190,4 \text{ hPa}$

Ahora, para determinar la presión parcial del oxígeno, se puede utilizar la ley de Dalton de las presiones parciales:

$$P_{\text{total}} = P_{\text{CO}_2} + P_{\text{O}_2} + P_{\text{v}_{\text{H}_2\text{O}}} = 900 \text{ hPa} + 10 \text{ hPa} + 190,4 \text{ hPa} = 1100,4 \text{ hPa}$$

Por lo tanto, considerando el efecto de la humedad relativa del aire y la presión parcial del vapor de agua, la cantidad de oxígeno en el depósito de fermentación sería de aproximadamente:

$$\% \text{O}_2 = (10 \text{ hPa} / 1100,4 \text{ hPa}) \cdot 100 = 0,91\%$$

Este ejemplo ilustra cómo la humedad relativa del aire y la presión parcial del vapor de agua pueden afectar a las presiones parciales de los gases en una mezcla. Es importante considerar estos factores en la vinificación, ya que la presión parcial del oxígeno puede influir en la actividad microbiana, la cinética fermentativa y las propiedades del vino. Controlar la humedad relativa y tener en cuenta las interacciones entre los gases y el vapor de agua es esencial para lograr un control preciso del ambiente en el proceso de vinificación.

La presión parcial del vapor de agua en la atmósfera se puede calcular utilizando la relación entre la humedad relativa y la presión de vapor saturado del agua a una determinada temperatura. Hay varias ecuaciones que se utilizan para calcular esta última, siendo la ecuación de Magnus-Tetens la base de muchas de ellas.

La presión del vapor de agua para una HR específica, se calcula a partir de la presión de saturación de agua para una determinada temperatura de la siguiente forma:

$$P_{v_{H_2O}} = P_{\text{saturación}} \cdot HR / 100$$

Donde:

- $P_{v_{H_2O}}$ es la presión parcial del vapor de agua en hPa o mbar (hectoPascales o milibar).
- $P_{\text{saturación}}$ es la presión de vapor saturado del agua a la temperatura dada.
- HR es la humedad relativa del aire expresada como un porcentaje.

El ejemplo 5 ilustra cómo calcular la presión parcial del vapor de agua para una HR concreta:

Ejemplo 5:

La temperatura en un área es de 25°C y la humedad relativa del aire es del 70%. Se quiere calcular la presión parcial del vapor de agua en la atmósfera.

Primero, se necesita determinar la presión de vapor saturado del agua a 25°C. Utilizando tablas o ecuaciones específicas, se encuentra que la presión de vapor saturado a 25°C es aproximadamente 23,8 hPa o 23,8 mbar.

Aplicando la ecuación anterior, se calcula la presión parcial del vapor de agua:

$$P_{v_{H_2O}} = 23,8 \text{ hPa} \cdot 70 / 100 \quad P_{v_{H_2O}} = 16,66 \text{ hPa}$$

Es importante tener en cuenta que las ecuaciones que determinan la presión del vapor de saturación son correlaciones empíricas y puede haber algunas ecuaciones más precisas que otras dependiendo del rango de temperaturas considerado. Además, la presión parcial del vapor de agua puede variar con la altitud y las condiciones locales.

Para poder determinar entonces la presión del vapor de agua, es necesario calcular la presión de vapor saturado del agua que es función de la temperatura. Existen varias ecuaciones, siendo algunas de las más utilizadas las siguientes:

- **Ecuación de Antoine:**

La ecuación de Antoine es una ecuación empírica que relaciona la presión de vapor saturado del agua con la temperatura.

Tiene la siguiente forma:

$$\log(P) = A - \left(\frac{B}{T + C} \right)$$

Donde:

- P es la presión de vapor saturado en unidades de presión (generalmente en hPa).
- T es la temperatura en grados Celsius.
- A, B y C son constantes específicas para cada sustancia. Para el agua: A = 8,07131; B = 1730,63 y C = 233,426; Para el etanol: A = 7,96681; B = 1668,21 y C = 228,1

Las constantes A, B y C varían dependiendo de la escala de temperatura utilizada. Hay diferentes conjuntos de constantes que se ajustan a diferentes rangos de temperatura. Algunos conjuntos de constantes ampliamente utilizados son el conjunto de Antoine para temperatura en °C, el conjunto de Antoine para temperatura en °F y el conjunto de Antoine para temperatura en K.

- **Ecuación de Clausius-Clapeyron:**

La ecuación de Clausius-Clapeyron es una ecuación que relaciona la presión de vapor con la temperatura y la entalpía de vaporización.

En su forma logarítmica, se puede expresar de la siguiente manera:

$$\ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right) = \frac{\Delta H_{vap}}{R} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)$$

Donde:

- P_1 y P_2 son las presiones de vapor (en las unidades de presión en las que se exprese la entalpía de vaporización) a dos temperaturas T_1 y T_2 en Kelvin..
- ΔH_{vap} es la entalpía de vaporización del agua kJ/mol a una presión dada (por ejemplo: 1013 hPa).
- R es la constante de los gases ideales (8,3145 J/mol.K).

La entalpía de vaporización (ΔH_{vap}) es una propiedad termodinámica que representa la energía necesaria para convertir una sustancia líquida en vapor a una temperatura y presión dadas.

Estas ecuaciones, como la ecuación de Antoine y la ecuación de Clausius-Clapeyron, son solo dos ejemplos de las ecuaciones utilizadas para calcular la presión de vapor saturado del agua en función de la temperatura. Existen otras ecuaciones específicas que se ajustan a diferentes rangos de temperatura y ofrecen diferentes niveles de precisión.

En la práctica, se utilizan tablas o software especializado que ya contienen los valores calculados para facilitar la obtención de la presión de vapor saturado a una temperatura determinada.

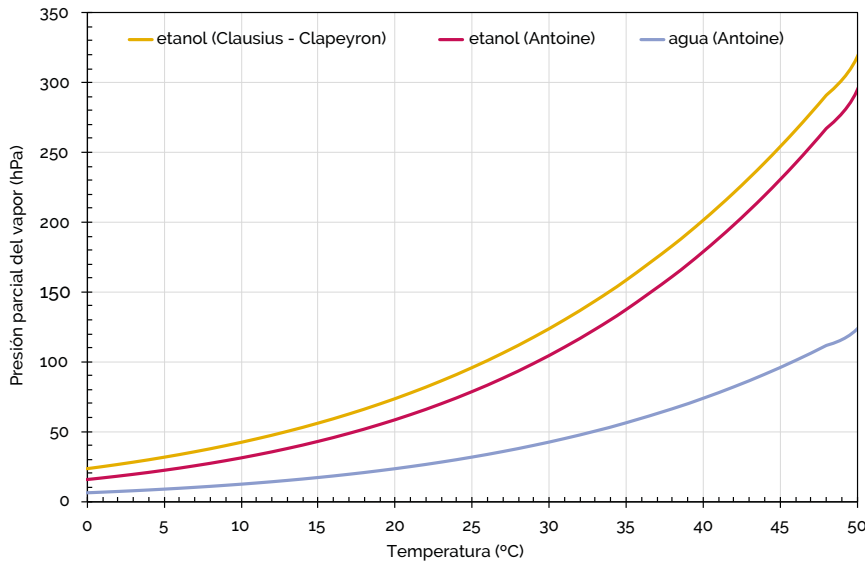


Fig. 12. variación de la presión del vapor de agua y de etanol presión calculada con ambas ecuaciones con la temperatura

Algunos ejemplos

Ejemplo 6:

Agua. Utilizando la ecuación de Antoine y el conjunto de constantes para temperatura en °C, se puede calcular la presión de vapor saturado del agua a 15°C:

$$\log(P) = 8,07131 - \left(\frac{1730,63}{233,426 + 15} \right) = 1,10025$$

Aplicando la función exponencial, obtenemos: $P = 10^{1,10025}$; $P \approx 12,64$ hPa
 Por lo tanto, la presión de vapor saturado del agua a 15°C es de aproximadamente 12,64 hPa.

Ejemplo 7:

Etanol. Utilizando nuevamente la ecuación de Antoine y las constantes específicas para el etanol:

$$\log(P) = 7,96681 - \left(\frac{1668,21}{228,1 + 15} \right) = 1,04097$$

Aplicando la función exponencial, obtenemos: $P = 10^{1,04097}$ $P \approx 11,32$ hPa
 Por lo tanto, la presión de vapor saturado del etanol a 15°C es de aproximadamente 11,32 hPa.

Ejemplo 8:

Calcular la presión de vapor saturado de la mezcla de etanol y agua a 15°C con una composición de 14,5% V/V de etanol y el resto agua. Se utiliza la ecuación de Raoult para este cálculo.

Primero, es necesario conocer las presiones de vapor saturado del etanol y el agua a 15°C. Utilizando la ecuación de Antoine para el etanol y el agua, se pueden utilizar los valores calculados en los ejemplos anteriores.

Ahora, se puede calcular la presión de vapor saturado de la mezcla utilizando la ecuación de Raoult:

$$P_{mezcla} = x_{etanol} \cdot P_{v_{etanol}} + x_{agua} \cdot P_{v_{H2O}}$$

Donde:

- x_{etanol} es la fracción molar de etanol en la mezcla (0,145 en este caso).
- x_{agua} es la fracción molar de agua en la mezcla (1 - 0,145 = 0,855 en este caso).
- $P_{v_{etanol}}$ y $P_{v_{H2O}}$ son las presiones de vapor saturado del etanol y el agua, respectivamente.

Calculando la presión de vapor saturado de la mezcla:

$$P_{mezcla} = 0,145 \cdot 11,32 \text{ hPa} + 0,855 \cdot 12,64 \text{ hPa} \approx 12,25 \text{ hPa}$$

Por lo tanto, la presión de vapor saturado de la mezcla de etanol y agua con una composición de 14,5% V/V de etanol y el resto agua a 15°C sería aproximadamente de 12,25 hPa.

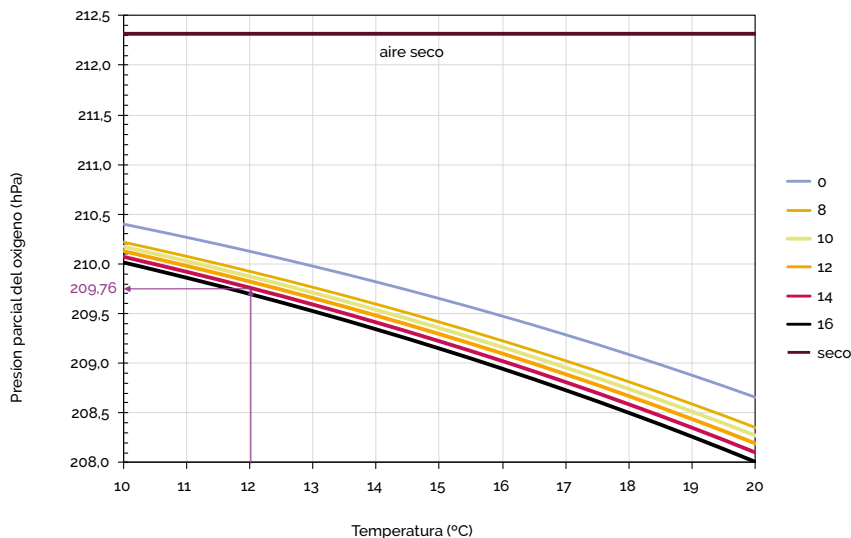
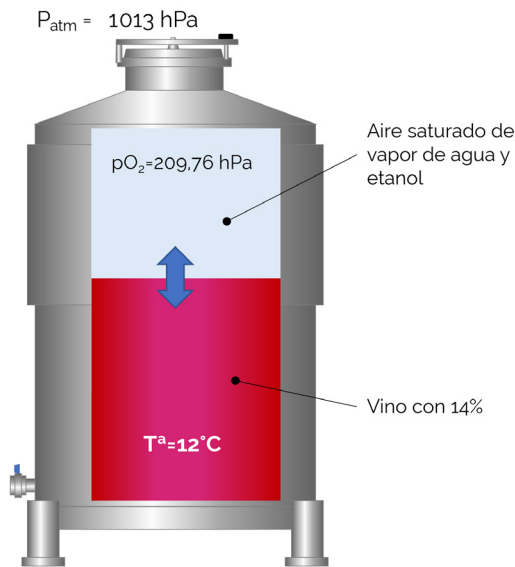


Figura 13. Variación con la temperatura de la presión parcial de oxígeno del aire seco y del aire saturado con el vapor de agua y etanol para diferentes grados alcohólicos (8-16 % V/V) a la presión de 1 atmósfera (1013 mbar)



Considerando el efecto descrito en la *Figura 1.3* en un caso de un depósito cerrado, parcialmente lleno de vino con 14 % V/V y almacenado a una temperatura de 12°C (*Figura 1.4*), con un espacio de cabeza (en la parte superior) donde la presión parcial del oxígeno es de 209,76 hPa, si está en equilibrio y no consume oxígeno, el vino del depósito también tendrá esa presión parcial de oxígeno.

Fig. 14. Ejemplo de un depósito con el espacio de gaseoso presurizado

1.3.3.- La ley de Henry para gases disueltos en líquidos

La Ley de Henry establece que la cantidad de gas disuelto en un líquido es directamente proporcional a la presión parcial del gas en equilibrio con el líquido.

Matemáticamente, se expresa de la siguiente manera:

$$C = k \cdot P$$

Donde:

- C es la concentración del gas disuelto en el líquido.
- k es la constante de Henry.
- P es la presión parcial del gas en contacto con el líquido.

La constante de Henry es específica para cada gas y líquido, así como para la temperatura, la presión total del sistema y la composición de la mezcla. En el caso del oxígeno disuelto en vino o en una mezcla de etanol y agua, se puede utilizar la Ley de Henry para calcular su concentración en mg/L en función de la presión parcial del oxígeno. Para un cálculo preciso y específico, se requeriría información adicional sobre la composición exacta de la mezcla y las constantes de Henry específicas para el tipo de vino o para esa mezcla en particular. Además, la constante de Henry en vinos puede ser influenciada por factores como la variedad de uva utilizada, el proceso de vinificación, el contenido de alcohol, la acidez y la temperatura de almacenamiento, entre otros.

A continuación, se presenta un ejemplo simplificado para ilustrar el uso de la Ley de Henry para calcular el oxígeno disuelto en una mezcla al 14% V/V de etanol en agua a 15°C .

Ejemplo 9:

Suponiendo que la presión parcial del oxígeno en contacto con la mezcla es de 1 atm (1013,25 hPa) a una temperatura determinada. Se quiere calcular la concentración de oxígeno disuelto en la mezcla utilizando la Ley de Henry.

En primer lugar, se necesita conocer la constante de Henry (k) para el oxígeno en la mezcla de etanol y agua a la temperatura específica. Esta constante depende de la temperatura y la composición del líquido.

Una vez conocida la constante de Henry, se puede utilizar la Ley de Henry para calcular la concentración de oxígeno disuelto (C) en función de la presión parcial del oxígeno (P):

$$C = k \cdot P$$

En este caso, P sería la presión parcial del oxígeno (1 atm o 1013,25 hPa) y k sería la constante de Henry para la mezcla de etanol y agua a la temperatura dada.

Lamentablemente, no se han encontrado referencias específicas que proporcionen la constante de Henry para una mezcla de 14% V/V de etanol y 86% de agua a 15°C.

La mayoría de las fuentes científicas suelen reportar constantes de Henry para mezclas con proporciones más comunes, como 10%, 20%, 30%, etc. Sin embargo, es posible realizar una aproximación utilizando los valores disponibles más cercanos.

Basándose en los datos disponibles, se puede inferir que la constante de Henry para una mezcla de 14% de etanol y 86% de agua a 15°C se encuentra en el rango de 0,0338 a 0,0349 mol/Latm (1,067 a 1,102 mg/L.hPa). Estos valores corresponden a mezclas con proporciones similares y temperaturas cercanas.

La constante de Henry en vinos, específicamente para el oxígeno disuelto en el vino, puede variar en función de diversos factores dentro del mismo tipo de vino, como la composición del vino, la temperatura y la presión. Sin embargo, en general, la constante de Henry para el oxígeno en vinos se encuentra en el rango de 0,015 a 0,040 mol/Latm (0,474 a 1,263 mg/L.hPa).

Cabe mencionar que la determinación precisa de la constante de Henry en vinos puede requerir técnicas y equipos especializados, como la cromatografía gaseosa o la espectroscopía. Además, es posible que la constante de Henry en vinos varíe según el tipo de vino, como vinos blancos, tintos, espumosos, etc.

La constante de Henry y la solubilidad están relacionadas en el contexto de la solubilidad de un gas en un líquido. La constante de Henry es una constante de proporcionalidad que relaciona la presión parcial de un gas en la fase gaseosa con su concentración en el líquido cuando la solubilidad es baja.

1.3.4.- La solubilidad del oxígeno en el vino

La solubilidad de un gas en un líquido se refiere a la cantidad absoluta de gas que puede disolverse en un líquido. Es una medida de la cantidad de gas que se puede disolver en una determinada cantidad de líquido a una temperatura y presión dadas. La solubilidad se expresa generalmente como la cantidad de gas disuelto por unidad de volumen de líquido. Sin embargo, la constante de Henry proporciona una relación cuantitativa entre la presión parcial del gas y su concentración en la fase líquida. La constante de Henry es útil para describir la capacidad de un líquido para retener un gas específico y se utiliza para calcular la concentración del gas disuelto en función de su presión parcial. El conocimiento de la solubilidad del oxígeno en el vino es necesario para expresar en mg/L el contenido en oxígeno disuelto, para ello se hace necesario revisar algunos conceptos importantes que se describen a continuación.

Existen diferentes formas de expresar la solubilidad de un gas en un líquido:

- *Solubilidad molar:* Se refiere a la cantidad de moles de gas disueltos en un litro (o cualquier otra unidad de volumen) de líquido. Se expresa en moles por litro (mol/L) o en otras unidades de concentración molar.
- *Solubilidad en masa:* Se refiere a la cantidad de masa de gas disuelto en una determinada cantidad de líquido. Se expresa en gramos por litro (g/L) u otras unidades de concentración de masa.
- *Fracción molar:* Es una forma de expresar la solubilidad en términos de la fracción del gas en la fase líquida en comparación con la fase gaseosa. Se calcula dividiendo la cantidad de moles del gas disuelto entre la suma de los moles del gas disuelto y los moles del gas en la fase gaseosa.
- *Coefficiente de solubilidad:* Es una medida de la solubilidad relativa de un gas en un líquido. Se define como la relación entre la concentración del gas disuelto en el líquido y la presión parcial del gas en la fase gaseosa. Se expresa generalmente en unidades como mol/Latm, mol/LkPa o g/Latm, dependiendo de las unidades utilizadas para la solubilidad y la presión parcial.

La solubilidad de un gas en un líquido depende de varios factores, como la naturaleza del gas y del líquido, la temperatura y la presión. Estos factores influyen en la interacción entre las moléculas del gas y las moléculas del líquido, afectando la capacidad de disolución del gas en el líquido.

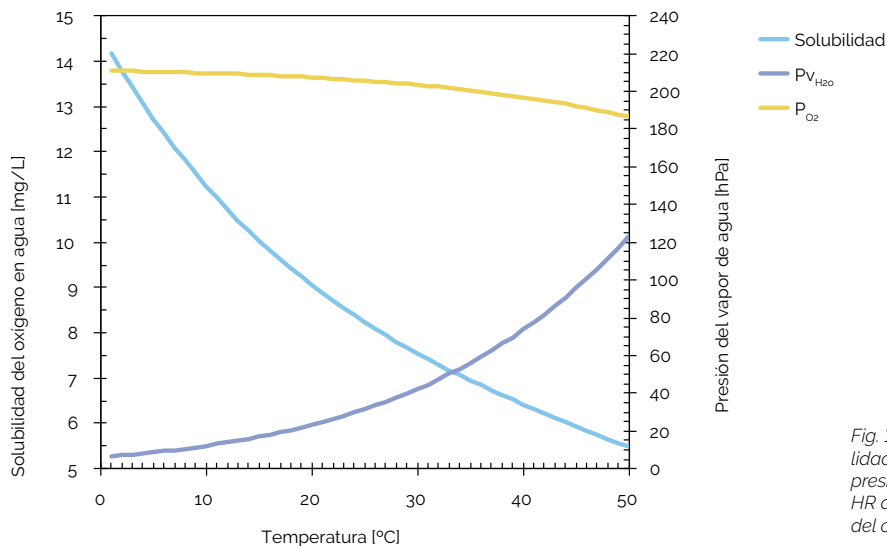


Fig. 15. Variación de la solubilidad del oxígeno en agua, la presión del vapor de agua con HR del 100% y la presión parcial del oxígeno con la temperatura

La solubilidad del oxígeno en el agua depende de la temperatura y puede describirse utilizando el coeficiente de absorción Bunsen (T^a) y la presión parcial de oxígeno P_{O_2} según la ecuación:

$$c_s = \frac{P_{O_2} - P_{v_{H_2O}}}{P_N} \cdot \alpha$$

Donde:

- C_s es el coeficiente de solubilidad del oxígeno en el agua, expresado en $\text{cm}^3 \text{O}_2/\text{cm}^3$, es dependiente de la temperatura
- p_{O_2} es la presión parcial del oxígeno
- P_N es la presión estándar (1013 mbar)
- α es el coeficiente de absorción de Bunsen expresado en $\text{cm}^3 \text{O}_2/\text{cm}^3$
- $P_{v_{H_2O}}$ es la presión de vapor del agua

Al aumentar la temperatura, la solubilidad del oxígeno en el agua disminuye. Esta dependencia de la temperatura se puede expresar mediante el ajuste de un modelo general de una serie de potencias^[1]

$$\alpha(T) \cdot 10^3 = 48,998 - 1,335 \cdot T + 2,755 \cdot 10^{-2} \cdot T^2 - 3,220 \cdot 10^{-4} \cdot T^3 + 1,598 \cdot 10^{-6} \cdot T^4$$

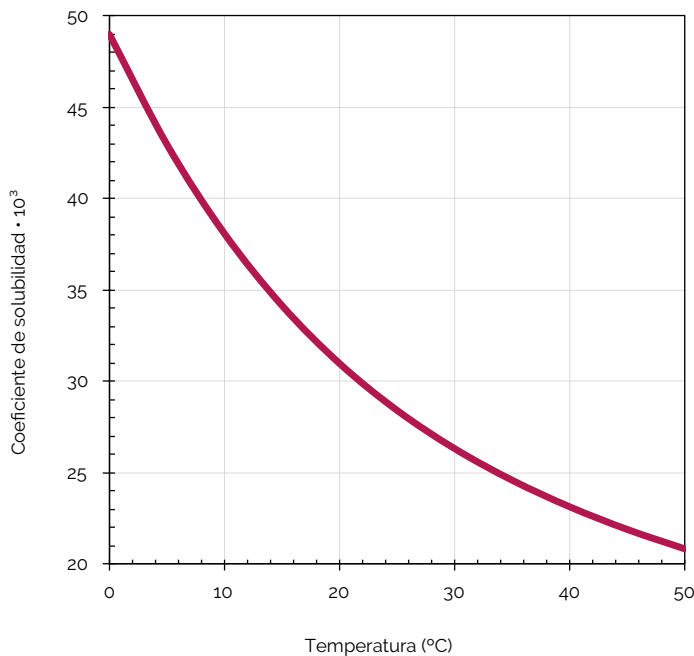


Fig. 16. variación del coeficiente de solubilidad de Bunsen del oxígeno en agua

No existe un coeficiente de solubilidad del oxígeno en el vino único, posiblemente por su variabilidad, de ahí que todos los sistemas de medida de oxígeno que ofrecen la unidad de mg/L de oxígeno disuelto en el vino, especifican que la medida se hace en base a la solubilidad del oxígeno en agua. .

1.3.5.- Unidades de medida de la concentración de oxígeno en un fluido

La elección de la unidad depende del contexto y las convenciones específicas utilizadas en cada campo de aplicación.

Las unidades de medida comunes para el oxígeno en su forma gaseosa se detallan a continuación:

- *% de oxígeno*: Se refiere al porcentaje de oxígeno presente en una mezcla gaseosa en relación con el total de gases presentes en esa mezcla. Es una medida que indica la proporción de oxígeno en comparación con otros componentes gaseosos en una muestra determinada.
- *% de aire de saturación*: Es una medida que indica el porcentaje de oxígeno presente en un gas en relación con su capacidad máxima de saturación a una determinada presión y temperatura.
- *hectopascuales (hPa)*: Es equivalente a 100 pascuales (Pa). El pascal es la unidad del Sistema Internacional (SI) para la presión. Un pascal es igual a un newton por metro cuadrado (N/m²). Es una unidad de presión más pequeña que la atmósfera y se usa comúnmente en aplicaciones científicas y técnicas.
- *Milibares (mbar)*: El milibar es una unidad de presión equivalente a 0,1 kilopascuales o 1 hectopascuales. Se usa comúnmente para medir la presión atmosférica.
- *Atmósferas (atm)*: La presión parcial del oxígeno en un gas se puede expresar en atmósferas, que es una unidad de presión. Una atmósfera es aproximadamente igual a la presión atmosférica al nivel del mar, que es de aproximadamente 1013,25 milibares o hPa.
- *Torr (Torr)*: El torr es una unidad de presión utilizada en algunas aplicaciones científicas y médicas. Es igual a 1/760 de una atmósfera y aproximadamente igual a 1,333 milibares.
- *Partes por millón (ppm) de O₂*: significa partes por millón y se utiliza para expresar concentraciones de sustancias en una mezcla. Una ppm de O₂ en aire indica que, por cada millón de partes de aire, hay una parte de oxígeno. Igualmente sirve para expresar 1 mg/kg o 1 µL/L.

Es importante saber cómo realizar el cambio entre unidades, que, aunque parece engorroso, resulta fácil y puede ser muy rápido.

Para realizar el cambio entre el porcentaje de oxígeno (%O₂) y el porcentaje de aire de saturación (% de aire saturado), es necesario recordar la composición del aire y cómo se relaciona con la cantidad de oxígeno presente.

El aire se compone principalmente de nitrógeno (N₂) y oxígeno (O₂), con trazas de otros gases. La fracción de oxígeno en el aire se puede expresar como el porcentaje de volumen de O₂ en el aire seco.

La ecuación básica para convertir entre %O₂ y % de aire saturado es la siguiente:

$$\% \text{ de aire saturado} = \left(\frac{\% \text{O}_2}{20,95} \right) \cdot 100$$

Donde 20,95 es el porcentaje de oxígeno en volumen en el aire seco.

Ejemplo 11:

Con un porcentaje de oxígeno de 16% (%O₂), se puede calcular el equivalente en % de aire saturado de la siguiente manera:

$$\% \text{ de aire saturado} = \left(\frac{16}{20,95} \right) \cdot 100 = 76,37\%$$

Esto significa que un 16% de oxígeno en volumen es equivalente a un 76,37% de aire saturado

Es importante destacar que esta ecuación asume que la concentración de otros gases en el aire no varía. Sin embargo, en realidad, la presencia de otros gases en el aire puede afectar ligeramente a los resultados. Por lo tanto, es recomendable utilizar esta conversión como una estimación aproximada y considerar las condiciones específicas del entorno. Esta ecuación es válida para convertir entre %O₂ y % de aire de saturación en condiciones normales. Si estás trabajando en condiciones diferentes, como alta presión o temperatura, es posible que se requieran ecuaciones o correcciones adicionales.

Para convertir el % O₂ de una masa gaseosa a ppm de O₂, si el oxígeno representa aproximadamente el 21% en volumen, equivale a 210.000 ppm de O₂. Esto significa que, por cada millón de partes de aire, aproximadamente 210.000 partes son de oxígeno.

$$\text{ppm O}_2 = \frac{\% \text{O}_2}{10000} = \% \text{ de aire saturado} \cdot \left(\frac{20,95}{100} \right) \cdot \left(\frac{1}{10000} \right)$$

La medida más habitual de expresar la presión parcial de oxígeno (P_{O₂}) es el hPa, y su obtención a partir del %O₂ o % de aire de saturación se calcula para una temperatura determinada que determina la presión de vapor del agua (P_{v_{H2O}}):

$$P_{\text{O}_2} [\text{hPa}] = (P_{\text{atm}} - P_{v_{\text{H}_2\text{O}}}) \cdot \% \text{O}_2 = (P_{\text{atm}} - P_{v_{\text{H}_2\text{O}}}) \cdot \left(\frac{\% \text{ de aire saturado}}{100} \right) \cdot 20,95$$

Las unidades de medida más utilizadas para el oxígeno disuelto en un líquido son las siguientes:

- *Miligramos por litro (mg/L)*: Es una medida de la concentración de oxígeno disuelto en un líquido, expresada en miligramos de oxígeno por litro de líquido. Esta unidad es comúnmente utilizada en análisis de agua y control de calidad y por ende, la más deseada en enología.
- *Partes por millón (ppm)*: Es una unidad de medida que indica la cantidad de oxígeno disuelto en un millón de partes de líquido. Por ejemplo, 1 ppm en masa de oxígeno significa que hay un miligramo de oxígeno disuelto en un millón de miligramos (o un litro) de líquido.
- *Miliequivalentes por litro (meq/L)*: Esta unidad se utiliza para expresar la concentración de oxígeno disuelto en forma de equivalentes químicos. Un equivalente de oxígeno es la cantidad de oxígeno que tiene la capacidad de reaccionar con una cantidad específica de otra sustancia.

- *Porcentaje de saturación (%):* Esta medida indica el grado de saturación de oxígeno en relación con la capacidad máxima de disolución del líquido a una temperatura y presión determinadas. Por ejemplo, un 100% de saturación significa que el líquido ha alcanzado su capacidad máxima de disolución de oxígeno.

Para calcular la concentración de oxígeno disuelto en un vino a partir de la presión parcial del gas en el líquido, se puede utilizar la Ley de Henry descrita en apartados anteriores, que establece que la concentración de un gas disuelto en un líquido es directamente proporcional a su presión parcial. La ecuación de la Ley de Henry es la siguiente:

$$C = k \cdot P$$

Donde: C: Concentración de oxígeno disuelto en el vino; k: Constante de Henry para el oxígeno en el vino y P: Presión parcial del oxígeno en el vino.

Ejemplo 12:

un vino está a una temperatura de 15°C y en un entorno con una humedad relativa (HR) del 80%, y la presión atmosférica es de 1013 hPa.

Paso 1: Calcular la presión parcial del oxígeno en el vino. Para ello, se utiliza la humedad relativa para determinar la presión parcial del vapor de agua en el entorno y luego se resta esta presión al valor de la presión atmosférica.

Presión del vapor de agua en el entorno: Utilizando la ecuación de Antoine o datos tabulados específicos para el agua a 15°C, se obtiene la presión del vapor de agua en saturación como sigue:

$$P_{v_{H_2O}} = 13,54 \cdot \exp(16,342 - 3830,183 / (15 + 273,15))$$

$$\text{Presión del vapor de agua en el entorno} = P_{v_{H_2O}} \cdot HR / 100$$

Paso 2: Calcular la presión parcial del oxígeno en el vino. Se resta la presión del vapor de agua al valor de la presión atmosférica:

$$P_{O_2_{vino}} = P_{atmosférica} - P_{v_{H_2O}}$$

Paso 3: Calcular la concentración de oxígeno disuelto en el vino. Se utiliza la ecuación de la Ley de Henry, considerando la constante de Henry específica para el oxígeno en el vino:

$$C = k \cdot P_{O_2_{vino}}$$

El valor de la constante de Henry (k) dependerá de las condiciones específicas del vino y puede variar como se ha explicado anteriormente. Puede obtenerse a través de fuentes bibliográficas o mediante estudios específicos para el vino en cuestión.

Una vez que se conozca el valor de k, se puede calcular la concentración de oxígeno disuelto en el vino.

No siempre se dispone del valor de la constante de Henry del oxígeno en el vino y se utiliza el coeficiente de solubilidad. El más utilizado es el coeficiente de solubilidad de Bunsen, que en el caso del oxígeno se utiliza para describir su solubilidad en el agua a una temperatura y presión determinadas.

Las tecnologías portátiles para la medida del oxígeno disuelto que se usan hoy en día en bodega realizan la medida de la presión parcial de oxígeno en el líquido que se está midiendo. **Estos sistemas son capaces de transformar el vapor de la presión parcial a mg/L de oxígeno disuelto utilizando el valor del coeficiente de solubilidad de oxígeno en agua y lo hacen así:**

$$c_{O_2} \left[\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right] = \left(\frac{P_{O_2}}{P_N} \right) \cdot \alpha(T) \cdot 1000 \cdot \frac{M_{O_2}}{V_{O_2}}$$

Se puede emplear esta ecuación junto a las anteriores y determinar la concentración a partir del % aire saturación:

$$c_{O_2} \left[\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right] = \left(\frac{P_{atm} - P_{v_{H_2O}}}{P_N} \right) \cdot \left(\frac{\% \text{ de aire saturado}}{100} \right) \cdot 0,2095 \cdot \alpha(T) \cdot 1000 \cdot \frac{M_{O_2}}{V_{O_2}}$$

Siendo en ambas ecuaciones:

- P_{atm} : presión atmosférica actual
- P_N : presión estándar (1013 mbar)
- 0,2095: contenido volumétrico de oxígeno en el aire
- $P_{v_{H_2O}}$: presión de vapor del agua a la temperatura T expresada en Kelvin
- $\alpha(T)$: Coeficiente de absorción Bunsen a la temperatura T; dado en $\text{cm}^3(\text{O}_2)/\text{cm}^3$
- M_{O_2} : masa molecular del oxígeno (32 g/mol)
- V_{O_2} : volumen molar (22,414 L/mol)

1.3.6.- Sistemas de medida

Existen varios sistemas y métodos para medir el oxígeno disuelto en diferentes medios, como el agua, los alimentos o fluidos de diferentes procesos industriales. A continuación, se presentan algunos de los principales sistemas de medida de oxígeno disuelto en líquidos:

- *Método de Winkler*: El método de Winkler es una técnica clásica utilizada para medir el oxígeno disuelto en agua. Este método se basa en la reacción química entre el oxígeno disuelto y una solución de yoduro de manganeso (Mn^{2+}) en presencia de álcali y ácido clorhídrico. La reacción forma un precipitado de óxido de manganeso (MnO_2) cuya cantidad se determina mediante titulación con una solución de tiosulfato de sodio.
- *Electrodos de oxígeno*: Los electrodos de oxígeno son dispositivos comúnmente utilizados para medir el oxígeno disuelto en líquidos. Estos electrodos consisten en una celda electroquímica que genera una corriente proporcional a la concentración de oxígeno presente. La medición se basa en la reacción química que ocurre en el electrodo en presencia de oxígeno. Los electrodos de oxígeno pueden utilizarse tanto en laboratorios como en sistemas de monitoreo continuo en vinificación en bodega.

- *Método de polarografía:* La polarografía es una técnica electroquímica utilizada para medir la concentración de oxígeno disuelto. Se basa en la reducción del oxígeno en un electrodo polarizado a un potencial constante. La corriente resultante se mide y se utiliza para determinar la concentración de oxígeno disuelto. Este método es particularmente útil en aplicaciones industriales y de laboratorio donde se requiere una monitorización continua.
- *Medidores ópticos de oxígeno:* Los medidores ópticos (optrodos) de oxígeno utilizan sensores fluorescentes que emiten una señal óptica en función de la cantidad de oxígeno presente. Estos sensores contienen una sustancia luminiscente sensible al oxígeno que emite luz fluorescente en respuesta a la presencia de oxígeno. La intensidad o el retraso de la señal fluorescente recibida se relaciona con la concentración de oxígeno disuelto y se puede medir mediante un detector óptico.

Estos son solo algunos ejemplos de los principales sistemas de medida de oxígeno disuelto. Cada método tiene sus propias ventajas, limitaciones y aplicaciones específicas. La elección del sistema de medida dependerá de las necesidades y las características del entorno en el que se realice la medición. En enología, los sistemas mayormente utilizados son los sistemas ópticos porque cuentan con innumerables ventajas de uso y por la posibilidad de utilizar diferentes sondas y sensores.

Los sistemas ópticos se basan en la amortiguación dinámica de la fluorescencia que es causada por el oxígeno gaseoso o disuelto en diversos medios. La ecuación de Stern-Volmer es una relación matemática que describe esta amortiguación y permite determinar la concentración de oxígeno a partir de las mediciones de fluorescencia.

La ecuación de Stern-Volmer se expresa de la siguiente manera:

$$\frac{I_0}{I} = \frac{\tau_0}{\tau} = 1 + K_{sv} \cdot [O_2]$$

Donde:

- I : Intensidad de luminiscencia en presencia de oxígeno
- I_0 : Intensidad de luminiscencia en ausencia de oxígeno
- τ : Tiempo de decaimiento de la luminiscencia en presencia de oxígeno
- τ_0 : Tiempo de decaimiento de la luminiscencia en ausencia de oxígeno
- K_{sv} : Constante de Stern-Volmer (cuantifica la eficacia de extinción y, por tanto, la sensibilidad del sensor)
- $[O_2]$: contenido de oxígeno

La ecuación de Stern-Volmer se basa en el principio de que la presencia de oxígeno disuelto en el medio causa una disminución en la intensidad de fluorescencia. Esto se debe a que el oxígeno interactúa con el luminóforo y disminuye la vida útil del estado excitado, lo que resulta en una reducción en la intensidad y un retraso de la fluorescencia observada.

Al medir la concentración de oxígeno utilizando técnicas de fluorescencia, se pueden utilizar tanto la intensidad de la señal como el retraso de la señal como parámetros para determinar la cantidad de oxígeno presente en el medio. A continuación, se presentan las principales diferencias entre ambos enfoques:

- **Intensidad de la señal:** La intensidad de fluorescencia se refiere a la cantidad de luz emitida por el luminóforo cuando se excita con una determinada longitud de onda. En la técnica de medición de oxígeno, se mide la intensidad de fluorescencia en presencia y ausencia de oxígeno, y se utiliza la relación entre ambas para calcular la concentración de oxígeno disuelto utilizando la ecuación de Stern-Volmer.

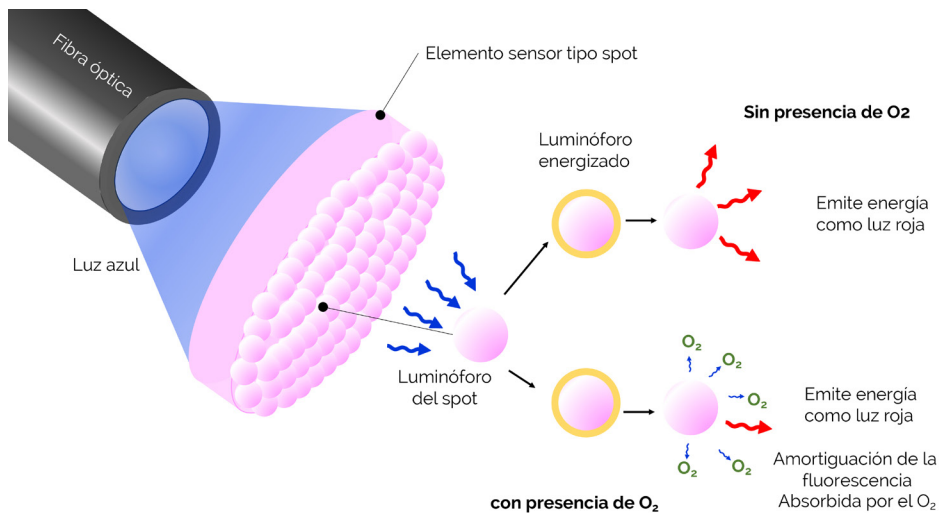


Fig. 17. Amortiguación dinámica de la fluorescencia por el oxígeno

La ventaja de utilizar la intensidad de la señal es que es una medida relativamente sencilla y directa de la cantidad de luz emitida por el luminóforo. Sin embargo, puede estar sujeta a posibles interferencias y cambios en la intensidad de la fuente de excitación, así como a variaciones en la geometría de medición y la detección.

- Retraso de la señal: El retraso de la señal, también conocido como tiempo de vida de fluorescencia o decaimiento de la fluorescencia, se refiere al tiempo que tarda el luminóforo en volver al estado basal después de ser excitado. En presencia de oxígeno, la interacción entre el oxígeno y el luminóforo provoca un acortamiento en el tiempo de vida de fluorescencia.

El uso del retraso de la señal como parámetro de medición tiene la ventaja de ser menos susceptible a interferencias relacionadas con la intensidad de la fuente de excitación y la detección, además de ser independiente de la inconsistencia natural en la fabricación del sensor (diferencias de espesor y concentración de la sustancia sensora del luminóforo). Hoy en día la gran mayoría de los sistemas utilizan el retraso de la señal para la medida de la amortiguación de la luminiscencia por parte del oxígeno.

Es importante tener en cuenta que la ecuación de Stern-Volmer asume que la amortiguación de la fluorescencia es causada exclusivamente por el oxígeno disuelto y que no hay otros factores que puedan afectar la intensidad de fluorescencia. En aplicaciones prácticas, es necesario considerar posibles interferencias y realizar correcciones adicionales si es necesario^[2].

1.3.7.- Factores que afectan la medida

La medida del oxígeno disuelto utilizando sistemas como electrodos de oxígeno, medidores ópticos o sensores de fibra óptica puede verse afectada por varios factores. A continuación, se presentan algunos de los factores más comunes que pueden influir en la precisión y exactitud de las mediciones:

- *Temperatura:* La temperatura del medio puede afectar la solubilidad del oxígeno y, por lo tanto, la medición. Los sistemas de medida suelen estar calibrados a una temperatura específica, por lo que es importante tener en cuenta las variaciones de temperatura y aplicar las correcciones necesarias. Algunos sistemas cuentan con sensores de temperatura integrados para realizar estas correcciones automáticamente.

- Presión:** La presión del sistema puede afectar la solubilidad del oxígeno. Los sistemas de medida generalmente cuentan con una medida de la presión atmosférica para corregir la lectura del sistema, pero hay que tener en cuenta que si se está midiendo el contenido en oxígeno disuelto de un sistema cerrado (depósito, botella) que cuenta con una atmósfera a presión diferente, será esta presión la que hay que utilizar para corregir la medida realizada por el equipo. Algunos dispositivos permiten realizar esta corrección vía software o incorporan la capacidad de incluir una señal de un medidor de presión ajeno al propio equipo.

Un ejemplo práctico se puede observar en la *Figura 18* durante el taponado de una botella de vino sin modificar la composición del gas que ocupa la parte superior de la botella llena de líquido. Si se considera que la presión atmosférica es de 1 atm.=1013 mbar o hPa, en un primer momento en ese espacio de cabeza el oxígeno representa el 21% de los gases que componen ese gas, es decir con una presión parcial de 212 hPa. En la fase 2 del encorchado, cuando el tapón se ha introducido lo suficiente como para sellar el cuello de la botella y reducir el espacio de cabeza un tercio, si se aplica la Ley de Boyle la presión del gas interior se incrementará 3/2 llegando el gas a alcanzar una presión de 1519,5 hPa, con el 21% de oxígeno que supone que su presión parcial sea de 319 hPa. Si el líquido de la botella no consume el oxígeno disuelto y estuviese en equilibrio con la atmósfera, según la Ley de Henry tendría la misma presión parcial de oxígeno que el gas con el que estaría en equilibrio. Si se mira la fase 3 en la que ambos fluidos aún no se han equilibrado, el corcho ha entrado completamente en el cuello reduciendo el volumen del espacio de cabeza a un tercio de la inicial. En esa situación la presión del espacio de cabeza es de tres veces la presión inicial y por lo tanto la presión parcial del oxígeno se triplica, alcanzando 638 hPa. En la fase 4 se aprecia cómo se han equilibrado las presiones parciales de ambos fluidos lo que ha supuesto un aumento de la presión parcial del oxígeno en el líquido y por tanto una mayor concentración de oxígeno disuelto.

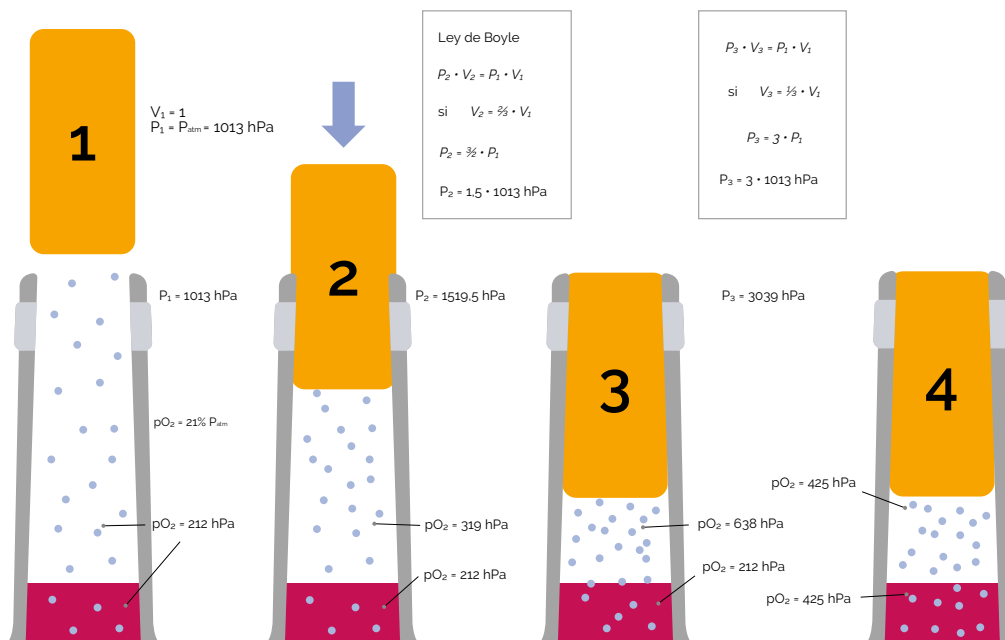


Fig. 18. Análisis de la variación del volumen del espacio de cabeza durante en encorchado y su influencia en la presión parcial de oxígeno en el espacio de cabeza y en el líquido

- *pH*: El pH del medio también puede influir en la medida del oxígeno disuelto. Algunos sistemas pueden requerir correcciones o ajustes específicos para diferentes rangos de pH.
- *El grado alcohólico del vino* puede afectar la solubilidad del oxígeno. A medida que aumenta el contenido de alcohol en el vino, generalmente se observa una disminución en la solubilidad del oxígeno. Esto se debe a varios factores:
 - *Interacciones moleculares*: El alcohol y el oxígeno tienen diferentes propiedades moleculares y pueden interactuar entre sí. A medida que aumenta la concentración de alcohol en el vino, se generan interacciones moleculares que pueden dificultar la solubilidad del oxígeno. Estas interacciones pueden incluir la formación de agregados moleculares o la competencia entre el alcohol y el oxígeno por los sitios de solvatación en la solución.
 - *Efecto de la viscosidad*: El aumento del contenido de alcohol en el vino puede conducir a un incremento en la viscosidad del líquido. Una mayor viscosidad puede dificultar la difusión del oxígeno a través de la solución, lo que reduce su solubilidad. La viscosidad puede estar relacionada con el grado alcohólico y otros componentes presentes en el vino, como azúcares y polifenoles.
 - *Cambios en la estructura de la solución*: A medida que aumenta el grado alcohólico, se producen cambios en la estructura de la solución del vino. Estos cambios pueden afectar la capacidad de disolución del oxígeno y su interacción con otros componentes presentes en el vino, como ácidos, azúcares y polifenoles. Los cambios en la estructura pueden alterar las propiedades fisicoquímicas de la solución y, en consecuencia, la solubilidad del oxígeno.

Es importante destacar que la influencia del grado alcohólico en la solubilidad del oxígeno puede depender de otros factores presentes en el vino, como la acidez, el pH, los azúcares y los compuestos fenólicos. Además, diferentes tipos de vino (blanco, tinto, espumoso, etc.) pueden tener diferentes perfiles de composición, lo que puede afectar la relación entre el grado alcohólico y la solubilidad del oxígeno.

- *Los fenoles* presentes en el vino pueden influir en la solubilidad del oxígeno de varias maneras. Los fenoles son compuestos químicos que se encuentran en la piel y las semillas de las uvas, así como en el proceso de vinificación. Estos compuestos son conocidos por su capacidad de interactuar con el oxígeno y afectar su comportamiento en el vino. A continuación, se explican algunas formas en que los fenoles pueden afectar la solubilidad del oxígeno:
 - *Captación directa de oxígeno*: Los fenoles, como los taninos, pueden tener una afinidad por el oxígeno y capturarlo directamente en el vino. Esto reduce la cantidad de oxígeno libre disponible en la fase líquida, lo que a su vez puede disminuir la solubilidad del oxígeno. Los polifenoles con grupos funcionales catecol y galato son particularmente efectivos en la captación directa de oxígeno.
 - *Formación de complejos*: Los fenoles pueden formar complejos con el oxígeno disuelto en el vino. Estos complejos pueden disminuir la disponibilidad del oxígeno para reaccionar con otros componentes del vino y, por lo tanto, reducir la solubilidad del oxígeno. La formación de complejos entre los fenoles y el oxígeno también puede ser responsable de la estabilización del color y la prevención de la oxidación no deseada en algunos vinos.
 - *Modificación de las propiedades del medio*: Los fenoles pueden afectar las propiedades fisicoquímicas del vino, como la viscosidad, el pH y la capacidad antioxidante. Estos cambios pueden influir en la solubilidad del oxígeno. Por ejemplo, los fenoles pueden aumentar la viscosidad del vino, lo que dificulta la difusión del oxígeno a través del líquido y reduce su solubilidad.

En resumen, los compuestos fenólicos presentes en el vino pueden afectar la solubilidad del oxígeno a través de la captación directa de oxígeno, la formación de complejos y la modificación de las propiedades del medio. Estos efectos pueden tener implicaciones en la estabilidad y la calidad del vino, así como en su capacidad de envejecimiento y desarrollo de aromas.

- *Mantenimiento y calibración:* El mantenimiento adecuado de los sistemas de medida, incluyendo la limpieza y calibración periódica, es esencial para obtener mediciones precisas y confiables del oxígeno disuelto. Los electrodos de oxígeno, por ejemplo, pueden requerir una limpieza regular y calibración con soluciones estándar.

1.3.8.- La calibración de los equipos de medida de oxígeno disuelto

La calibración de los sensores de medida del oxígeno disuelto es un proceso importante para garantizar mediciones precisas y confiables. Habitualmente se calibra el cero del sensor y se establece la pendiente que permite determinar el valor dentro del rango de medida del sensor.

Aquí se describe el procedimiento general de calibración para este tipo de sensores:

- *Preparación de soluciones de referencia:* Se preparan soluciones de referencia con concentraciones conocidas de oxígeno disuelto. Estas soluciones pueden ser obtenidas a partir de mezclas gaseosas de oxígeno y agua desgasificada, o utilizando métodos químicos para generar soluciones con concentraciones específicas de oxígeno. Es importante asegurarse de que las soluciones de referencia estén bien preparadas y sean estables.
- *Establecimiento de condiciones de calibración:* Se establecen las condiciones de calibración, como la temperatura y el pH, para que sean consistentes con las condiciones en las que se realizarán las mediciones posteriores.
- *Inmersión del sensor en la solución de referencia:* Se sumerge el sensor en la solución de referencia preparada y se permite que el sensor alcance la estabilidad en la solución. Esto puede tomar unos minutos para permitir que el sensor responda y alcance una lectura constante.
- *Ajuste de la lectura del sensor:* Se ajusta la lectura del sensor para que coincida con la concentración conocida de oxígeno disuelto en la solución de referencia. Esto puede implicar calibrar la lectura en cero (para la solución sin oxígeno) y en un punto de referencia conocido (para la solución con una concentración específica de oxígeno).
- *Verificación y ajuste adicional:* Se verifica la precisión de la calibración realizando mediciones adicionales en una o dos soluciones de referencia adicionales con concentraciones conocidas de oxígeno disuelto. Si es necesario, se realiza un ajuste adicional para mejorar la precisión de la calibración.
- *Registro de los datos de calibración:* Se registran los valores de calibración, incluyendo las lecturas del sensor y las concentraciones conocidas de oxígeno disuelto en las soluciones de referencia. Estos datos de calibración se utilizan posteriormente para corregir las mediciones realizadas con el sensor durante el uso normal.

Es importante realizar la calibración de forma periódica, siguiendo las recomendaciones del fabricante del sensor y considerando las condiciones específicas de uso. La frecuencia de calibración puede variar dependiendo de factores como la estabilidad (la deriva de la medida con el tiempo suele ser un dato que

publican los fabricantes de sensores) y la precisión del sensor, así como las condiciones ambientales y la aplicación específica.

Además, es recomendable realizar comprobaciones de la calibración durante el uso del sensor mediante mediciones en soluciones de referencia o muestras de control conocidas. Esto permite detectar posibles desviaciones y realizar ajustes necesarios para mantener la precisión de las mediciones del oxígeno disuelto.

1.3.8.1.- Calibración del cero

La calibración del cero en los sistemas de medida de oxígeno disuelto es un paso importante para garantizar mediciones precisas y confiables. Existen varias opciones para calibrar el cero, dependiendo del tipo de sensor y del equipo utilizado. A continuación, se describen algunas de las opciones más comunes:

- *Calibración en gas:* Esta opción implica sumergir el sensor en gas, donde se supone que no hay oxígeno disuelto (N_2 , Ar, CO_2). Esta es una opción rápida y sencilla, ya que no requiere preparación de soluciones de referencia. Se establece la lectura del sensor en cero en presencia del gas como referencia para la calibración y en ausencia de vapor de agua en el gas (humedad).
- *Calibración en agua desgasificada:* En esta opción, el sensor se sumerge en agua desgasificada, que se ha eliminado previamente de cualquier oxígeno disuelto. El agua desgasificada se puede preparar o bien hirviendo el agua para eliminar cualquier traza de oxígeno y luego enfriándola, o borboteando nitrógeno puro en el agua, lo que puede llevar su tiempo. La lectura del sensor se ajusta a cero en esta solución, asumiendo que no hay oxígeno disuelto presente.
- *Calibración en solución química desoxigenada:* Esta opción implica la preparación de una solución química desoxigenada que contiene un agente reductor para eliminar el oxígeno disuelto. El sensor se sumerge en esta solución y se ajusta la lectura a cero. Este método ofrece una mayor precisión que las opciones anteriores, ya que se elimina activamente el oxígeno disuelto. Una alternativa es utilizar una solución de bisulfito al 2% recién preparada. Otra posibilidad es la recomendada por un fabricante líder (Presens GmbH), que consiste en añadir 1 g de sulfito sódico (Na_2SO_3) y 50 μ L de solución patrón de nitrato de cobalto ($Co(NO_3)_2$) (concentración másica (Co) = 1000 mg/L; en ácido nítrico 0,5 mol/L) a un frasco. Disolver la mezcla de sales en 100 mL de agua. El agua queda libre de oxígeno debido a una reacción química del oxígeno con el Na_2SO_3 . El oxígeno adicional, que se difunde del aire al agua, se elimina por excedente de Na_2SO_3 . El cobalto se utiliza como catalizador para acelerar y completar la reacción del sulfito con el oxígeno. Tras esto se cierra el frasco con un tapón de rosca y se agita durante aproximadamente un minuto para disolver el Na_2SO_3 y asegurarse de que el agua está libre de oxígeno. Hay que mantener el recipiente cerrado con tapón de rosca después de la calibración para minimizar la contaminación por oxígeno. La vida útil de la solución es de unas 96 horas siempre que el recipiente esté cerrado con el tapón de rosca.

Es recomendable realizar la calibración del cero de forma regular, siguiendo las instrucciones del fabricante y considerando las condiciones de uso específicas. Esto ayuda a mantener la precisión de las mediciones y a compensar cualquier posible deriva o variación del sensor.

1.3.8.2.- Calibración de la pendiente o de la respuesta del sensor

La calibración de la pendiente en los sistemas de medida de oxígeno disuelto se refiere al ajuste de la respuesta del sensor para que coincida con la concentración conocida de oxígeno en una solución de referencia, a la relación entre la señal de salida del sensor y la concentración de oxígeno disuelto.

La calibración de la pendiente es necesaria para garantizar mediciones precisas y lineales a lo largo del rango de concentraciones de oxígeno disuelto. A continuación, se describen algunas opciones comunes para la calibración de la pendiente:

- *Soluciones de referencia con diferentes concentraciones conocidas:* Se utilizan soluciones de referencia con diferentes concentraciones conocidas de oxígeno disuelto para establecer una relación lineal entre la señal del sensor y la concentración de oxígeno. Se miden las respuestas del sensor para cada solución de referencia y se crea una curva de calibración utilizando los datos obtenidos. Esta curva se utiliza posteriormente para convertir las lecturas del sensor en concentraciones de oxígeno disuelto.
- *Generadores de oxígeno controlados:* Se utilizan generadores o mezcladores de gases que permiten generar diferentes concentraciones conocidas de oxígeno disuelto en una solución de referencia. Estos generadores de oxígeno se ajustan para generar niveles específicos de oxígeno y se mide la respuesta del sensor para cada nivel. Los datos obtenidos se utilizan para crear una curva de calibración y realizar la correspondiente corrección de las mediciones del sensor.
- *Estándares certificados:* Se utilizan estándares certificados que tienen concentraciones conocidas y certificadas de oxígeno disuelto. Estos estándares son producidos por organizaciones reconocidas y tienen trazabilidad a un sistema de referencia internacional. Se mide la respuesta del sensor para cada estándar y se utiliza la información para establecer una relación lineal entre la señal del sensor y la concentración de oxígeno disuelto.

De forma práctica la obtención de la pendiente puede realizarse en agua o en gas. Cuando el rango del sensor permite realizar medidas en los niveles de oxígeno que hay en el aire a realizar la calibración se realiza al aire. Para una calibración del 100% aire saturado o 21% de O_2 precisa es necesario conocer la humedad relativa del aire. Como la lectura de la HR es en general poco precisa, lo ideal es realizarla en aire seco o saturado de agua.

La calibración del 100% de aire saturado con agua se utiliza como referencia para establecer la lectura máxima del sensor de oxígeno disuelto. A continuación, se describe el proceso general para calibrar el 100% de aire saturado con agua:

- *Preparación del sistema:* Asegurarse de que el sensor y el equipo de medición estén limpios y en buen estado de funcionamiento. Limpiar el sensor según las instrucciones del fabricante para evitar cualquier interferencia en la medición.
- *Sumersión del sensor en agua desgasificada:* Sumergir el sensor en una muestra de agua desgasificada. El agua desgasificada se puede obtener hirviendo agua destilada y luego enfriándola para eliminar cualquier oxígeno disuelto. Esto asegura que la muestra de agua no contenga oxígeno adicional que pueda interferir en la medición.
- *Establecimiento de condiciones de calibración:* Asegúrate de que la muestra de agua y el sensor estén a la misma temperatura y estabilízalos durante un periodo de tiempo para permitir que alcancen la misma temperatura. Esto es importante porque la solubilidad del oxígeno en el agua varía con la temperatura.
- *Generación de aire saturado:* Utiliza un generador de aire o una fuente de aire comprimido que se borboatea a través de agua para generar aire saturado con agua. El aire saturado contiene la máxima cantidad de oxígeno disuelto que puede existir a una determinada temperatura y presión.
- *Conexión del aire saturado al sensor:* Conecta la fuente de aire saturado al sensor, asegurándote de que no haya fugas y que el flujo de aire sea constante.

- *Estabilización y registro de la lectura del sensor:* Permite que el sensor se estabilice en el aire saturado durante un tiempo suficiente para obtener una lectura estable. Registra la lectura del sensor, que debería ser la lectura máxima o cercana al 100% de saturación.

Es importante seguir las instrucciones del fabricante del sensor y del equipo utilizado para realizar la calibración del 100% de aire saturado con agua de manera adecuada. La calibración debe realizarse en condiciones controladas y repetirse periódicamente para asegurar mediciones precisas y confiables.

Es importante seguir las instrucciones del fabricante del sensor y del equipo utilizado para realizar la calibración de la pendiente de manera adecuada. Además, es recomendable realizar la calibración de la pendiente de forma periódica, siguiendo las recomendaciones del fabricante y considerando las condiciones de uso específicas. Esto ayuda a mantener la precisión y la linealidad de las mediciones del oxígeno disuelto.

1.4.- Referencias

1. Hitchman, M. L. Measurement of dissolved oxygen. In Chemical analysis 1978 (Issue 49). Wiley.
2. del Alamo-Sanza, M., Pando, V., & Nevares, I. Investigation and correction of the interference of ethanol, sugar and phenols on dissolved oxygen measurement in wine. *Analytica Chimica Acta*, 2014, 809, 162-173. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2013.11.053>



Capítulo 2

Efecto del oxígeno en los mostos y vinos

Ana María Martínez Gil
Grupo UVaMOX- Universidad de Valladolid

2.1. Introducción

2.2. Reacciones del oxígeno

2.3. Sustratos susceptibles de oxidarse

2.4. Mosto (oxidación enzimática e hiperoxidación)

2.5. Fermentación (alcohólica y maloláctica)

2.6. Maduración de los vinos

2.6.1. Efecto del oxígeno en el aroma de los vinos

2.6.1.1. El aroma de los vinos blancos

2.6.1.2. El aroma de los vinos tintos

2.6.2. Efecto del oxígeno en el color de los vinos

2.6.2.1. El color de los vinos blancos

2.6.2.2. El color de los vinos tintos

2.7. Conclusiones

2.8. Referencias

2.1.- Introducción

El oxígeno (aproximadamente 21% del aire) juega un papel crucial en muchas reacciones metabólicas y químicas, por lo que tiene una gran importancia en el proceso de vinificación, desde la recogida de uva hasta el embotellado del vino e incluso en el momento de su consumo. Evitar completamente el contacto oxígeno-vino es prácticamente imposible. Además, es una pieza clave en la elaboración de vinos de calidad ya que influye drásticamente en la composición del vino, siendo objeto de estudio y control de expertos investigadores y enólogos.

El oxígeno es conocido en muchas ocasiones como un "enemigo" del vino debido a que es el responsable de oxidaciones, pardeamientos y aromas relacionados con la oxidación, etc., sin embargo, otras veces es considerado un "aliado" ya que mejora la viabilidad de las levaduras, realza y estabiliza el

color de los vinos tintos, mejora el aroma del vino, elimina los aromas reductores no deseados y equilibra las sensaciones de astringencia y amargor. El oxígeno está presente durante todo el proceso de vinificación y que tenga una influencia positiva o negativa en el vino depende principalmente de la cantidad de oxígeno a la que sea expuesto, la cantidad de oxígeno que se disuelva, el momento de la incorporación, el tiempo de disolución y las características del vino. Debido a todos los factores que influyen, el poder determinar el oxígeno necesario para elaborar un vino, de forma que se minimicen todos los efectos negativos y se consiga obtener un vino de calidad máxima, no es fácil. Por lo tanto, la aplicación de oxígeno en el vino o el contacto incontrolado con oxígeno requiere una clara comprensión de sus efectos, tanto a corto como a largo plazo.

2.2.- Reacciones del oxígeno

El oxígeno es el principal responsable del proceso de oxidación por el cual tiene lugar la transferencia de electrones. El estado fundamental en el que se encuentra el oxígeno molecular se denomina configuración triplete, lo que quiere decir que tiene sus dos electrones desapareados. Esta configuración limita la reactividad del oxígeno impidiendo reaccionar directamente con los compuestos del vino susceptibles a oxidarse ya que tiene todos sus electrones apareados. Sin embargo, la adición de un solo electrón procedente de metales de transición y radicales, hace que se supere esta limitación conduciendo a la formación de superóxido libre (O_2^-) y de radicales peróxidos (O_2^{2-})^{1,2,3} (Figura 2.1).

Este fenómeno hace que el oxígeno esté involucrado en diversas reacciones en el vino e indica el importante papel que tienen los metales de transición como catalizadores o iniciadores de las re-

acciones de oxidación, siendo particularmente importantes el hierro y el cobre⁴⁻⁵ (Figura 2.2).

Los metales en el vino pueden formar complejos con compuestos del vino como son proteínas, pectinas, ácido tartárico y fenoles, por lo que la disponibilidad de metales podría cambiar a medida que pasa el tiempo y cambia su estado de polimerización, cambiando la susceptibilidad del vino a la oxidación. Una vez oxidado el metal, el estado reducido se regenera a través del ciclo redox por medio de los fenoles, permitiendo que el mecanismo de oxidación continúe (Figura 2.2).

La reducción del oxígeno molecular al pH del vino conlleva la formación de diversos compuestos intermedios, el radical hidroperoxilo (HO_2^-), el peróxido de hidrogeno (H_2O_2) y el radical hidroxilo (HO^\bullet), dando finalmente agua (H_2O), lo cual requiere la ganancia de cuatro electrones^{1,2} (Figura 2.1).

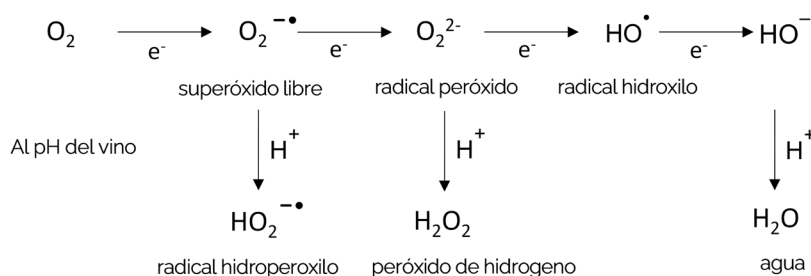


Fig. 2.1 Reacciones de reducción del oxígeno y principales radicales implicados en el ciclo de oxidación^{1,2,3}

2.3.- Sustratos susceptibles de oxidarse

La oxidación surge debido a la reacción entre el oxígeno y los compuestos antioxidantes que pueden encontrarse en las uvas, formarse en la fermentación o añadirse en el proceso⁶. Entre los principales sustratos oxidables en el vino están los compuestos fenólicos, y también el etanol, el ácido tartárico, los tioles y el ácido ascórbico^{1-2,5,7}. Dentro de los adicionados, cabe destacar el dióxido de azufre (SO_2) por ser el principal compuesto adicionado al vino debido a sus características no solo antioxidantes sino también antioxidásicas y antisépticas.

El radical hidroperoxilo juega un papel importante en la oxidación de los vinos porque es el responsable de oxidar los ortodifenoles a quinonas, lo cual conlleva la formación de peróxido de hidrógeno. Este peróxido de hidrógeno es extremadamente reactivo, pudiendo interactuar con todos los sustratos susceptibles de oxidación, reaccionando con el ion bisulfito y siendo el encargado de iniciar la reacción de Fenton⁸⁻⁹ (Figura 2.2). El radical hidroxilo reacciona con las especies oxidables en función de la concentración reaccionando así con los compuestos mayoritarios del vino⁹ (Figura 2.2).

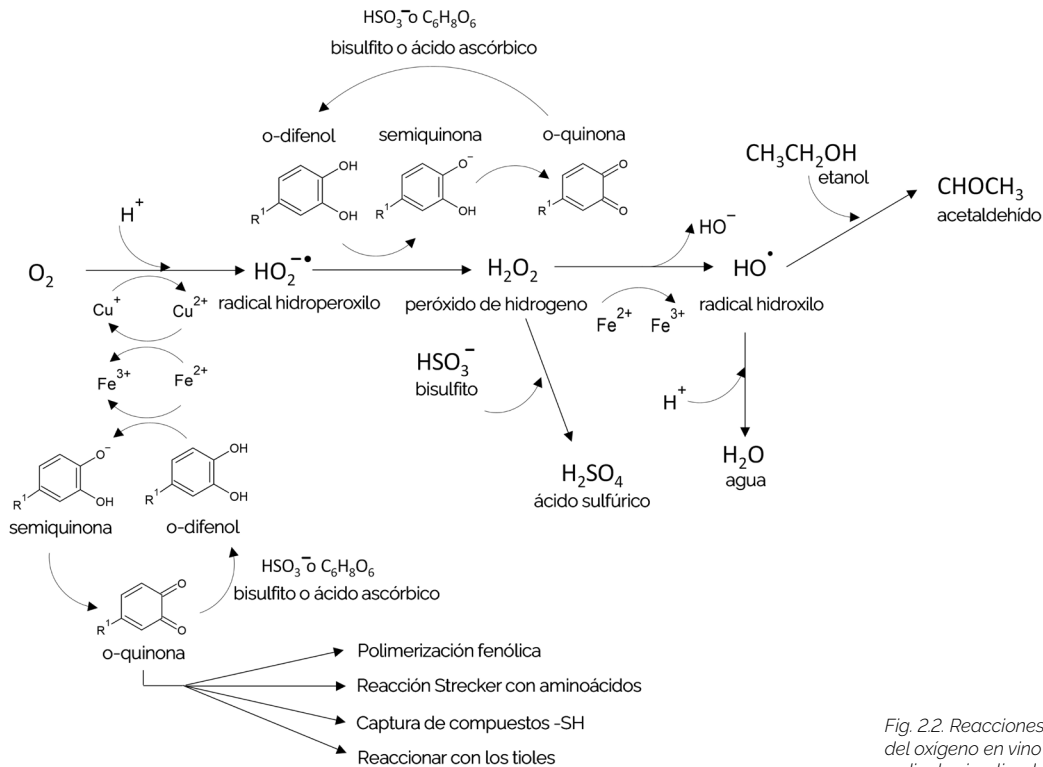


Fig. 2.2. Reacciones de reducción del oxígeno en vino y principales radicales implicados ^{3,7,10}

Los **compuestos fenólicos** tienen importancia en la calidad de un vino por ser los responsables de muchos aspectos sensoriales como el color, la estructura, el cuerpo y la astringencia. Las reacciones de los compuestos fenólicos que ocurren en presencia del oxígeno cambian el perfil químico y sensorial de los vinos ⁷, iniciando una cascada de transformaciones químicas que terminan con la disminución de la calidad o deterioro del vino. Estos compuestos proceden de la uva o del envejecimiento del vino con madera, se caracterizan por tener al menos un anillo bencénico y uno o más grupos hidroxilo y se clasifican según su tamaño y complejidad en dos grandes grupos: flavonoides y no flavonoides (Figura 2.3). Los no flavonoides son compuestos pequeños y simples que agrupan varias familias como son los ácidos fenólicos (cinámicos y benzoicos) y los estilbenos. En cambio, los flavonoides tienen una estructura más compleja y en función de los diferentes estados de oxidación y sustituyentes del heterociclo se clasifican en flavanoles, flavonoles y antocianos ³ (Figura 2.3). La cantidad de compuestos fenólicos en los vinos tintos es considerablemente superior a la de los vinos blancos, estimándose de 1000 a 5000 mg/L en vinos tintos, y de 200 a 500 mg/L en vi-

nos blancos ³. Por tanto, el contacto con el oxígeno en el caso de los vinos tintos no es tan crítico como en el caso de los vinos blancos, ya que estos últimos son muy sensibles a la oxidación debido a las pequeñas cantidades de compuestos fenólicos. El radical hidroperoxilo no es lo suficientemente reactivo para extraer un hidrógeno de muchos sustratos, excepto de los fenoles, debido a sus buenas propiedades donadoras de hidrógeno ⁷ (Figura 2.2) que les sitúa entre los compuestos más reductores del vino, siendo los principales sustratos de la oxidación. La velocidad de reacción entre los compuestos fenólicos y las especies reactivas de oxígeno dependen de la capacidad de cada compuesto fenólico para formar un producto estable. Casi todos los fenoles del vino tienen grupos funcionales muy reactivos al radical hidroperoxilo, como son el ácido cafeico, la catequina, la epicatequina, el galato de epicatequina, el ácido gálico, las proantocianidinas, los taninos hidrolizables y la quercetina ⁷. Sin embargo, otros fenoles como los monofenoles y sus equivalentes meta-di-fenoles, fenoles con derivados en especial metoxi, o la malvidina-3-glucósido (principal antociano) no se oxidan tan fácilmente ⁷.

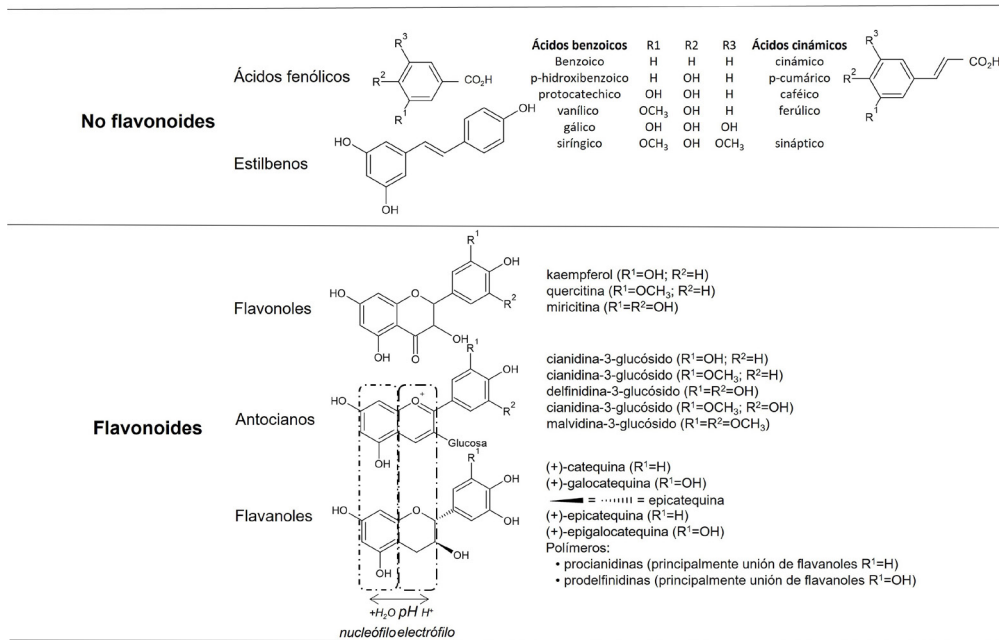


Fig. 2.3. Compuestos no flavonoides y flavonoides más comunes en los vinos ^{3.11}

El **ácido tartárico** es el principal ácido de las uvas y los vinos, encontrándose normalmente entre 1-6 g/L, y, por otro lado, el **etanol** es el principal alcohol de los vinos, 9-15 % v/v ⁷. Estos dos compuestos son significativos tanto por la concentración como por la importancia de los productos que se obtienen por su oxidación, ácido glioxílico y acetaldehído, respectivamente (Figura 2.4). El ácido glioxílico puede reaccionar con los flavanoles dando lugar a compuestos incoloros que se deshidratan formando xantenos que por oxidación dan sales de xantilio, las cuales son de color marrón amarillento. A la catequina intermediaria puede unirse un antociano formando una estructura de color rojo estable con el tiempo ^{3.13}. El acetaldehído reacciona con muchos componentes del vino (Figura 2.4) influyendo en sus características sensoriales ¹⁴ de las que se hablará a lo largo del capítulo.

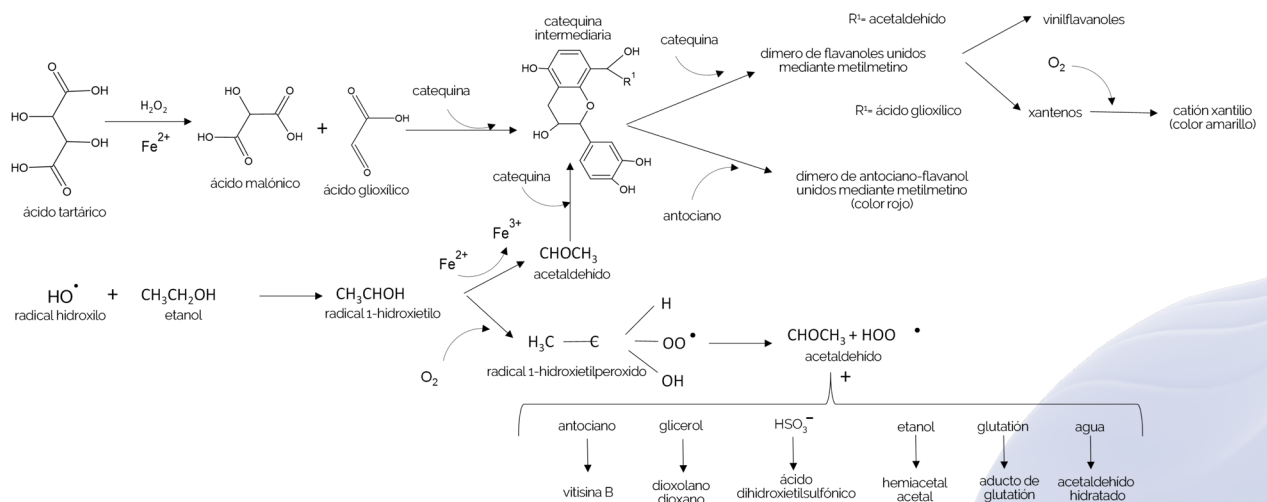


Fig. 2.4. Oxidación del ácido tartárico y del etanol ^{3.9,12,14}

Los **tioles** reaccionan muy rápidamente con las quinonas regenerando los ortodifenoles, previniendo su polimerización y, por tanto, el pardeamiento del vino. El glutatión es el tiol que se encuentra en mayor concentración en los vinos, y puede reducir a las o-quinonas formando el ácido 2-S-glutationil caftárico que es incoloro, también conocido como "Grape Reaction Product" (GRP) ^{3,15} (Figura 2.5). El glutatión reacciona con las quinonas de oxidación protegiendo a que reaccionen el resto de tioles u otros componentes volátiles con ellas, lo cual protege a los aromas de los vinos ^{9,16,17,18}. El glutatión también disminuye el aroma formado durante la crianza oxidativa debido a la formación de sotolon ¹⁶. Además, puede tener un efecto positivo sobre el color del vino blanco, previniendo la coloración durante la crianza ^{16,19}.

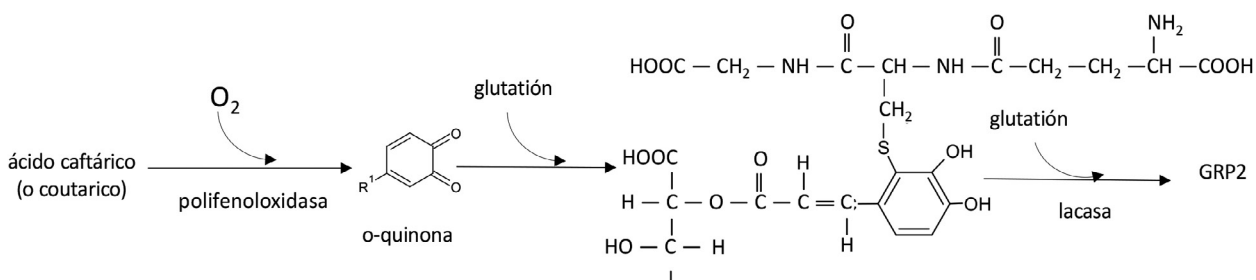


Fig. 2.5. ácido 2-S-glutationil caftárico, "Grape Reaction Product (GRP)" ^{3,15}

El **ácido ascórbico**, que se encuentra de manera natural en las uvas o puede ser adicionado, prácticamente desaparece durante la vinificación porque reacciona con el oxígeno y las quinonas. El ácido ascórbico no es tan antioxidante como el sulfuroso, pero puede también reciclar las quinonas en fenoles (Figura 2.2), aunque también puede tener el efecto contrario dependiendo de su concentración ⁷. En condiciones ricas en oxígeno, se oxida rápidamente a ácido dehidroascórbico produciendo peróxido de hidrógeno ³ (Figura 2.6) que puede iniciar la reacción de Fenton actuando como prooxidante en lugar de un antioxidante en vinos bajo ciertas condiciones. Además, el ácido dehidroascórbico se degrada rápidamente produciendo ácidos carboxílicos, cetonas y aldehídos que pueden afectar al aroma y acelerar el pardeamiento de los vinos blancos ^{3,20}. Este ácido dehidroascórbico puede sufrir una adición nucleofílica por parte del sulfuroso (Figura 2.6). Por ello, solo se suele añadir como antioxidante a vinos blancos antes del embotellado y además mezclado con sulfuroso. También se ha observado que los productos de degradación del ácido ascórbico pueden reaccionar con las (+) catequinas formando cationes xantilio coloreados contribuyendo al pardeamiento de los vinos ^{3,21} (Figura 2.6).

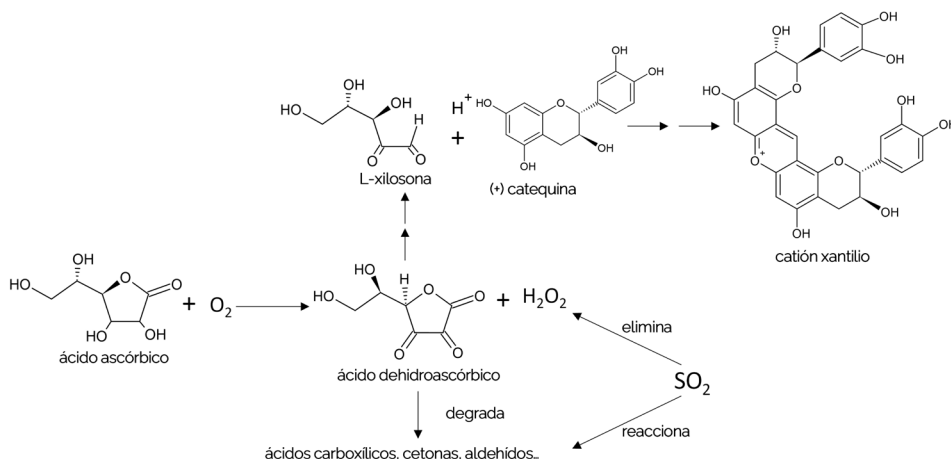


Fig. 2.6. Oxidación del ácido ascórbico ^{3,20}

La adición de **dióxido de azufre (SO₂)** es habitual para evitar el deterioro antimicrobiano y la oxidación de los vinos, ya que previene ambas oxidaciones enzimática y no enzimática ⁶. Al pH del vino la forma más abundante es el ion bisulfito (HSO₃⁻) (94-99%). En el vino se puede unir con el acetaldehído, los antocianos, el ácido pirúvico, el ácido glutárico, la glucosa o con los compuestos fenólicos como el ácido cafeico y el ácido p-cumárico, con compuestos volátiles como, ácidos carboxílicos, cetonas, aldehídos, β-damascenona, β-ionona, entre otros compuestos ⁶. La adición de 50 mg/L de SO₂ provoca una reducción de la actividad de la polifenoloxidasas en un 75-90 % ², pero se necesita una dosis más alta para inhibir eficazmente la actividad de la lacasa ¹. El SO₂ puede limitar las reacciones químicas de oxidación, pero al pH del vino la reacción del O₂ con el SO₂ es muy lenta e irrelevante y la autooxidación del SO₂ es bloqueada por fenoles ^{2,22}. Sin embargo, uno de los efectos más importantes del SO₂ en el vino es reaccionar con el H₂O₂ ^{2,22-24} (Figura 2.7) formado durante la oxidación de los fenoles, lo que reduce el potencial de oxidación y evita la reacción de Fenton inhibiendo la formación de acetaldehído (Figura 2.2).

Los efectos antioxidantes del SO₂ y los fenoles se complementan: el SO₂ es necesario para eliminar el producto de la oxidación de los fenoles (H₂O₂) y los fenoles son los responsables de la eliminación de los radicales oxidantes de la autooxidación del SO₂. En definitiva, se requiere la presencia de ambos para evitar la oxidación de los vinos. Además, el SO₂ tiene la capacidad de reducir las o-quinonas oxidadas a su forma reducida, acelerando así el consumo de oxígeno en el vino ^{2,6,22} (Figuras 2.2 y 2.7). Otra función importante del SO₂ en la oxidación química es unirse, de manera reversible, al acetaldehído, a otros aldehídos y a cetonas ⁷ (Figura 2.7). Este tipo de reacciones son muy importantes a nivel sensorial, ya que una vez que los aldehídos están formando aductos con el SO₂ no se pueden percibir. Conforme se oxida el vino, se consume el SO₂ libre del medio y el equilibrio se puede ir desplazando hacia las formas libres de los aldehídos. La interacción entre el SO₂ y el O₂ es bastante compleja, y los metales como el hierro y el cobre tienen un fuerte efecto sobre los mecanismos oxidativos que involucran el SO₂, el O₂ y los fenoles ²². Además, el sulfuroso mejora la solubilidad de las moléculas fenólicas ^{1,2}.

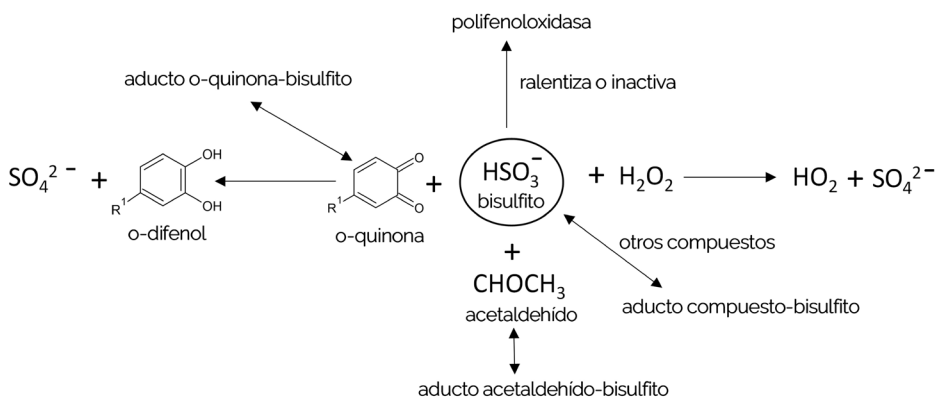


Fig. 2.7. Interacción del sulfuroso SO₂ con los diferentes compuestos del vino ^{2,22,23}

A continuación, se describen brevemente los efectos más importantes del oxígeno en el proceso de elaboración, desde la entrada de uva en bodega hasta el embotellado del vino.

2.4.- Mosto (oxidación enzimática e hiperoxidación)

El oxígeno entra en contacto con el mosto durante el procesado de la uva provocando la oxidación de los compuestos fenólicos, debido a oxidaciones enzimáticas y no enzimáticas dando lugar a la formación de o-quinonas, pero en las primeras etapas debido a la lentitud del proceso químico, las enzimas juegan el papel más importante ². Estas oxidaciones enzimáticas son muy rápidas en presencia de la enzima, el O₂ y el sustrato fenólico, y pueden darse en minutos u horas, por ello se extrema el cuidado en especial en variedades muy sensibles a la oxidación como son las blancas.

Las enzimas más importantes responsables de la oxidación de los compuestos fenólicos y por lo tanto de su pardeamiento son las polifenoloxidasas, como la tirosinasa que mediante la actividad cresolasa oxida monofenoles a ortodifenoles y mediante la actividad catecolasa oxida los ortodifenoles en o-quinonas ²⁴ (Fi-

gura 2.8), y en uvas infectadas con el hongo *Botrytis cinerea* también se pueden encontrar la lacasa ²⁵. Esta última enzima es más peligrosa ya que puede oxidar una amplia gama de compuestos fenólicos, resiste más al SO₂ pudiendo oxidar a más sustratos, es más activa a pH bajos y a los niveles de alcohol de los vinos ^{1,25}. A pesar de ello, se ha observado que el pardeamiento y el consumo de oxígeno entre mostos procedentes de uvas sanas o infectadas no es muy diferente ^{1,25}. El papel que otras enzimas como las peroxidasas en el pardeamiento de los mostos es insignificante, siendo únicamente importante cuando coexisten con las polifenoloxidasas porque potencian la degradación de los fenoles ²⁻³. La actividad enzimática puede disminuirse o inhibirse con la adición de SO₂ (anteriormente descrito), sedimentación (ya que esta actividad está asociada a las partes sólidas), clarificación con bentonita (disminuye un 30%, pero también elimina glutatión) y calentamiento (45-65°C destruye las enzimas) ^{1,26}

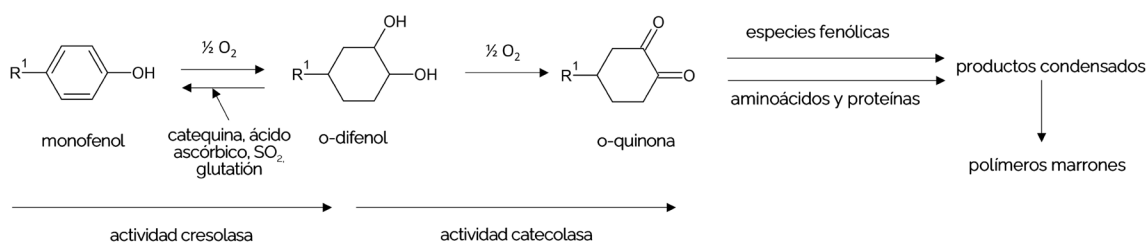


Fig. 2.8. Actividades de oxidación de la tirosinasa ^{3,12,25}

Los principales sustratos para estas enzimas de oxidación son derivados del ácido cinámico, ácido caf-tárico y ácido coutárico, presentes principalmente en las partes líquidas de las uvas y los flavanoides (catequina y taninos condensados) ubicados en raspones, hollejos y semillas ^{1,26}. El ácido caf-tárico tiene un papel importante en la oxidación por su concentración y porque puede ser oxidado por la tirosinasa a su correspondiente quinona (Figura 2.5). Esta quinona con el glutatión forma GRP, sustrato no oxidable por las polifenoloxidasas pero si por la lacasa. El mosto sufrirá más oxidación y pardeamiento cuando mayor es el contenido de ácidos hidroxicinámicos y menor sea el glutatión, por lo que la relación entre ambos es un indicador de la susceptibilidad a este fenómeno. El agotamiento de glutatión conlleva que las o-quinonas oxiden a compuestos con menor potencial redox, como catequinas, taninos, antocianos, SO₂, quedando reducidas al fenol original pudiendo volver a ser oxidado por las enzimas (Figuras 2.2 y 2.8). Las quinonas formadas también pueden polimerizar y condensar con muchos otros compuestos conduciendo a la formación de pigmentos marrones, especialmente a pH elevado ^{2,3} (Figura 2.8). Por lo tanto, otra estrategia a tener en cuenta para prevenir la oxidación es limitar los sustratos fenólicos disponibles para la oxidación,

especialmente el contenido de flavonoides. Esto puede conseguirse mediante un prensado suave, sin contacto con los hollejos ni raspones o también pueden usarse agentes clarificantes como PVPP, gelatina o carbón activo ¹⁻³.

El oxígeno en esta etapa puede tener efectos negativos en la calidad del futuro vino, en especial en blancos. La polimerización progresiva de los compuestos fenólicos en el mosto provoca la formación de pigmentos cambiando el color de los vinos blancos jóvenes de amarillo claro a amarillo oscuro, e incluso a un marrón inaceptable. Además, pequeñas cantidades de oxígeno durante la obtención de los mostos blancos pueden provocar la pérdida de diversos aromas, especialmente aromas afrutados. Uno de los métodos para prevenir el pardeamiento tan desfavorable para los vinos blancos es una técnica llamada **hiperoxidación**. Esta técnica incorpora grandes cantidades de O₂ al mosto, lo cual conduce a la oxidación de los fenoles, que sedimentan y pueden ser eliminados mediante el desfangado antes del inicio de la fermentación ¹.

Durante la fermentación, las condiciones reductoras y la adsorción por parte de las levaduras también reducen el color marrón. En la *Figura 2.9* se observa la evolución del color de un mosto hiperoxidado con colores marrones que van disminuyendo conforme va avanzando la fermentación, no apreciando diferencias en el color del vino obtenido mediante sistema tradicional o hiperoxidación al final de la fermentación y con color idéntico tras 3 meses en botella ²⁷. Se ha encontrado que los vinos tras esta técnica pueden sufrir una disminución de la sensación de acidez, amargor y astringencia asociada con la eliminación de flavonoides (como catequina, epicatequina y procianidinas B2 y B3). Respecto al aroma, en algunas variedades como Chardonnay, Riesling, Faberrebe, Moscatel y Parellada se han observado aromas más intensos, en especial cuando hay contacto con hollejos previo a la hiperoxidación, debido a un aumento de alcoholes superiores, ácidos grasos y sus acetatos y etil esterés, además de terpenos volátiles libres ^{1,2,28}. Sin embargo, otros estudios muestran vinos con una disminución en la calidad del aroma debido a una mayor formación de acetaldehído, acetatos y aldehídos superiores (C3-C10) y a una disminución de alcoholes superiores, resultando vinos con notas más vegetales y menor aroma afrutado ^{1,2,28}.



Fig. 2.9. Imagen de mostos-vinos Riesling sometidos a la hiperoxidación. Foto de cada bloque, izquierda: Mosto-vino obtenido de manera tradicional-sulfitado; derecha: Mosto-vino hiperoxidado sin sulfitado ²⁶

En el caso de los mostos tintos, la oxidación enzimática tampoco es deseable y puede desarrollar precipitados que provocarían una disminución del contenido fenólico del vino ². Sin embargo, en algunos casos, la incorporación controlada de oxígeno puede tener efectos positivos al facilitar una mayor extracción de compuestos fenólicos de los hollejos en la maceración que da lugar a vinos con menor acidez y astringencia y mayor intensidad de color, además de reducir los aromas de reducción (olor a moho, hongos, trapo sucio, huevos podridos, ajo o coliflor) lo que se refleja en vinos más equilibrados ².

2.5.- Fermentación (alcohólica y maloláctica)

Las levaduras necesitan O_2 para la síntesis de lípidos (esteroles y ácidos grasos insaturados), los cuales desempeñan un papel clave en la fluidez y actividad de las enzimas, inciden en la tolerancia al etanol, el índice de glucólisis, la capacidad fermentativa y la viabilidad de la levadura ^{1,29}. Tras el inicio de la fermentación alcohólica el O_2 se agota entre las 2,75 y las 4,25 horas, dependiendo del mosto ¹. La falta de O_2 al comienzo de la fermentación provoca una disminución de la actividad desaturasa de los ácidos grasos, no formándose compuestos esenciales para el crecimiento y desarrollo de las levaduras ² y acumulándose en las levaduras estos ácidos grasos, especialmente acético, hexanoico, octanoico y decanoico, los cuales pueden transferirse al vino ¹ provocando aromas rancios y a queso ². El enólogo para asegurar una fermentación completa puede utilizar la adición de O_2 . La adición controlada de O_2 produce vinos con mejores características sensoriales ya que puede favorecer y mejorar su color y aroma. Durante esta etapa se forma el aroma mayoritario de los vinos, aroma secundario o fermentativo, como ésteres, alcoholes superiores, ácidos grasos de cadena media, ácidos ramificados, aldehídos y cetonas ³⁰ y ocurre la mayor extracción de color y el oxígeno promueve estos dos fenómenos. El aporte contro-

lado de oxígeno también mejora el aroma de los vinos al disminuir el contenido de aromas reductores e incluso al aumentar la concentración de aromas varietales como son los tioles volátiles debido a la liberación de sus precursores aumentando notas a pomelo, guayaba y frutas tropicales ². El momento y cantidad de O_2 adicionado es un factor importante. Así, la adición de O_2 antes de la fermentación y en las primeras horas conduce a fermentaciones más cortas y una mejor viabilidad de la levadura a altos contenidos de etanol, mientras que la adición de O_2 (5-20 mg/L) al final del crecimiento de la levadura evita paradas de fermentación ². No se sabe cuánto O_2 absorbe la levadura, reacciona con los polifenoles o simplemente es arrastrado con el CO_2 que se produce durante la fermentación ¹.

En la fermentación maloláctica también se ha descrito que la adición de O_2 afecta acelerando la conversión del ácido málico en ácido láctico ¹⁻². Además, el O_2 en esta etapa también puede influir en las características sensoriales del vino, especialmente en Chardonnay, ya que acelera la conversión de α -acetoacetato a diacetilo, lo que contribuye al aroma mantecoso característico de Chardonnay que ha realizado la fermentación maloláctica.

2.6.- Maduración de los vinos

Cuando el vino está terminado, las reacciones de oxidación química afectan al aroma, el color y el sabor de los vinos, siendo positivos o negativos dependiendo de las condiciones y tipo de vino. En general, en esta etapa la oxidación es considerada adversa en vinos blancos ya que contribuye al pardeamiento y a cambios negativos en el aroma, sin embargo, en el caso de los vinos tintos puede permitir un aumento y estabilidad del color, así como una mejora aromática y gustativa, siempre que la cantidad de oxígeno que entra en contacto con el vino permita transformaciones en un tiempo relativamente largo ¹⁻³. Como se ha descrito anteriormente, en la oxidación química no interviene el oxígeno directamente sino el radical hidroperoxilo que es el que provoca la oxidación de los compuestos fenólicos a quinonas, reduciéndose a H_2O_2 (Figura 2.2).

Los vinos tintos tradicionalmente pueden ser envejecidos en barricas lo que permite la transformación de sus compuestos fenólicos por efecto del oxígeno recibido, y por la reacción con los compuestos cedidos por la madera, como elagitaninos y compuestos fenólicos de bajo peso molecular. En los últimos años, ha ido aumentando el uso de la técnica de microoxigenación (MOX) que consiste en aplicar de manera controlada pequeñas dosis de oxígeno. La MOX ha sido utilizada en la maduración de vinos junto a productos alternativos de madera, y también en otras etapas de vinificación, ya que con la gestión adecuada permite inducir cambios en las características sensoriales de los vinos evitando los problemas tanto de una anoxia como de un aporte incontrolado de oxígeno.

2.6.1.- Efecto del oxígeno en el aroma de los vinos

La maduración del vino es la etapa más larga del proceso de elaboración del vino y los compuestos volátiles sufren muchas transformaciones siendo crucial la influencia del O_2 . La exposición moderada y controlada al O_2 potencia los aromas afrutados, integra el aroma a madera, disminuye los aromas de reducción relacionados con olores azufrados, a huevo, ajo, Camembert podridos, coliflor y a orina cuando se come muchos espárragos. Este descenso se debe a que el oxígeno desplaza el equilibrio hacia las formas oxidadas, las cuales no son volátiles (Figura 2.10). Además, el ácido sulfhídrico y el metanotiol pueden unirse a la o-quinonas producidas durante la oxidación formando aductos no volátiles³¹. Por otro lado, el descenso de notas verdes de los vinos expuestos a oxidación se debe también a la unión de las quinonas con los tioles, lo que conlleva una disminución del aroma varietal típico de algunas variedades³². Sin embargo, la exposición excesiva al O_2 puede influir negativamente por la acumulación de aldehídos de Strecker y acetaldehído, moléculas con aroma muy diverso y con un papel muy relevante en la calidad del vino (Figura 2.11). La degradación oxidativa del aroma de un vino se manifiesta antes que la degradación cromática^{1,3,33}.

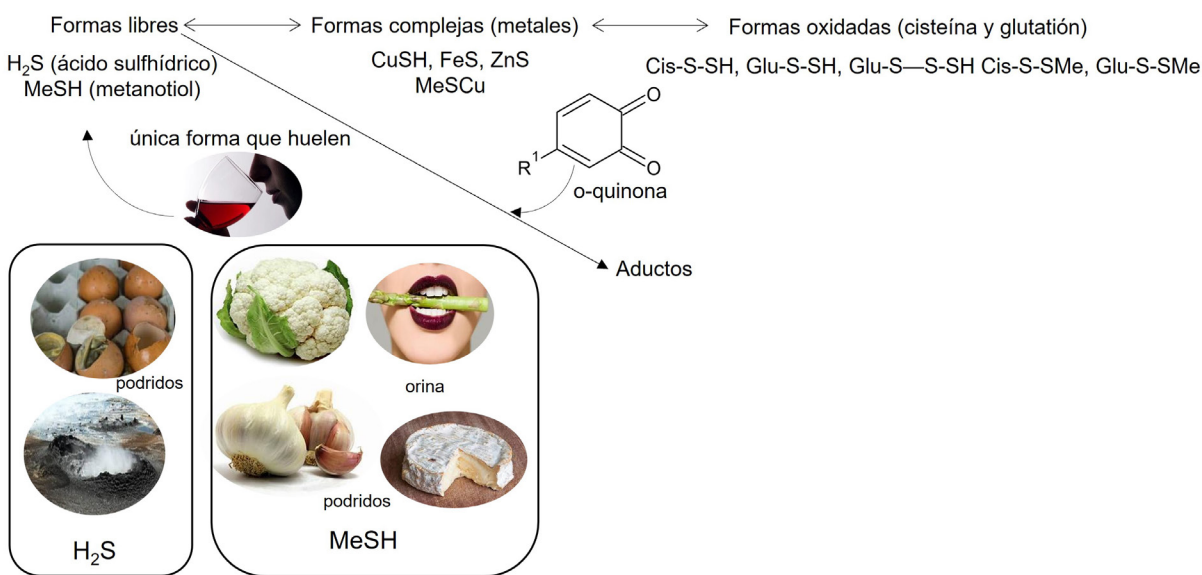


Fig. 2.10. Disminución de los aromas reducidos

En general, los aldehídos tienen un umbral de percepción bajo y en pequeñas cantidades pueden empeorar significativamente el aroma del vino. El más conocido es el acetaldehído, sin embargo, los más importantes en el envejecimiento prematuro y en la degeneración aromática de los vinos son el metional y el fenilacetaldehído²³. Estos dos compuestos son considerados como compuestos impacto²³, es decir que si su concentración en los vinos está por encima de su umbral de percepción olfativa afectarán de manera muy significativa al aroma del vino. La formación de los aldehídos de Strecker, incluidos el metional y fenilacetaldehído, se produce por varias vías: la ruta de Ehrlich sobre todo durante la fermentación alcohólica; la reacción de Maillard en el caso de tratamientos térmicos; la reacción de Fenton por oxidación directa de sus precursores, pero como se describió anteriormente esta vía oxida los componentes mayoritarios como el etanol siendo la vía principal de formación de acetaldehído pero no del resto de aldehídos; y finalmente por la vía de degradación de Strecker, denominada así por ser la vía principal de formación (Figura 2.11).

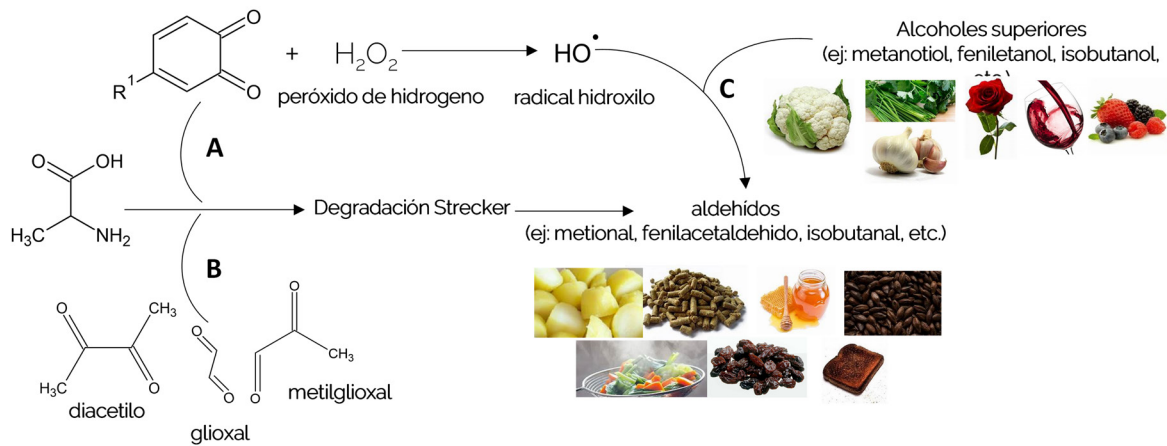


Fig. 2.11. Degradación de Strecker a partir de una o-quinona actuando como α -dicarbonilo (A), Degradación de Strecker que involucra compuestos dicarbonílicos de origen microbiano (B), oxidación de alcoholes superiores por radical hidroxilo (C) ³⁰

La vía degradación de Strecker consiste en la desaminación oxidativa y descarboxilación de un α -aminoácido en presencia de un compuesto α -dicarbonilo. El O_2 tiene un directo e importante papel en esta vía de formación, ya que al oxidar o-difenoles hasta o-quinonas estaría enriqueciendo al vino en α -dicarbonilos favoreciendo la formación de aldehídos de Strecker ³⁴.

Esta formación se ve favorecida en vinos con pH bajo, alto contenido en aldehídos y fenoles con grupos OH en posición para y orto ³⁵. Por lo tanto, la acumulación de los aldehídos de Strecker está favorecida por la cantidad del aminoácido precursor, la cantidad de metales que actúan como catalizadores e impedida por los fenoles reactivos con los aldehídos. Estos fenoles reactivos son principalmente antocianos y taninos pequeños, lo que explica que los vinos jóvenes acumulen muy poco acetaldehído y metional, mientras que las menores cantidades de fenoles reactivos en los vinos envejecidos permiten su acumulación.

Los aldehídos al ser especies electrofílicas pueden reaccionar con otros compuestos nucleófilos del vino, como SO_2 y tioles (ácido sulfhídrico, glutatión, cisteína). Los aldehídos con el SO_2 forman aductos estables, no volátiles e inodoros, pero conforme el SO_2 desaparece por oxidación o por reacción con otras moléculas, estos aldehídos quedarán libres, siendo olorosos y contribuyendo con la aparición de notas oxidadas. Los aldehídos con el etanol forman hemiacetales y posteriormente acetales, y con el glicerol dioxolanos y dioxanos aportando el carácter frutal y dulce de los vinos generosos y vinos fortificados.

2.6.1.1.- El aroma de los vinos blancos

Como se ha mencionado anteriormente el contacto con el O_2 en algunos vinos blancos puede conducir a la pérdida de aroma afrutado, mientras que en otros puede aumentar la complejidad aromática ¹. La degradación del aroma debido al deterioro oxidativo está asociada a notas de caramelo, fruta demasiado madura, manzana triturada, acetaldehído, leñoso, heno, rancio, pienso de granja, miel, vegetales cocidos, y aromas que recuerdan a la madera ¹³. Los compuestos responsables de estas notas son el furfural, el eugenol, el 5-metilfurfural y el benzaldehído, compuestos que aportan aromas a madera y vegetales cocidos, el (E)-2-nonenal, el (E)-2-hexenal, el (E)-2-octanal responsable de notas a tiza, papel, polvo, el metional responsable del olor a patata hervida y pienso de granja, el fenilacetaldehído con notas a miel y pasas, el TDN (1,1,6-trimetil-1,2-dihidronaftaleno) responsable del olor a queroseno, gasolina y picante, el sotolon con olor a nuez, picante, curry, o sirope de arce, azúcar quemado y caramelo dependiendo de la concentración y el vitispirano con aroma a alcanfor y eucalipto (Figura 2.12), además de otros compuestos que pueden ser responsables de los matices aromáticos que se observan en estos vinos pero que permanecen sin identificar ^{13,33}. Muchos de estos compuestos son característicos y por tanto deseables en algunos vinos como los vinos de Riesling, Oporto y Jerez, sin embargo, tiene un efecto adverso en general de los demás vinos blancos ².

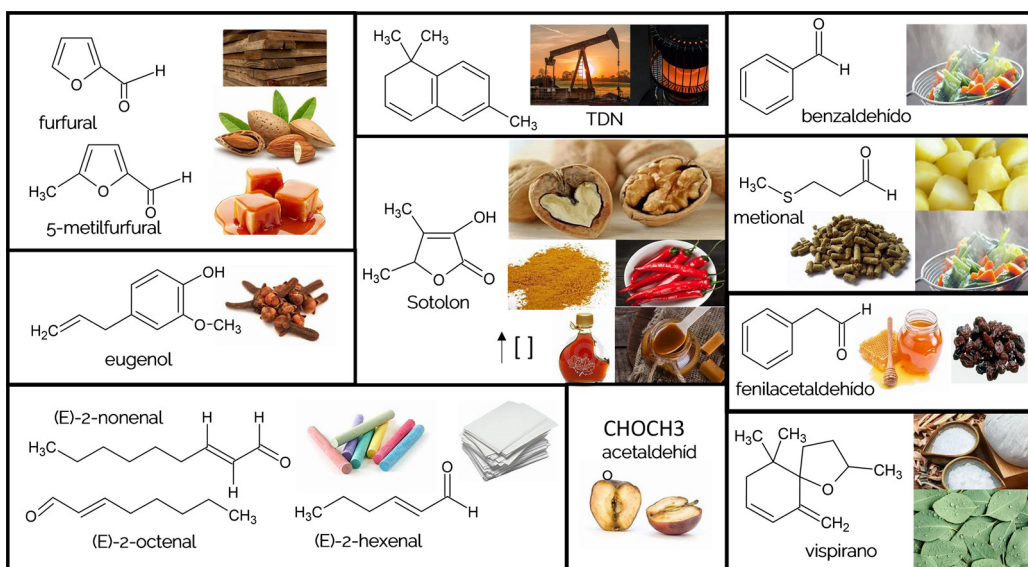


Fig. 2.12. Compuestos y aroma de los vinos en contacto con oxígeno

La formación de aroma oxidativo de un vino blanco depende de varios parámetros, como son la concentración de O_2 , el pH, las condiciones de almacenamiento, la concentración de SO_2 , la composición fenólica y el contenido de ácido ascórbico. Los vinos almacenados a altas temperaturas y elevados niveles de O_2 disueltos sufren un rápido y pronunciado deterioro oxidativo.

- El acetaldehído, compuesto que normalmente está relacionado con vinos que sufren largas crianzas oxidativas, no parece jugar un papel importante en el aroma de un vino blanco joven que sufre oxidación, ya que su concentración no varía significativamente ³³.
- El sotolon se forma como resultado de la oxidación del ácido ascórbico ².
- El TDN y vitispirano también se ven muy afectados por pH bajos ¹. También a altas temperaturas y bajo pH se observa mayor formación de óxido de linalol y especialmente 2,2-dimetil-5-(1-metilpropenil)-tetrahydrofurano, este último compuesto relacionado con un aroma de comida podrida ¹.
- La concentración de fenilacetaldhído y metional es mayor en vinos oxigenados a mayor temperatura.
- La degradación de los aromas florales se ve disminuida por la adición de SO_2 ¹.
- Los monoterpenos, en especial el geraniol, el linalol y el α -terpineol, que aportan notas florales, afrutadas y cítricas disminuyen.
- Los fenoles presentan diversos comportamientos ante la oxidación, por ejemplo, el 4-vinilguaiacol, con notas florales a clavel agradables, desaparece totalmente para formar sus correspondiente etoxietilfenoles, mientras que el fenol y el 4-etilfenol, con aromas desagradables en especial el segundo ya que se relaciona con el sudor de caballo y sudor, aumentan en el inicio de la oxidación pero luego terminan disminuyendo, o el eugenol, con aromas a clavo, que aumenta durante todo el proceso de oxidación ³⁶.

2.6.1.2.- El aroma de los vinos tintos

El aroma de los vinos tintos también se modifica durante la oxidación, aunque con efectos más atenuados debido a la mayor presencia de fenoles que reaccionan con los aldehídos. En los vinos rosados y tintos de Cabernet Sauvignon, Cabernet Franc, Merlot y Garnacha el 3-mercaptohexanol disminuye siendo mayor a mayor H_2O_2 y catequinas dando por tanto vinos menos afrutados ^{1,37}. Este mecanismo se inhibe parcialmente mediante la adición de SO_2 , además, se ha observado un efecto sinérgico del SO_2 y las antocianinas en la estabilización de 3MH ^{1,37}. La oxidación de los vinos tintos conlleva un aumento de ciertas notas aromáticas debido a un aumento de los aldehídos como ya se ha indicado y de otros compuestos como metional,

(Z)-2-nonenal, (E)-2-octenal, furaneol, dodecanal, (Z)-whisky lactona y o-aminoacetofenona y una disminución de algunos volátiles con descriptores herbáceos, afrutados y florales, como (Z)-3-hexenol, hexanoato de etilo e isoeugenol³⁸. Una oxidación excesiva en vinos tintos provoca pérdida de aromas a café, fruta y aromas a plátano, con un aumento al principio de aromas a patata convirtiéndose después en un aroma similar al acetaldehído, es decir un aroma desagradable a manzana oxidada y descrito como acre². El exceso de O₂ también conduce a la disminución de TDN, compuesto típico de estos vinos Riesling, y a la degradación de la β-ionona y la β-damascenona, que tienen aroma a violeta y fruta madura que puede evitarse o prevenirse mediante la adición de SO₂, aunque altas concentraciones de este antioxidante también puede degradarlos.

Durante la permanencia del vino en botella se produce una pequeña incorporación de oxígeno (naoxygenación) que conlleva un aumento de los aromas de frutas negras y rojas asociados a la formación de compuestos aromáticos como el furaneol^{38,39}, y con el ingreso de O₂ disminuyen los compuestos de azufre volátiles responsables del atributo de reducción³⁹ (Figura 2.10). Por lo tanto, según el sistema de cierre o tapón de diferente permeabilidad empleado, se obtendrán vinos con perfiles olfativos diferentes.

2.6.2.- Efecto del oxígeno en el color de los vinos

El color del vino es uno de los aspectos sensoriales más importantes de un vino porque la inmediatez en su apreciación, además se relaciona con su calidad porque es indicador de otros aspectos relacionados con edad, aroma y sabor.

2.6.2.1. El color de los vinos blancos

Los vinos blancos jóvenes normalmente presentan un ligero color amarillo o verdoso, mientras que los que han sido fermentados o envejecidos en barricas alcanzan un amarillo más profundo o dorado (Figura 2.13). La aparición de tonalidades amarronadas indica la oxidación enzimática o química del vino. La oxidación enzimática se intenta evitar inhibiendo la actividad de las enzimas con el control del contenido fenólico y la presencia de etanol, por lo que el pardeamiento de estos vinos suele estar más asociado a una oxidación química. En el caso de los vinos envejecidos con sus lías se observa una reducción del color marrón del vino blanco oxidado¹⁴⁰ debido a que las levaduras previenen la degradación principalmente de los flavanoles ((+)-catequina) y reducen los derivados de los ácidos vainílico, siringico, coutárico. Además, las paredes celulares son el área de absorción activa, y esto puede explicar la prevención de color pardo en los vinos con levaduras de flor¹⁴⁰.

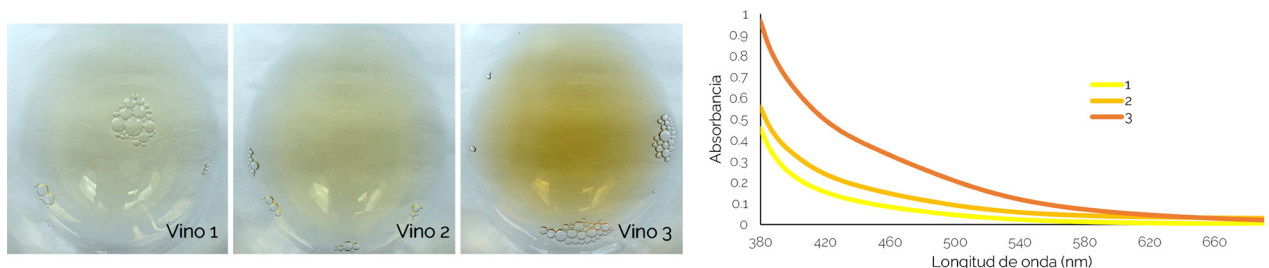


Fig. 2.13. Cambio de color del vino blanco en contacto con oxígeno

Los tres mecanismos con el que se relacionan el color amarronado de un vino blanco son:

- **La oxidación de moléculas fenólicas** a sus correspondientes quinonas. Los principales compuestos fenólicos de un vino blanco que no ha tenido un contacto prolongado con los hollejos o no ha estado en contacto con madera son los ácidos hidroxicinámicos. Estos compuestos no parecen tener directamente un papel importante en el pardeamiento del vino blanco. Los flavanoles, en especial (+)-catequina, (-)-epicatequina y procianidinas diméricas B1-B4, son especialmente sensibles a la oxidación, influyendo el grado de polimerización y los sustituyentes que las conforman, así por ejemplo las (-)-epigalocatequinas, mayoritarias en la piel, se degradan antes que las (-)-epicatequinas, principales en semillas. Por lo tanto, las técnicas de vinificación que influyen en el contenido de procianidinas afectan a la sensibilidad al pardeamiento. Los ácidos hidroxicinámicos tienen un papel en esta oxidación cuando se acoplan a los flavanoles.
- **La oxidación del ácido tartárico** a sales de xantilio de color marrón amarillento (*Figura 2.4*).
- El **acetaldehído** forma puentes etilo entre moléculas de (+)-catequina y también entre dímeros resultantes de la oxidación del ácido tartárico. Hay que tener en cuenta que la estructura de la catequina influirá en el color, así el producto de degradación de (+)-catequina tiene un tono más rojizo que la (-)-epicatequina.

En el vino blanco puede aparecer un color rojo salmón, llamado rosado o pinking en inglés, este fenómeno es percibido como indeseable por los consumidores. Hay variedades de uva que son más proclives a este problema, como pueden ser Chardonnay, Chenin blanc, Palomino, Riesling o Sauvignon blanc ⁴¹, y se observa principalmente en vinos terminados que han sido elaborados en condiciones reductoras ⁴¹. Este color rosado se debe a cambios oxidativos en los vinos blancos cuando se exponen al oxígeno, y aunque se desconocen los compuestos responsables, se cree que es el resultado de la rápida hidrólisis de las leucoantocianinas en las correspondientes sales rojas de flavilio ². Esta coloración también puede ser causada por otros compuestos como el ácido 2-S-glutationil-caftárico formado de la reacción del glutatión con las o-quinonas ². La susceptibilidad al rosado se reduce de manera efectiva manteniendo niveles adecuados de SO₂ libre, especialmente cuando se usa ácido ascórbico.

2.6.2.2. El color y sabor de los vinos tintos

El color de los vinos tintos se va modificando por las transformaciones de los antocianos y taninos, mientras que en los cambios del amargor, astringencia y cuerpo del vino participan fundamentalmente los flavanoles. La polimerización de las procianidinas con puente acetaldehído genera moléculas menos reactivas con las proteínas en boca haciendo que el vino sea más suave y menos astringente, mientras que las reacciones de polimerización directas entre procianidinas originan productos más reactivos con las proteínas haciendo que el vino sea más astringente ¹, de ahí la importancia del oxígeno en esta polimerización.

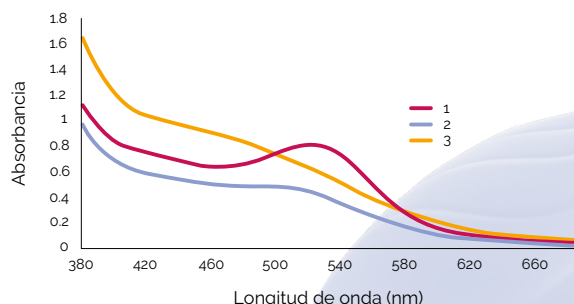
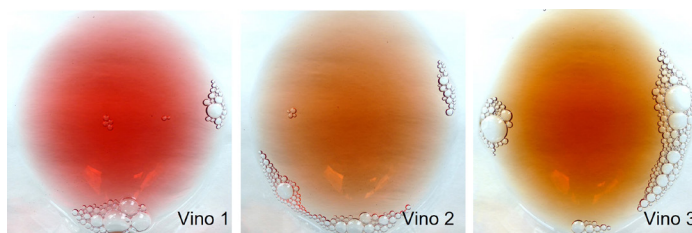


Fig. 2.14. Cambio de color del vino rosado en contacto con oxígeno

El color rojo de los vinos rosados y tintos es debido a los antocianos, compuestos que se extraen de los hollejos de la uva durante la maceración y fermentación alcohólica. Cada antociano presenta una tonalidad diferente además cambian en función del pH o de su interacción con otros fenoles u otras moléculas, así el color rojo-violáceo de los vinos jóvenes va cambiando con el tiempo hacia colores más pardos y marrones dando lugar a vinos de color rojo teja incluso anaranjados (*Figuras 2.14-2.15*). Muchas de las reacciones que producen el cambio de color están muy influenciadas por el O_2 y se basan en la reducción del contenido en antocianos libres.

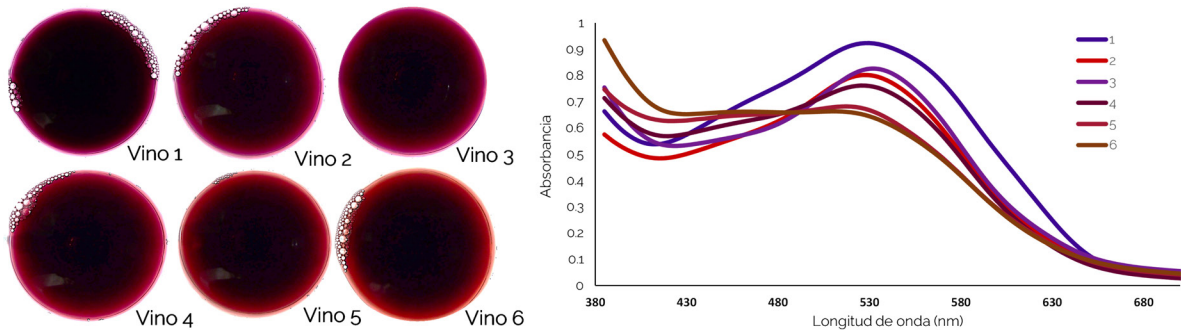


Fig. 2.15. Cambio de color del vino tinto en contacto con oxígeno

El oxígeno está implicado en distintas reacciones que afectan al color del vino tinto ^{1-3,42}.

- **Degradación de los antocianos:** oxigenaciones fuertes o por la acción de la luz o la temperatura se produce la pérdida irreparable del color del vino.
- **Degradación de los taninos:** una concentración elevada de O_2 y altas temperaturas provoca la descomposición de taninos que se refleja en un aumento del color amarillo de los vinos.
- **Polimerización de los flavanoles** (unión de flavanoles monoméricos y sus polímeros): el oxígeno participa indirectamente en la formación del acetaldehído que participa en la polimerización o directamente en la formación de una semiquinona aumentando las tonalidades amarillas.
- **Condensación antocianos-taninos:** el oxígeno participa en las reacciones directas de condensación entre los antocianos y flavanoles al oxidar al compuesto incoloro formado a su forma flavilio de color rojo intenso lo que aumenta la intensidad de color, la cual estará en equilibrio en función del pH con la forma carbinol incolora o la forma quinona de color malva. El oxígeno también está implicado al oxidar el etanol a acetaldehído, el cual interviene en la condensación de flavanol y antociano formando complejos que en función de su pH presentarán tonalidades rojas, violáceas o incoloras.
- **Condensación de los antocianos y los flavanoles mediante la participación del acetaldehído:** lo que conlleva a la formación de un pigmento de color violáceo.
- **Condensación de antocianos:** la condensación de antocianos puede estar mediada por el acetaldehído procedente de la oxidación del etanol formando antocianos ligados, los cuales mantendrán su color rojo.
- **Unión de los flavanoles con el ácido glioxílico** (procedente de la oxidación del ácido tartárico): conducen a la formación de sales de xantilio de color amarillo anaranjado (*Figura 2.3*).

- **Formación de piranoantocianos:** son compuestos formados por reacciones entre los antocianos y otros constituyentes del vino ⁴². Normalmente tienen una tonalidad anaranjada, excepto las portisinas y los dímeros de piranoantocianos que aportan colores azules y turquesas. La oxigenación moderada beneficia la formación de piranoantocianos, ya que muchos de ellos no se formarían si no hay presencia de oxígeno ⁴³.

La disminución de la concentración de antocianos monoméricos observada por la oxigenación controlada da como resultado un aumento de compuestos polimerizados, mayor proporción de los pigmentos rojos y estabilidad del color, ya que son más resistentes a los cambios de pH, la influencia del SO₂ y a la descomposición. La adición de oxígeno debe realizarse de manera controlada y no en cantidades excesivas, ya que esto puede conducir a una formación excesiva de acetaldehído, una polimerización excesiva y la precipitación de la materia de color. Una cantidad demasiado alta de oxígeno combinada con una temperatura alta puede, a su vez, causar la desintegración de los taninos y los antocianos, lo que lleva a una pérdida en la intensidad de color, disminuyendo los rojos y aumentando el color amarillo.

2.7.- Conclusiones

La configuración fundamental del oxígeno limita la oxidación del vino, son los metales, en especial el hierro y cobre, los que superan esta limitación conduciendo a que el oxígeno pueda reaccionar con los sustratos susceptibles a la oxidación. El impacto del oxígeno en el vino depende del contenido en sustratos de oxidación, del pH y de la temperatura, por lo que las técnicas de vinificación deben ir dirigidas a aumentarlos o disminuirlos dependiendo del vino que se quiera obtener. Los compuestos fenólicos son los compuestos más reductores, aunque no hay que despreciar el papel del resto de sustratos oxidables, como son el ácido tartárico, ácido ascórbico y etanol por la importancia en las características finales del vino. El dióxido de azufre es el principal compuesto adicionado al vino para evitar el deterioro por el contacto con el oxígeno evitando tanto las oxidaciones enzimáticas como las químicas, además sus efectos antioxidantes se complementan con el de los fenoles. La formación de quinonas al contacto con el oxígeno en los mostos es fundamentalmente por la acción de las enzimas. En la etapa fermentativa el oxígeno desempeña un papel clave ya que es necesario para las levaduras, además de que una adición controlada mejora las características sensoriales. Una vez acabado el vino es el radical hidroperóxido el que provoca la oxidación de los compuestos fenólicos a quinonas formando peróxido de hidrógeno. En general, esta oxidación química es adversa en los vinos blancos, ya que contribuye al pardeamiento y a cambios negativos en el aroma y el sabor, pero positiva en los vinos tintos cuando se produce de manera controlada durante un periodo de tiempo relativamente largo, debido a una mejora aromática que potencia los aromas afrutados, integrando los aromas de madera y atenuando los aromas de reducción, verdes y vegetales. Desde el punto de vista gustativo, esta oxidación reduce el amargor y la astringencia y confiere cuerpo al vino, mientras que desde el punto de vista de los atributos visuales permite la estabilidad del color debido a la mayor proporción de pigmentos rojos. La exposición excesiva al oxígeno influye negativamente en el aroma de los vinos debido a la acumulación de aldehídos de Strecker y acetaldehído y otros compuestos relacionados con la oxidación, aunque esto se atenúa más en los vinos tintos debido a la presencia de fenoles en mayor concentración que pueden reaccionar con los aldehídos. Además, esta exposición incontrolada al oxígeno provoca cambios muy rápidos en aromas y colores, especialmente cambios en flavanoles y, en vinos tintos, también en antocianos, con formación excesiva de acetaldehído. En cualquier caso, el control del O₂ durante el proceso de vinificación es fundamental porque afecta a las características sensoriales del vino, ya que la exposición en el momento inadecuado con la incorporación de cantidades no deseadas puede provocar su deterioro. Por este motivo, en los siguientes capítulos se describe la incorporación de oxígeno en las distintas etapas, así como las medidas que deben adoptarse para gestionar el oxígeno en la bodega.

2.8.- Referencias

1. du Toit, W.; Marais, J.; Pretorius, I.S.; du Toit, M. , Oxygen in must and wine: A review. *S. Afr. J. Enol. Vitic.*, 2006, 27, 76–94.
2. Tarko, T.; Duda-Chodak, A.; Sroka, P.; Siuta, M. The impact of oxygen at various stages of vinification on the chemical composition and the antioxidant and sensory properties of white and red wines. *Int. J. Food Sci.* , 2020, 7902974.
3. Oliveira C.M.; Silva Ferreira, A.C.; De Freitas, V.; Silva, A.M.S. Oxidation mechanisms occurring in wines. *Food Res. Int.* 2011, 44, 1115–1126.
4. Danilewicz, J.C.; Chemistry of manganese and interaction with iron and copper in wine. *Am. J. Enol. Vitic.* 2016, 67(4), 377–384.
5. Kreitman, G.; Cantu, A.; Waterhouse, A. Effect of metal chelators on the oxidative stability of model wine. *J. Agric. Food Chem.* 2013, 61 (39), 9480–9487.
6. Fracassetti, D.; Coetzee, C.; Vanzo, A.; Ballabio, D.; du Toit W.J. Oxygen consumption in south african sauvignon blanc wines: role of glutathione, sulphur dioxide and certain phenolics. *S. Afr. J. Enol. Vitic.* 2013, 34 (2), 156–169.
7. Waterhouse, A. L.; Laurie, F. V. Oxidation of wine phenolics: a critical evaluation and hypotheses. *Am J Enol Vitic.* 2006, 57, 306–313.
8. Danilewicz, J.C. Review of reaction mechanisms of oxygen and proposed intermediate reduction products in wine: Central role of iron and copper. *Am J Enol Vitic.* 2003, 54 (2), 73–85.
9. Elias, R.J., Andersen, M.L.; Skibsted, L.H.; Waterhouse, A.L. Identification of free radical intermediates in oxidized wine using electron paramagnetic resonance spin trapping. *J. Agric. Food Chem.* 2009, 57 (10), 4359–4365.
10. Coetzee, C.; du Toit, W.J. Sauvignon blanc wine: contribution of ageing and oxygen on aromatic and non-aromatic compounds and sensory composition: A review. *S. Afr. J. Enol. Vitic.* 2015, 36 (3), 347–365.
11. Fulcrand, H.; Dueñas, M.; Salas, E.; Cheynier, V. Phenolic reactions during winemaking and aging. *Am. J. Enol. Vitic.* 2006, 57 (3), 289–297.
12. Li, H.; Guo, A.; Wang, H. Revier. Mechanisms of oxidative browning of wine. *Food Chem.* 2008, 108, 1–13 .
13. Atanasova, V.; Fulcrand, H.; Le Guernevé, C.; Cheynier, V.; Moutounet, M. Structure of a new dimeric acetaldehyde malvidin 3-glucoside condensation product. *Tetrahedron Lett.* 2022, 43, 6151–6153.
14. Marrufo Curtido, A. Formación, reacción y acumulación de acetaldehído y aldehídos de Strecker durante la oxidación del vino. Tesis doctoral, Universidad de Zaragoza, 2023. ISSN 2254-7606.
15. Singleton, V.L.; Salgues, M.; Zaya, J.; Trousdale, E. Caftaric acid disappearance and conversion to products of enzymic oxidation in grape must and wine. *Am. J. Enol. Vitic.* 1985, 36 (1), 50–56.
16. Lavigne, V.; Dubourdieu, D. Affinamento sulle fecce e freschezza dei vitigni bianchi. *VigneVini*, 2004, 31, 58–66(16)
17. Ugliano, M.; Kwiatkowski, M.; Vidal, S.; Capone, D.; Siebert, T.; Dieval, J.; Aagaard, O.; Waters, E.J. Evolution of 3-mercaptohexanol, hydrogen sulfide, and methyl mercaptan during bottle storage of Sauvignon blanc wines. Effect of glutathione, copper, oxygen exposure, and closure-derived oxygen. *J. Agric. Food Chem.* 2011, 59, 2564–2572.
18. Roussis, I.G.; Sergianitis, S. Protection of some aroma volatiles in a model wine medium by sulphur dioxide and mixtures of glutathione with caffeic acid or gallic acid. *Flav. Frag. J.* 2008, 23, 35–39.
19. Hosry, L.E.; Auezova, L.; Sakr, A.; Hajj-Moussa, E. Browning susceptibility of white wine and antioxidant effect of glutathione. *Intern. J. Food Sci. Techn.* 2009, 44, 2459–2463.
20. Bradshaw, M.P.; Prenzler, P.D.; Scollary, G.R. Ascorbic acid-induced browning of (+)-catechin in a model wine system. *J. Agric. Food Chem.* 2001, 49(2), 934–93.
21. Barril, C.; Clark, A.C.; Prenzler, P.D.; Karuso, P.; Scollary, G. Formation of pigment precursor (+)-1'-methylene-6"-hydroxy-2H-furan-5"-one-catechin isomers from (+)-catechin and a degradation product of ascorbic acid in a model wine system. *J. Agric. Food Chem.* 2009, 57, 9539–9546.
22. Danilewicz, J.C.; Seccombe, J.T.; Whelan, J. Mechanism of interaction of polyphenols, oxygen, and sulphur dioxide in model wine and wine. *Am. J. Enol. Vitic.* 2008, 59, 128–136.
23. Bueno, M.; Marrufo-Curtido, A.; Carrascón, V.; Fernández-Zurbano, P.; Escudero, A.; Ferreira, V. Formation and accumulation of acetaldehyde and strecker aldehydes during red wine oxidation. *Front Chem.* 2018, 6, artículo 20.
24. Cejudo Bastante, M.J. Nuevas tecnologías de vinificación basadas en la aplicación del oxígeno y uso de sustitutos del anhídrido sulfuroso. Tesis doctoral, Universidad de Castilla-La Mancha, 2009. Ediciones de la UCLM. I.S.B.N. 978-84-8427-790-3.

25. Zimdars, S.; Hitschler, J.; Schieber, A.; Weber F. Oxidation of wine polyphenols by secretomes of wild botrytis cinerea strains from white and red grape varieties and determination of their specific laccase activity. *J. Agric. Food Chem.* 2017, 65, 48, 10582–10590.
26. Ribéreau-Gayon, P.; Dubourdieu, D.; Doneche, B.; Lonvaud, A. *Handbook of Enology, Volume 1: The microbiology of winemaking and vinifications.* Ed. Ribéreau-Gayon P., Wiley, Chichester, England, 2000.
27. Haibach, R. Hyperoxidation. https://winemakermag.com/technique/hyperoxidation?fbclid=IwAR0PUZ3JQuHL7HJHwmeOf_dUmAlfCk9e2eDqZB-jsQZlX86eyArjktJSNE. Consultado en junio de 2023.
28. Schneider, V. Must hyperoxidation: A review. *Am. J. Enol. Vitic.* 1998, 49 (1), 65–73.
29. Valero, E.; Millan, C.; Ortega, J. M. Influence of oxygen addition during growth phase on the biosynthesis of lipids in *Saccharomyces cerevisiae* (M330-9) in enological fermentations. *J. Biosc. Bioeng.* 2001, 92, 33–38.
30. Varela, C.; Torrea, D.; Schmidt, S.A.; Ancin-Azpilicueta, C.; Henschke, P.A. Effect of oxygen and lipid supplementation on the volatile composition of chemically defined medium and Chardonnay wine fermented with *Saccharomyces cerevisiae*. *Food Chem.* 2012, 135 (4), 2863–2871.
31. Ugliano, M. Oxygen contribution to wine aroma evolution during bottle aging. *J. Agric. Food Chem.* 2013, 61 (26), 6125–6136.
32. Waterhouse, A.L.; Sacks, G.L.; Jeffery D.W. *Understanding Wine Chemistry.* Ediciones: Wiley. 2016. ISBN:9781118627808.
33. Escudero, A.; Asensio, E.; Cacho, J.; Ferreira, V. Sensory and chemical changes of young white wines stored under oxygen. An assessment of the role played by aldehydes and some other important odorants. *Food Chem.* 2002, 77 (3), 325–331.
34. Rizzi, G. Formation of strecker aldehydes from polyphenol-derived quinones and amino acids in a nonenzymic model system. *J. Agric. Food Chem.* 2006, 54 (5), 1893–1897.
35. Delgado, R.R.; Hidalgo, F.J. Contribution of phenolic compounds to food flavors: strecker-type degradation of amines and amino acids produced by o- and p-diphenols. *J. Agric. Food Chem.* 2014, 63 (1), 312–318.
36. Ferreira, V.; Escudero, A.; Fernández P.; Cacho J.F. Changes in the profile of volatile compounds in wines stored under oxygen and their relationship with the browning process. *Z Lebensm Unters Forsch A.* 1997, 205, 392–396.
37. Blanchard, L.; Darriet, P.; Dubourdieu D. Reactivity of 3-Mercaptohexanol in red wine: impact of oxygen, phenolic fractions, and sulfur dioxide. *Am J Enol Vitic.* 2004, 55, 115–120.
38. Balboa-Lagunero, T Arroyo, T.; Cabellos, J.M.; Aznar, M. Sensory and olfactometric profiles of red wines after natural and forced oxidation processes. *Am. J. Enol. Vitic.* 2011, 62 (4), 527–535.
39. Gambuti, A.; Siani, T.; Picariello, L.; Rinaldi, A.; Lisanti, M.T.; Ugliano, M.; Dieval, J.B.; Moio, L. Oxygen exposure of tannin-rich red wines during bottle aging. Influence on phenolics and color, astringency markers and sensory attributes. *Eur. Food Res. Technol.* 2017, 243, 669–680.
40. Bonilla, F.; Mayen, M.; Merida, J.; Medina, M. Yeasts used as fining treatment to correct browning in white wines. *J. Agric. Food Chem.* 2001, 49 (4), 1928–1933.
41. Cosme, J.; Andrea-Silva, J.; Filipe-Ribeiro, L.; Moreira, A.S.P.; Malheiro, A.C.; Coimbra, M.A.; Domingues, M.R.M.; Nunes, F.M. The origin of pinking phenomena in white wines: An update. *BIO Web Conf.* 2019, 13, 02013.
42. Waterhouse, A.L.; Zhu, J. A quarter century of wine pigment discovery. *J. Sci. Food Agric.* 2020, 100 (14), 5093–5101.
43. Zhang, X.K.; Zhao, X.; Ying, S.; Duan, C.Q. The formation mechanism of pinotin A in model wine: Experimental and theoretical investigation. *Food Chem.* 2022, 280, 132196.



Capítulo 3

Los gases para desplazar el oxígeno en enología

Ignacio Nevares Domínguez¹, Jordi Mallen Pomes² y María del Álamo Sanza¹

¹ Grupo UVaMOX- Universidad de Valladolid ² Carburos Metálicos, S.A.

3.1. Introducción

3.2. Tipos de gases utilizados en enología para desplazar el oxígeno

3.3. La importancia de estos gases en enología

3.4. Métodos de aplicación de los gases para desplazar al oxígeno

3.5. Consideraciones de seguridad y regulaciones

3.6. Conclusiones

3.7. Referencias

3.1.- Introducción

La utilización de gases capaces de desplazar el oxígeno en enología desempeña un papel crucial en la protección y preservación de la calidad del vino. El dióxido de carbono (CO_2) y el nitrógeno (N_2), que están presentes en la atmósfera, pueden ser utilizados para desplazar el oxígeno actuando como barrera protectora contra la oxidación. El argón (Ar) es un gas de inertizado que no reacciona químicamente con otras sustancias a temperatura ambiente y, por lo tanto, no alteran las propiedades del vino.

El principal objetivo de utilizar gases que desplacen el oxígeno en enología es minimizar la exposición del vino al oxígeno atmosférico y mantener un entorno controlado durante diferentes etapas del proceso de producción y almacenamiento del vino. Como se ha visto en el [Capítulo 2](#), la exposición excesiva al oxígeno puede provocar la oxidación del vino, lo que resulta en la pérdida de aromas y atributos frescos, la aparición de defectos organolépticos y la reducción de la vida útil del vino.

El CO_2 es uno de los gases más comúnmente utilizados en enología debido a su disponibilidad y a sus propiedades antioxidantes y antimicrobianas. Se utiliza para proteger el mosto durante la fermentación,

y el vino en el trasiego, el embotellado y el almacenamiento. Además, el CO_2 se genera naturalmente durante la fermentación alcohólica y se puede utilizar para controlar y regular esta fermentación. El N_2 y el Ar también se utilizan como gases protectores frente al oxígeno atmosférico en enología, principalmente para proteger el vino en el embotellado y evitar la oxidación. El N_2 , al ser un gas de inertizado y estable a temperatura ambiente, es efectivo para minimizar la exposición al oxígeno durante el embotellado. El Ar, por su parte, se utiliza especialmente en vinos de alta gama debido a su densidad y capacidad para formar una capa protectora sobre el vino, evitando el contacto con el oxígeno y preservando los atributos del vino.

La aplicación de gases en enología requiere de técnicas y equipamiento adecuados, desde sistemas de inyección directa de gas en depósitos y barricas, o para generar capas o coberturas de gas protector para cubrir la superficie del vino, hasta sistemas para el control de la presión y la concentración de gas utilizada. Es esencial seguir las buenas prácticas enológicas y cumplir con las regulaciones de seguridad y medioambiente al trabajar con gases para el desplazamiento del oxígeno¹⁻⁵.

3.2.- Tipos de gases utilizados en enología para desplazar el oxígeno

A. Dióxido de carbono (CO₂)

El dióxido de carbono es un gas incoloro e inodoro que se encuentra de forma natural en el aire y se produce durante la fermentación alcohólica. En enología, el CO₂ se utiliza ampliamente debido a sus propiedades antioxidantes y antimicrobianas.

Características y propiedades del CO₂:

- *Peso molecular:* El CO₂ tiene un peso molecular de 44 g/mol, lo que significa que es más pesado que el aire y tiende a depositarse y acumularse en la parte inferior de los recipientes.
- *Solubilidad en agua:* El CO₂ es altamente soluble en agua, lo que facilita su disolución en el mosto y el vino.

Uso en la protección contra la oxidación y la fermentación controlada:

- *Efecto antioxidante del CO₂:* El CO₂ ayuda a prevenir la oxidación del vino al formar una barrera protectora en la superficie del líquido, evitando el contacto directo con el oxígeno del aire.
- *Inhibición de la actividad microbiana:* El CO₂ tiene propiedades antimicrobianas que ayudan a controlar el crecimiento de microorganismos no deseados, como bacterias y levaduras.

Métodos de aplicación del CO₂:

- *Inyección directa en depósitos y barricas:* El CO₂ se puede inyectar directamente en depósitos de fermentación, barricas o recipientes de almacenamiento para desplazar el aire y crear una atmósfera rica en CO₂.
- *Generación in situ mediante fermentación controlada:* Al controlar la temperatura y el flujo de aire durante la fermentación alcohólica, se puede generar CO₂ de manera controlada, lo que ayuda a mantener un ambiente libre de oxígeno.

B. Nitrógeno (N₂)

El nitrógeno es un gas incoloro e inodoro que constituye aproximadamente el 78% del aire atmosférico. Se utiliza en enología debido a su naturaleza inerte a temperatura ambiente y su capacidad para minimizar la exposición al oxígeno.

Características y propiedades del N₂:

- *Inertidad y estabilidad:* El nitrógeno es un gas de inertizado y estable a temperatura ambiente, lo que significa que no reacciona químicamente con otras sustancias y no afecta las características del vino.

Uso en la protección contra la oxidación y la estabilización del vino:

- *Minimización de la exposición al oxígeno:* El nitrógeno se utiliza para desplazar el oxígeno por dilución en los espacios vacíos de los depósitos, barricas o botellas, reduciendo así la posibilidad de oxidación del vino.
- *Prevención de la actividad microbiana:* Al crear una atmósfera rica en nitrógeno y pobre en oxígeno, se reduce la presencia de microorganismos no deseados en el vino.

Métodos de aplicación del N₂:

- *Inyección directa:* El nitrógeno se puede inyectar directamente en los recipientes de almacenamiento para desplazar el aire y crear una atmósfera pobre en oxígeno.
- *Uso de coberturas de gas protector,* que consisten en una capa de nitrógeno que cubre la superficie del vino en depósitos o barricas, ayudan a evitar el contacto con el oxígeno del aire.

C. Argón (Ar)

El argón es un gas de inertizado y noble que se encuentra en cantidades traza en la atmósfera. Debido a su densidad y estabilidad, el argón se utiliza en enología para la protección de vinos de alta gama.

Características y propiedades del Ar:

- *Peso molecular:* El argón tiene un peso molecular de 40 g/mol, lo que lo hace más pesado que el aire y permite que forme una capa protectora sobre la superficie del vino.
- *Estabilidad y no reactividad:* El argón como gas de inertizado no reacciona químicamente con otras sustancias y no altera las características del vino.

Uso en la protección contra la oxidación y la conservación a largo plazo:

- *Formación de una capa protectora:* El argón se utiliza para formar una capa densa y estable sobre la superficie del vino, evitando la exposición al oxígeno y protegiendo los aromas y sabores.

Métodos de aplicación del Ar:

- *Inyección directa:* El argón se puede inyectar directamente en los depósitos o barricas para crear una atmósfera protectora.
- *Uso de cobertura de gas de inertizado:* Al igual que con el nitrógeno, las capas de argón se utilizan para cubrir la superficie del vino y evitar la oxidación.

Tabla 3.1. Propiedades físicas de los gases de uso en enología para el desplazamiento y protección frente al oxígeno

Fórmula química	N ₂	CO ₂	Ar
Peso molecular	28,013 g/mol	44,011 g/mol	39,948 g/mol
Temperatura ebullición (1 atm)	-195,8 °C	-78,4 °C	-185,9 °C
Temperatura crítica	-146,9 °C	-56,57 °C	-122,3 °C
Presión crítica	33,9 bar	73,82 bar	48,98 bar
Densidad gas (0°C, 1 atm)	1,251 g/L	1,951 g/L	1,784 g/L
Densidad gas (15°C, 1 atm)	1,185 g/L	1,848 g/L	1,690 g/L
Densidad líquido (p.e., 1 atm)	0,805 g/mL	1,032 g/mL (-20 °C, 20 bar)	1,404 g/mL
Peso específico (aire=1)	0,967	1,539	1,38
Solubilidad en agua (15°C, 1 atm)	0,0216 g N ₂ /L H ₂ O	101,1 cm ³ CO ₂ /100 cm ³ H ₂ O	0,0671 g Ar/L H ₂ O
Capacidad calorífica a presión constante (0°C)	0,249 cal/g·°C		
Calor latente de vaporización (1 atm)	47,6 cal/g	42,9 cal/g	38,53 cal/g
Primer potencial de ionización	15,581 eV		15,750 eV
Calor latente de sublimación (1 atm)		137 cal/g	

D. Mezclas de gases

Las mezclas de estos gases que desplazan el oxígeno, como $N_2:CO_2$ (nitrógeno y dióxido de carbono) y $Ar:CO_2$ (argón y dióxido de carbono), se utilizan en diversos sectores, incluida la industria del vino, con diferentes propósitos.

Mezcla de CO_2 en N_2

La mezcla de CO_2 en N_2 es comúnmente utilizada en la industria del vino para reemplazar el oxígeno en los espacios de cabeza de los recipientes y proteger el vino contra la oxidación.

Esta mezcla se caracteriza por tener propiedades de protección por desplazamiento del oxígeno, lo que evita la interacción con los componentes del vino y minimiza la degradación oxidativa.

El dióxido de carbono (CO_2) es un gas que ayuda a reducir la concentración de oxígeno en los espacios de cabeza, formando una barrera protectora sobre el vino. Por otro lado, el nitrógeno (N_2) se utiliza para proporcionar una capa adicional de protección y mejorar la eficacia del CO_2 al desplazar el oxígeno presente.

Propiedades físicas de la mezcla de $N_2:CO_2$ (80%:20%):

- Punto de ebullición: Aproximadamente $-64,5\text{ }^\circ\text{C}$.
- Densidad: Aproximadamente $1,277\text{ kg/m}^3$.

- Solubilidad en agua: La solubilidad del CO_2 en la mezcla de $N_2:CO_2$ a $15\text{ }^\circ\text{C}$ y 1 atm puede ser aproximadamente de $1,84\text{ g/100 mL}$.

Mezcla de CO_2 en Ar:

La mezcla $Ar:CO_2$ también se emplea en la industria del vino, aunque en menor medida.

Al igual que la mezcla de $N_2:CO_2$, esta combinación de gases se utiliza para proteger el vino contra la oxidación. El dióxido de carbono (CO_2) en esta mezcla actúa como agente protector, mientras que el argón (Ar) se utiliza para reemplazar el oxígeno y crear una barrera inerte sobre el vino.

El argón es un gas noble que no interactúa con el vino y tiene una mayor densidad que el oxígeno, lo que facilita su desplazamiento. Esto contribuye a una mejor protección contra la oxidación y ayuda a preservar las características organolépticas del vino durante su almacenamiento y envasado.

Propiedades físicas de la mezcla de $Ar:CO_2$ (80%:20%):

- Punto de ebullición: Aproximadamente $-67\text{ }^\circ\text{C}$.
- Densidad: Aproximadamente $1,540\text{ kg/m}^3$.
- Solubilidad en agua: La solubilidad del CO_2 en la mezcla de $Ar:CO_2$ a $15\text{ }^\circ\text{C}$ y 1 atm puede ser aproximadamente de $0,96\text{ g/100 mL}$.



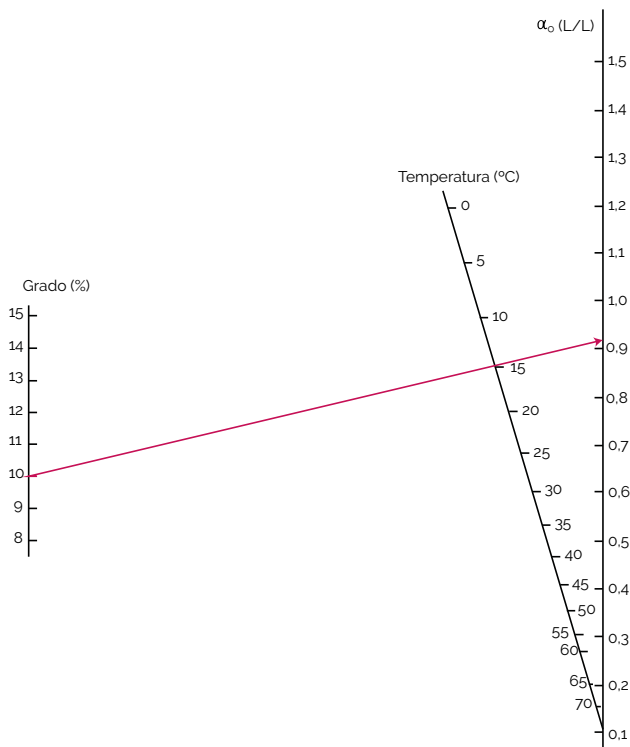


Fig. 3.1.- Ábaco para determinar la solubilidad del CO₂ en un vino seco (Ejemplo: grado alcohólico 10° GL, temperatura 15 °C, α_o = 0,92 L/L)⁶

3.3.- La importancia de estos gases en enología

A. Prevención de la oxidación

La oxidación en el vino es uno de los principales factores que pueden afectar negativamente su calidad. Cuando el vino está expuesto al oxígeno, se producen reacciones químicas que pueden alterar sus componentes y características organolépticas. La oxidación puede resultar en la pérdida de aromas, la degradación del color y la aceleración del envejecimiento.

Los gases que desplazan el oxígeno desempeñan un papel crucial en la protección contra la oxidación del vino, ya que, al introducir estos gases en los espacios vacíos de los depósitos, barricas o botellas, se crea una barrera entre el vino y el oxígeno del aire. Esto ayuda a minimizar la exposición al oxígeno y reducir los efectos negativos de la oxidación. Los gases como el nitrógeno (N₂) y el argón (Ar), son particularmente efectivos en esta función debido a su naturaleza no reactiva con el vino a temperatura ambiente.

B. Control de la fermentación

Una fermentación no controlada puede tener consecuencias negativas en la calidad del vino, puede conducir a la producción excesiva de dióxido de carbono durante la fermentación alcohólica, lo que resulta en presiones peligrosas en los recipientes y posibles explosiones. Además, una fermentación no controlada puede

dar lugar a la proliferación de microorganismos no deseados, como bacterias y levaduras, que pueden alterar el perfil sensorial del vino.

La fermentación maloláctica es una fermentación secundaria que puede ocurrir después de la fermentación alcohólica. Si no se controla adecuadamente, puede causar alteraciones no deseadas en el vino, como la formación de sabores amargos o desequilibrados. Los gases se utilizan para evitar la fermentación maloláctica no deseada al crear una atmósfera pobre en oxígeno que inhibe el crecimiento de las bacterias lácticas responsables de esta fermentación.

C. Protección durante el embotellado y almacenamiento

Durante el proceso de embotellado, es fundamental minimizar la exposición del vino al oxígeno. El oxígeno incorporado en esta etapa puede tener un efecto perjudicial en la calidad y la estabilidad del vino durante su permanencia en botella, causando oxidación y alteraciones sensoriales. Por lo tanto, es esencial tomar medidas para garantizar que el vino esté protegido de la exposición al oxígeno durante el embotellado.

Los gases que desplazan al oxígeno se utilizan durante el embotellado para proteger el vino de la oxida-

ción. Antes de sellar las botellas, se puede aplicar un chorro de este tipo de gas, como nitrógeno o dióxido de carbono, para desplazar el oxígeno presente en la parte superior de la botella. Esto crea una atmósfera protectora en el taponado que ayuda a preservar la calidad del vino durante el almacenamiento y evita la oxidación prematura.

D. Mejora de la estabilidad y conservación del vino

Estos gases desempeñan un papel importante en la mejora de la estabilidad del vino. Al reducir la exposición al oxígeno, ayudan a preservar los aromas, sabor y color del vino, manteniendo su frescura y características organolépticas durante un período más largo. Además, los gases que desplazan al oxígeno pueden inhibir el crecimiento de microorganismos no deseados, como bacterias y levaduras, que podrían causar alteraciones y deterioro del vino.

La conservación a largo plazo del vino es crucial para garantizar su calidad y evolución adecuada. Los gases que desplazan al oxígeno desempeñan un papel significativo en la conservación del vino, al ayudar a mantener una atmósfera pobre o incluso libre de oxígeno que evita la oxidación y la alteración del vino a lo largo del tiempo. Esto es especialmente relevante en vinos de guarda y de alta gama, donde se busca una evolución lenta y controlada del producto.

3.4.- Métodos de aplicación de los gases para desplazar al oxígeno

A. Inyección directa en el depósito o bodega

El método de inyección directa consiste en introducir el gas directamente en el depósito o bodega que contiene el vino mediante un sistema de inyección que suministra el gas a través de una boquilla o tubo. El gas se introduce lentamente para desplazar el aire presente en el recipiente y crear una atmósfera protectora (*Figura 3.2*).

Al utilizar la inyección directa, es importante tener en cuenta algunas consideraciones de seguridad, ya que se deben seguir las normas y regulaciones relacionadas con la manipulación y almacenamiento de los gases. Además, es necesario garantizar una distribución adecuada del gas en el recipiente para lograr una protección uniforme del vino. La eficacia de la inyección directa depende de la velocidad de inyección, la duración del proceso y la capacidad del sistema de suministro de gas.

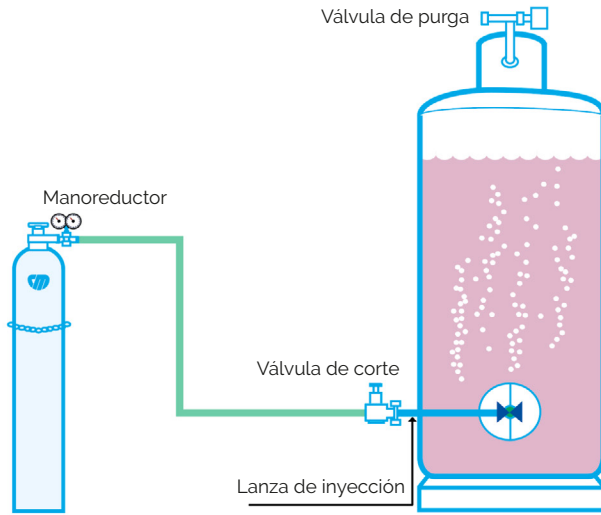


Fig. 3.2. sistema de inertización y/o bazuqueo mediante lanza de inyección. (Carburos metálicos-Air products)

B. Uso de sistemas de gases para el desplazamiento del oxígeno

Los sistemas de gases son dispositivos diseñados específicamente para suministrar y controlar la cantidad de gas para el desplazamiento del oxígeno utilizado en el proceso enológico. Estos sistemas pueden ser automáticos o manuales y están compuestos por reguladores de presión, medidores de flujo y válvulas de control (Figura 3.3). Permiten una aplicación más precisa y controlada de los gases en comparación con la inyección directa.

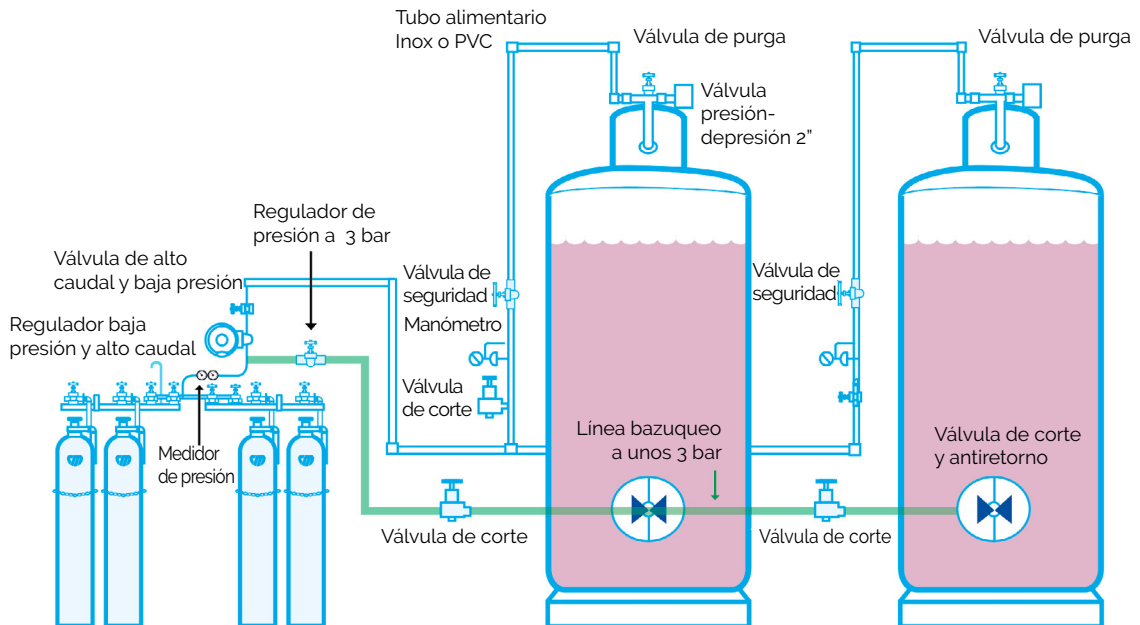


Fig. 3.3. sistema de inertización y bazuqueo fijo con kit 2+2 botellas. (Carburos metálicos-Air products)

El uso de sistemas de gases ofrece varias ventajas ya que proporcionan un control más preciso de la cantidad de gas utilizado, lo que asegura una protección óptima del vino. Además, algunos sistemas permiten la regulación de la presión y el flujo de gas, lo que facilita la adaptación a diferentes tipos de vino y procesos enológicos. Sin embargo, los sistemas de gases pueden ser más costosos y requieren un mantenimiento adecuado para garantizar su funcionamiento correcto.

C. Cubierta de gas de protección frente al oxígeno en depósitos y barricas

La cubierta de gas de protección consiste en la aplicación de una capa de gas de inertizado o que desplaza al oxígeno sobre la superficie del vino en depósitos o barricas (*Figura 3.4*). Se crea una atmósfera protectora que evita el contacto del vino con el aire y, por lo tanto, con el oxígeno. Esta técnica se utiliza especialmente durante la crianza del vino, cuando se busca preservar su calidad y evitar la oxidación.

La cubierta de gas protector ofrece varios beneficios. En primer lugar, ayuda a proteger el vino de la oxidación durante el almacenamiento y la crianza, también contribuye a mantener los aromas y sabores del vino, evitando alteraciones indeseadas. Además, la cubierta de gas pobre en oxígeno puede ayudar a prevenir el crecimiento de microorganismos no deseados en la superficie del vino, lo que contribuye a su estabilidad y conservación.

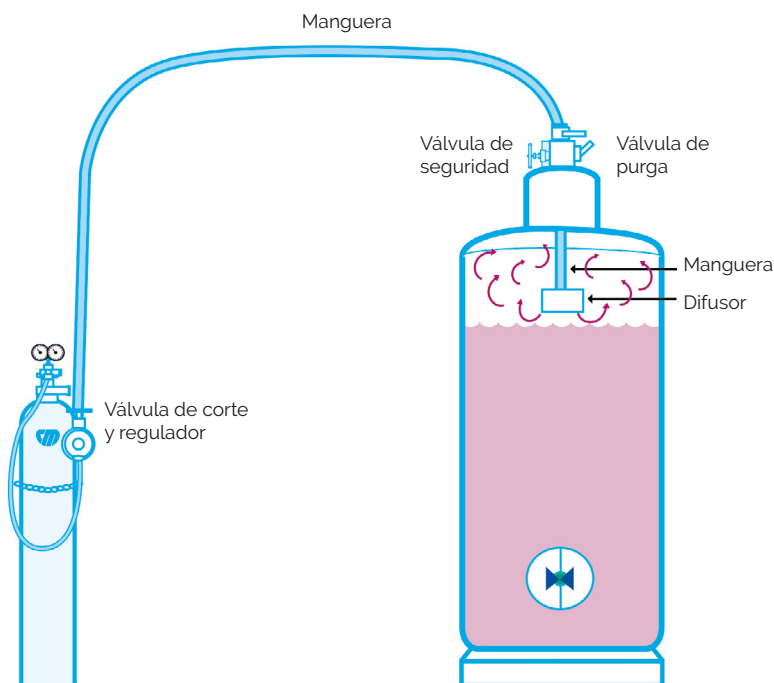


Fig. 3.4. sistema de inertización por cobertura (blanketing). (Carburos metálicos-Air products)

3.5.- Consideraciones de seguridad y regulaciones

A. Manipulación y almacenamiento de gases

La manipulación de gases requiere precauciones específicas para garantizar la seguridad del personal y prevenir cualquier riesgo potencial. Algunas de las precauciones de seguridad incluyen:

- *Capacitación adecuada:* Es fundamental que el personal esté capacitado en el manejo seguro de los gases, incluyendo el conocimiento de los riesgos asociados y las medidas de seguridad necesarias.
 - *Uso de equipo de protección personal (EPP):* Se deben usar EPP, como guantes, gafas de seguridad y ropa protectora, para minimizar el riesgo de exposición al gas.
 - *Manipulación adecuada de cilindros:* Los cilindros de gas deben ser manejados con precaución para evitar caídas, golpes o daños que puedan causar fugas o rupturas.
 - *Ventilación adecuada:* Es importante trabajar en áreas bien ventiladas para evitar acumulaciones de gas y garantizar una concentración segura en el ambiente.
 - *Prevención de ignición:* Los gases utilizados para el desplazamiento del oxígeno son no inflamables, pero se deben tomar medidas para prevenir la ignición de otros materiales inflamables presentes en el entorno de trabajo.
- El almacenamiento de los gases debe realizarse de acuerdo con las recomendaciones del fabricante y las normas de seguridad. Algunas consideraciones importantes son:
- *Almacenamiento en áreas designadas:* Los cilindros de gas deben ser almacenados en áreas específicas, alejadas de fuentes de calor, llamas abiertas o sustancias inflamables.
 - *Sistemas de sujeción adecuados:* Los cilindros deben estar correctamente sujetos para prevenir caídas y daños.
 - *Identificación clara:* Cada cilindro debe estar claramente identificado con la etiqueta del gas que contiene y otros datos relevantes, como la fecha de vencimiento.
 - *Inspección regular:* Se deben realizar inspecciones periódicas para detectar cualquier signo de daño o deterioro en los cilindros y tomar las medidas adecuadas.

B. Normativas y regulaciones relacionadas

La utilización de gases en la industria del vino está sujeta a normativas y regulaciones de seguridad y medioambientales. Estas normativas varían según la región y es responsabilidad de las bodegas cumplir con los requisitos establecidos. Algunas áreas de regulación incluyen:

- *Manipulación y almacenamiento seguro de gases:* Existen regulaciones específicas que establecen los requisitos de seguridad para la manipulación y almacenamiento de gases en la industria.
 - *Gestión de residuos:* El manejo adecuado de los residuos generados durante el uso de los gases debe seguir las regulaciones establecidas para la gestión de residuos peligrosos o contaminantes.
 - *Prevención de la contaminación del aire y del agua:* Las bodegas deben cumplir con las normativas que limitan las emisiones de gases a la atmósfera y asegurar que los residuos líquidos no contaminen el agua.
- Es importante consultar las leyes y regulaciones locales, así como las directrices específicas de la industria vinícola, para determinar los requisitos legales relacionados con el uso de gases.
- Estos requisitos pueden abarcar aspectos como:
- *Registro de instalaciones y equipos:* Algunas jurisdicciones pueden requerir que las bodegas registren sus instalaciones y equipos relacionados con el uso de gases.
 - *Certificaciones y licencias:* Dependiendo del país y las regulaciones específicas, es posible que se requieran certificaciones o licencias para el manejo y uso de gases.
 - *Seguimiento y documentación:* Las bodegas pueden estar obligadas a mantener registros y documentación relacionada con el uso de gases, como registros de capacitación, inspecciones y controles de calidad.

3.6.- Conclusiones

En resumen, los gases utilizados para el desplazamiento del oxígeno en enología desempeñan un papel fundamental en la producción de vino al proporcionar una serie de beneficios clave.

Algunos de estos beneficios incluyen:

- *Prevención de la oxidación:* Los gases ayudan a proteger el vino contra la oxidación, preservando sus características organolépticas y evitando la aparición de aromas y sabores indeseables.
 - *Control de la fermentación:* Los gases pueden utilizarse para evitar la fermentación no deseada, como la fermentación maloláctica, que puede alterar las características del vino.
 - *Protección durante el embotellado y almacenamiento:* Los gases se utilizan para proteger el vino embotellado de la exposición al oxígeno, lo que contribuye a su estabilidad y conservación a largo plazo.
 - *Mejora de la estabilidad y conservación del vino:* Los gases ayudan a mantener la estabilidad del vino al prevenir la oxidación y protegerlo de la acción de microorganismos no deseados.
- *Conocer y cumplir con las normativas y regulaciones locales* relacionadas con el uso de gases en la industria del vino.
 - *Capacitar adecuadamente al personal en el manejo seguro de los gases*, incluyendo el uso de equipo de protección personal y la manipulación adecuada de los cilindros.
 - *Utilizar los métodos de aplicación de gases más apropiados para cada etapa del proceso enológico*, ya sea inyección directa, sistemas de gas o cubierta de gas protector.
 - *Monitorear regularmente los niveles de oxígeno en los depósitos*, barricas y botellas para garantizar una protección adecuada contra la oxidación.
 - *Almacenar los cilindros de gas de manera segura*, siguiendo las recomendaciones del fabricante y las normas de seguridad.
 - *Realizar un seguimiento y documentación adecuados de las operaciones relacionadas con el uso de gases*, incluyendo registros de capacitación, inspecciones y controles de calidad.

Para aprovechar al máximo los beneficios de los gases que desplazan y protegen frente al oxígeno atmosférico en la producción de vino, se recomienda seguir algunas pautas y buenas prácticas:

Siguiendo estas recomendaciones, las bodegas pueden optimizar el uso de gases para el desplazamiento del oxígeno y garantizar la protección y calidad del vino en todas las etapas del proceso enológico.

3.7.- Referencias

1. Ribéreau-Gayon, P., Dubourdieu, D., Donèche, B., & Lonvaud, A. Handbook of Enology, Volume 1: The Microbiology of Wine and Vinifications. Wiley, 2006.
2. Ribéreau-Gayon, P., Glories, Y., Maujean, A., & Dubourdieu, D. Handbook of Enology, Volume 2: The Chemistry of Wine Stabilization and Treatments. Wiley, 2006.
3. Zoecklein, B., Fugelsang, K., Gump, B., & Nury, F. (2014). Wine Analysis and Production. Springer Science & Business Media.
4. Jackson, R. S. (2014). Wine Science: Principles and Applications (4th ed.). Academic Press.
5. Boulton, R. (2019). The Oxford Companion to Wine. Oxford University Press.
6. Lonvaud-Funel, A.; Matsumoto, M. Le coefficient de solubilité du gaz carbonique dans les vins. VITIS-J. Grapevine Res. 1979, 18 (2), 137-137. <https://doi.org/10.5073/VITIS.1979.18.137-147>.



Capítulo 4

La oxigenación de vinos en las operaciones en bodega

Marioli Alejandra Carrasco Quiroz
Grupo UVaMOX- Universidad de Valladolid



4.1. Introducción

4.2. Incorporación de oxígeno al vino en las diferentes operaciones en bodega

4.2.1 Estrujado y prensado de la uva

4.2.2 Bombeo

4.2.3 Filtración

4.2.4 Centrifugación

4.2.5 Estabilización tartárica en continuo

4.2.6 Conservación de vinos

4.2.7 Transporte de vino en cisterna

4.2.8 Embotellado

4.3. Conclusiones

4.4. Referencias

4.1.- Introducción

El oxígeno está presente en todas las etapas de elaboración de un vino, y como se ha visto en el **Capítulo 2**, este tiene un gran impacto en las propiedades finales del vino. Conocer los aportes de oxígeno durante la producción del vino va a permitir identificar los momentos que conllevan una mayor incorporación de oxígeno y de esta forma determinar los puntos críticos durante las diferentes condiciones operativas. Este conocimiento va a permitir intervenir en las operaciones que producen mayores incorporaciones de oxígeno y de esta forma controlar y disminuir la exposición del vino al oxígeno atmosférico a lo largo de todo el proceso operativo en bodega.

Los aportes involuntarios de oxígeno pueden ser de dos tipos, los que están relacionados con la tecnología, es decir, el equipamiento usado o

bien de tipo operativo, que tiene relación con las condiciones empleadas en los diferentes procedimientos, como el uso de gases para inertización, volumen usado y temperatura ¹.

Además de las operaciones habituales en bodega, la adición voluntaria y controlada de pequeñas cantidades de oxígeno puede mejorar algunos atributos del vino. Esta adición puede realizarse a través de la técnica de microoxigenación (MOX), que fue desarrollada por Patrick Ducournau en Francia en 1991, con el fin de modificar o acelerar las diversas reacciones en las que los compuestos fenólicos son protagonistas.

Los estudios del aporte de oxígeno en las diversas operaciones en bodega son escasos, lo que se debe a la dificultad de medir adecuadamente estas

incorporaciones, ya que es necesario un equipamiento que permita un registro continuo del oxígeno disuelto en el vino durante todo el desarrollo de los diferentes procedimientos. Los estudios realizados han mostrado que **los aportes de oxígeno, debido al uso de la mayoría de los equipos y la realización de las operaciones en bodega, normalmente incorporan moderadas o bajas cantidades de oxígeno disuelto**, las cuales son menores a 0,45 mg/L, con la excepción de la filtración rotatoria al vacío y la estabilización tartárica continua

que suponen la incorporación de 2,25 mg/L y 2,71 mg/L de oxígeno disuelto al vino, respectivamente ². Estos resultados son similares a los descritos por Vidal et al. ³, con una incorporación de 2,38 mg/L durante la estabilización tartárica continua.

A continuación, se presentan los resultados de los diferentes estudios donde se ha realizado la medida de la incorporación de oxígeno en las operaciones de bodega.

4.2.- Incorporación de oxígeno al vino en las diferentes operaciones en bodega

Los niveles de oxígeno disuelto (OD) medidos en bodega durante las diferentes etapas del proceso de vinificación se describen a continuación. Tras la vendimia, las uvas son trasladadas en remolques o en camiones cisterna hasta la bodega donde se inician las distintas etapas de la vinificación, como descarga, maceración, despalillado y estrujado. Durante el transporte de la uva, en algunos casos, se realizan diferentes procedimientos para disminuir el contacto con el oxígeno y evitar que comiencen los fenómenos de oxidación, como es el caso de la adición de nieve carbónica. Posteriormente todos los movimientos del mosto y del vino, así como el empleo del equipamiento necesario para realizar todas las operaciones necesarias, suponen una incorporación habitualmente desconocida de oxígeno. Las medidas del oxígeno disuelto en el vino reflejan el contenido en el momento de la medida, pero no todo el oxígeno incorporado. El vino cuenta con una gran avidez para consumir el oxígeno y por ello cuando se realiza una operación, el vino comienza inmediatamente a consumir oxígeno. Cuando se realiza la medida, parte del oxígeno incorporado ya ha sido consumido, y las lecturas reflejan el oxígeno presente, el que no ha consumido el vino.

4.2.1.- Estrujado y prensado de la uva

Durante esta operación, el mosto se ve expuesto al aire con una alta concentración de oxígeno. Según llega el mosto al depósito vacío, se generan chorros con salpicaduras que aumentan el contacto del

mosto con el oxígeno del aire y aumenta considerablemente el nivel de OD, alcanzando entre 5 y 8 mg/L de OD ^{4,5}. El número de ciclos de prensado también aumenta el nivel de OD, con mayores valores en las últimas etapas.

4.2.2.- Bombeo

El trasiego o movimiento de vino está presente durante y después de la vinificación, y generalmente requiere del uso de bomba y mangueras que deben tener un mantenimiento para reducir la incorporación de oxígeno (ver **Capítulo 5**). Los trabajos consultados recogen la incorporación de diferentes cantidades de OD según la bomba empleada para mover el vino (*Figura 4.1*). El uso de la bomba centrífuga en vinos tintos puede llegar a incorporar 0,05 mg/L (con valores entre 0,03 y 0,10 mg/L ²), valores menores a los reportados por Vidal et al. ¹, con 0,18 mg/L. El uso de una bomba peristáltica puede incorporar 0,12 mg/L y si es de pistón, 0,20 mg/L de OD ¹. Estos valores dependen principalmente de las condiciones de aireación al inicio y final de la operación, ya que en condiciones de funcionamiento continuo y sin que se presenten fallos mecánicos, no debería presentar entrada de aire en el circuito. En remontados cerrados se han reportado valores de entre 0,03 y 0,07 mg/L, mientras que en abiertos los valores de incorporación de oxígeno pueden llegar a alcanzar entre 0,88 y 1,92 mg/L ⁶. Un remontado con bomba Venturi puede incorporar entre 1,70 y

4,30 mg/L⁶, mientras que un bombeo tanque-cisterna puede incorporar 1,81 mg/L⁷. Otros autores en cambio han informado de valores que van desde los 0,15 mg/L de OD hasta los 6 mg/L^{8,9}. Otro procedimiento que involucra el movimiento del vino y por lo tanto, la incorporación de oxígeno, es el montaje de barricas, donde se mezcla el vino de diferentes barricas al final de la maduración, con lo que se pueden incorporar alrededor de 1,75 mg/L de OD⁹.

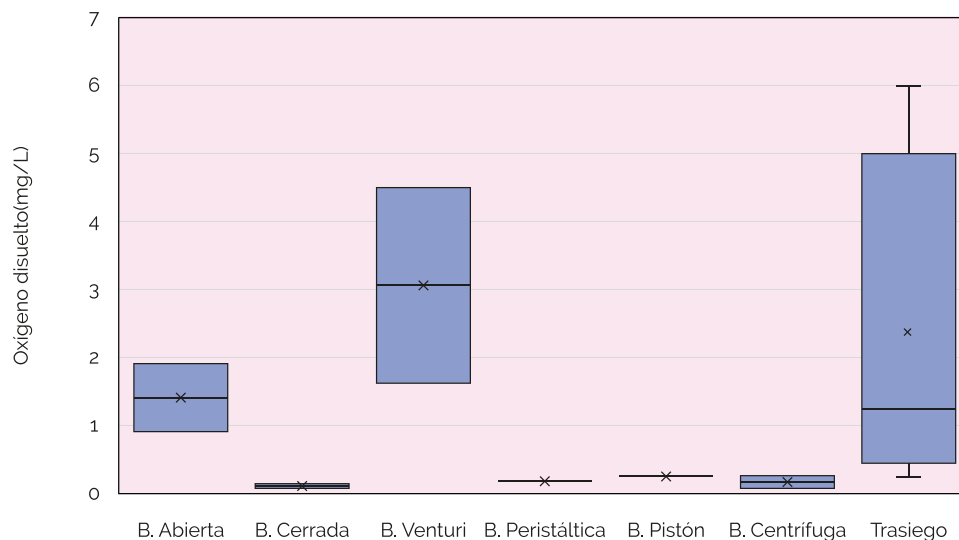


Fig. 4.1. Contenido en OD (mg/L) en el vino tras diferentes operaciones de bombeo

4.2.3.- Filtración

Existen diferentes procedimientos para realizar una filtración, y pueden suponer incorporación de hasta 7 mg/L de oxígeno en el vino (Figura 4.2).

Durante el proceso de microfiltración tangencial se pueden incorporar entre 0,60 mg/L y 2,20 mg/L de oxígeno. En una filtración tangencial se han reportado valores de media de 0,21 mg/L, en el rango de 0,18 a 0,23 mg/L de OD², otros autores en torno a los $0,26 \pm 0,30$ mg/L⁸, mientras que durante la filtración con tierras diatomeas se pueden incorporar entre 0,10 mg/L y 1,70 mg/L de oxígeno¹ a una temperatura de 23°C. Globalmente algunos autores han informado valores de 0,3 mg/L de OD⁹, y otros investigadores describen valores entre 4 y 7 mg/L¹⁰.

El empleo de un filtro rotativo al vacío puede incorporar una media de 2,25 mg/L, con valores obtenidos entre 1,99 y 2,56 mg/L de OD². La filtración

con placas supone niveles de oxígeno disuelto entre 0,219 y 0,43 mg/L, con una media de 0,33 mg/L, datos similares a los reportados por Castellari et al.⁹ con 0,30 mg/L.

Durante una filtración con cartucho se pueden incorporar entre 0,13 y 0,17 mg/L de OD², otros investigadores han reportado valores de entre 0,32 y 0,68 mg/L de OD en un total de 29 situaciones analizadas⁸. Cuando se realiza una filtración con tierras diatomeas, se alcanzan valores medios de 0,16 mg/L (valores entre 0,14 y 0,18 mg/L de OD en el vino²), mientras que Aziz et al.⁷ reportó mayores valores, alcanzando los 1,80 mg/L, posiblemente debido al aire en conducciones, el cuerpo de la bomba, longitud y diámetro del tubo y también del flujo, si fue turbulento. El filtro de flujo puede llegar a incorporar 0,60 mg/L⁷, lo que, como se mencionó anteriormente, puede estar relacionado con los equipos utilizados.

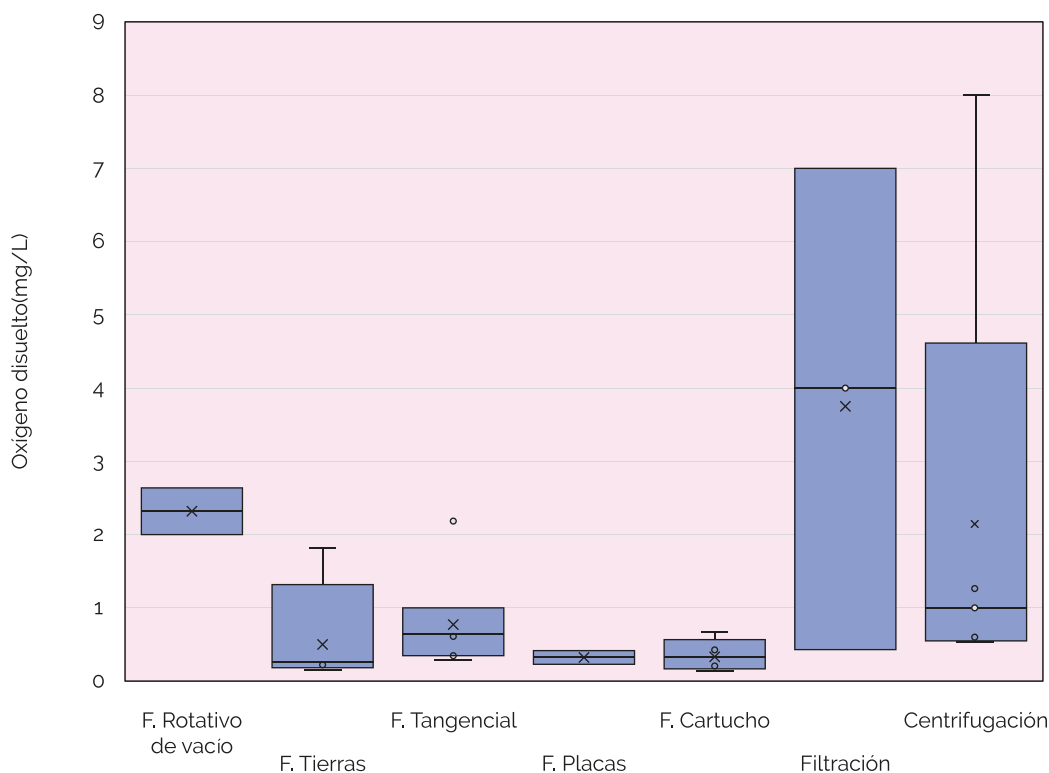


Fig. 4.2. Incorporación de OD en mg/L en las diferentes operaciones de filtración y centrifugación

4.2.4.- Centrifugación

El uso de centrifugas aumenta la exposición del vino al oxígeno provocando importantes reacciones de oxidación. Se han descrito valores medios de oxígeno de hasta 1,20 mg/L en vinos tintos (medidos a una temperatura de entre 15 y 20°C) ⁹.

Otros autores reportan valores de 0,95 mg/L cuando el vino se centrifuga en continuo, a una temperatura de 22°C ¹, otros trabajos describen niveles medios de 0,37 mg/L a una temperatura de entre 11,1 y 12,5°C ², e incluso un estudio ha informado de valores que casi alcanzan la saturación del vino con oxígeno, 8 mg/L ¹⁰ (Figura 4.2).

4.2.5.- Estabilización tartárica en continuo

Esta operación puede incorporar una media de 2,71 mg/L, con valores entre 2,67 y 2,76 mg/L ², resultados similares a los encontrados por Vidal et al. ³ con un promedio de 2,43 mg/L de oxígeno en vinos tintos, por Catarino et al. ⁹ entre 0,51 y 4,07 mg/L, y más de 4 mg/L, según los resultados publicados por Castellari et al. ⁹.

Tras la refrigeración del vino a -5°C para la estabilización tartárica, el nivel de oxígeno disuelto en el vino puede aumentar hasta 1,26 mg/L ⁹.

Operaciones como la estabilización proteica, pueden incorporar entre 0,08 y 0,18 mg/L de OD ⁸, mientras que una electrodiálisis puede incorporar alrededor de 0,29 mg/L de OD ⁹.

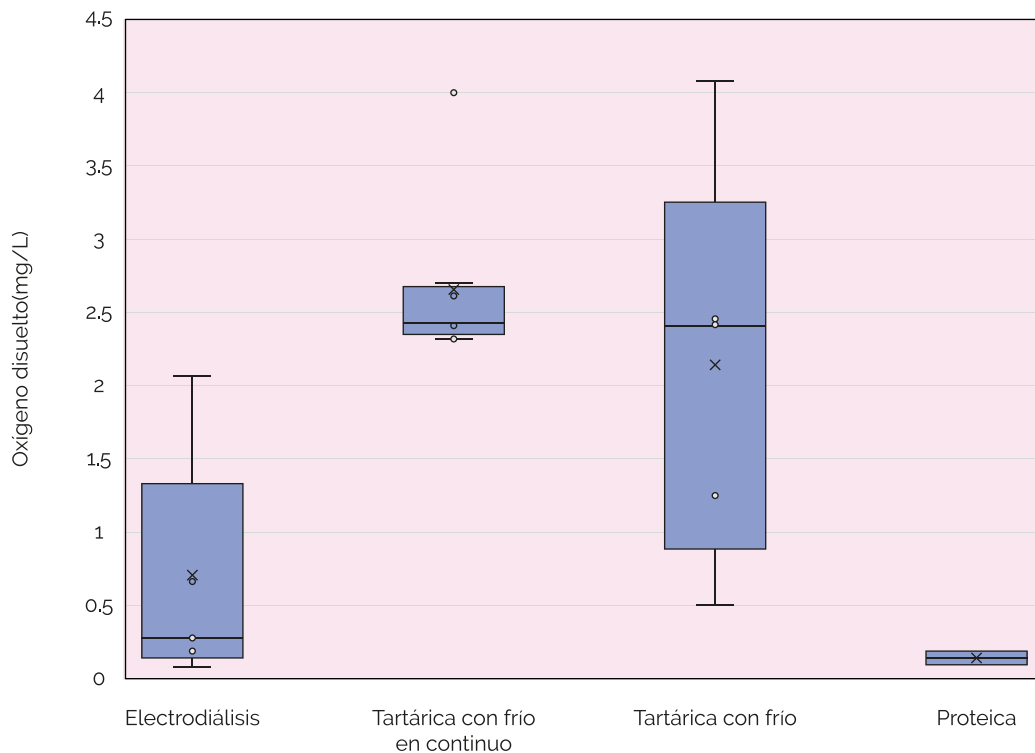


Fig. 4.3. Incorporación de OD en mg/L durante las operaciones de estabilización

4.2.6.- Conservación de vinos

Durante la maduración del vino en barricas se han reportado valores de ingreso de oxígeno desde el aire hacia el vino entre 20 y 45 mg O₂/L.año¹⁰, otros autores informan cantidades de 1,70 y 2,50 mL/L.mes^{11,12}. Otras medidas más recientes indican que la entrada del oxígeno del aire hacia el interior de las barricas varía de acuerdo con el tipo de roble con el que se fabrica la barrica, y entra tanto por las uniones entre duelas como por la propia madera. En el caso de las barricas de roble americano la entrada por las duelas varía de 14 a 18 mg/L.año y es prácticamente lo mismo que entra por las uniones entre duelas con valores de 16 ± 3,50 mg/L.año. Las barricas de roble francés permiten mayor entrada de oxígeno por las duelas, con valores de 21 ± 2,50 mg/L.año, cantidad significativamente superior al oxígeno que entra por las uniones entre duelas que es de 6 ± 2,20 mg/L.año.

Otros tipos de tanques, como lo son los de polietileno de alta densidad (HDPE), presentaron un OTR de 21,71 mg/L.año¹³. A la entrada de oxígeno producida en el proceso de guarda del vino en barrica, se añaden otras cantidades de oxígeno cuando se realiza la agitación periódica del vino ("batonnage") que dependen del proceso realizado, mientras que mezclar vinos de diferentes barricas supone un importante aumento de 1,75 mg/L^{9,14,15}.

4.2.7.- Transporte de vino en cisterna

En el transporte en cisterna se ha encontrado que el nivel de oxígeno disuelto del vino es menor cuanto más completa de vino vaya la cisterna. Así, en el caso de vinos tintos puede alcanzar valores de 3,30 mg/L cuando la cisterna lleva el 70 % de su capacidad con vinos tintos o 1,40 mg/L con el 80% para el transporte de vinos blancos. Cuando la cisterna está llena de vino tinto, se han medido niveles de oxígeno disuelto de 0,70 mg/L o 0,22 mg/L² y en vino blanco 0,40 mg/L de OD¹ o 0,13 mg/L de OD². Por lo tanto, de acuerdo con los datos encontrados, **el llenado completo de la cisterna (compartimentos) reduce significativamente la incorporación de oxígeno en el transporte de vino (Figura 4.4).**

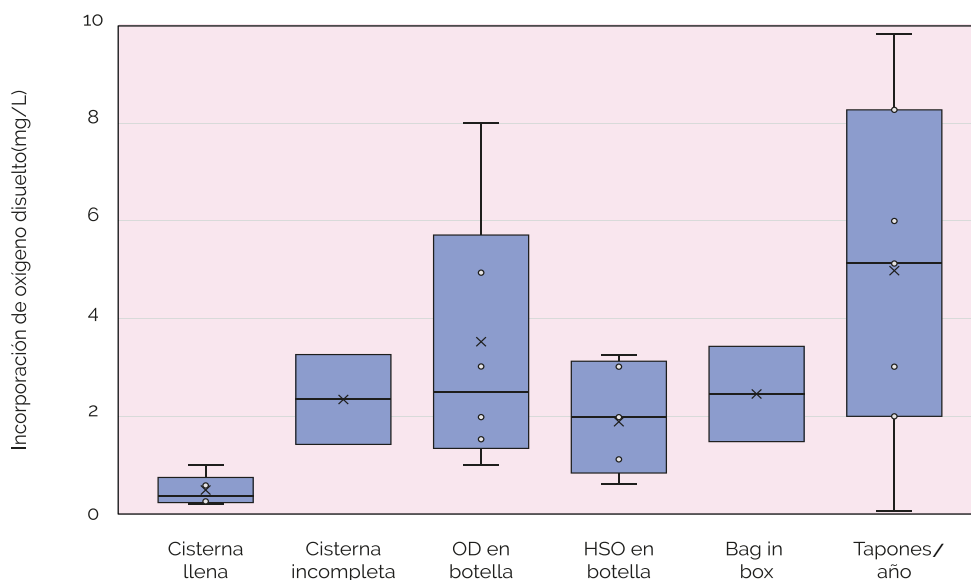


Fig. 4.4. Incorporación de OD en mg/L en el transporte de vinos en camiones cisterna

4.2.8.- Embotellado

Esta operación es un proceso crucial en la vida del vino, ya que supone la incorporación de oxígeno al vino que permanecerá en botella hasta llegar al consumidor. Durante ese periodo, con una duración variable según el tipo de elaboración, el vino adquirirá sus características finales con las que se presentará ante el consumidor. Los trabajos consultados, así como los datos presentados en el [Capítulo 11](#), muestran la gran variabilidad en la incorporación de oxígeno al vino recién embotellado. Así, Catarino et al.⁸ tras analizar un total de 147 muestras encontraron que en el vino embotellado se incorporaban 1,38 mg/L de OD, mientras que Castellari et al.⁹ describió valores de 0,83 mg/L de oxígeno y en los resultados descritos en el [Capítulo 11](#) se indican niveles desde 2 mg/L hasta 8 mg/L (OD en botella, *Figura 4.4*). Al oxígeno disuelto, que refleja el oxígeno que contiene el vino debido al movimiento desde el depósito origen hasta la embotelladora, se añade el oxígeno que se puede incorporar en el llenado y taponado de la botella, y que será el oxígeno contenido en el espacio de cabeza de la botella. Los resultados obtenidos muestran que en el embotellado de vinos blancos y vinos tintos se alcanzan valores desde 0,50 mg/L hasta 3,20 mg/L (*Figura 4.4*). Posteriormente el vino recibe oxígeno del aire por el tapón de la botella, y la cantidad de oxígeno depende del tipo de tapón. La cantidad de oxígeno que ingresa por el tapón no es sencilla de indicar, ya que en la mayoría de los casos la casa comercial no indica la dosis de oxígeno y en caso de existir no se indica cómo se ha obtenido dicha tasa, y se expresa de forma diferente de una casa comercial a otra lo que no permite comparar entre distintos tapones.

Smith et al.¹² indican que el corcho natural dosifica entre 0,01 y 5 mg/L/año, frente a los 5,90 y 8,30 mg/L descritos por Lisjak¹⁶ y Silva et al.¹⁷. El uso de tapones sintéticos permite la entrada de 9,80 mg/L, mientras que los tapones de aglomerado valores menores a 3 mg/L^{16,17}.

En el envasado de vinos en sistemas diferentes a la botella de vidrio, como durante el embalaje en Bag-in-box, se llega a incorporar más oxígeno, alcanzando los $2,47 \pm 0,93$ mg/L de OD, datos obtenidos de un total de 26 muestras analizadas⁸.

4.3.- Conclusiones

Las diferentes operaciones llevadas a cabo en una bodega incorporan al vino diferentes cantidades de oxígeno. Se debe tener en consideración que las medidas realizadas en los diferentes trabajos han sido realizadas con diferentes equipos de medida, lo cual puede influir sobre el resultado indicado, además de las condiciones de presión y temperatura.

Reducir la concentración de oxígeno disuelto que se dosifica al vino en las diferentes operaciones en bodega siempre ha sido y será un desafío para los enólogos.

Pocos estudios se han realizado con respecto a la cantidad de oxígeno que se puede incorporar con las diferentes operaciones y el uso de distintos equipos durante todo el proceso de vinificación, por lo que los datos descritos en este manual son de gran interés para la mejora de la gestión del oxígeno en bodega.

Un aspecto del que apenas existe información, es la incorporación de oxígeno por contacto con el aire durante el llenado y vaciado de depósitos, en los que es frecuente que se produzcan remolinos, cavitaciones de las bombas y salpicaduras. Como se aprecia en la *Figura 4.1*, **el trasiego de vinos puede suponer una de las mayores incorporaciones ocultas de oxígeno si no se adoptan medidas de inertizado específicas**. La cuantificación de la incorporación de oxígeno durante estas operaciones se ha desarrollado en los siguientes capítulos de este manual.

4.4.- Referencias

1. Vidal, J.C.; Dufourcq, T.; Boulet, J.C.; Moutounet, M. Les apports d'oxygène au cours des traitements des vins. Bilan des observations sur site. 1ère partie. Rev. Française Oenol. 2001, 190, 24–31.
2. Calderón, J. F.; del Alamo-Sanza, M.; Nevares, I.; Laurie, V. F. The Influence of Selected Winemaking Equipment and Operations on the Concentration of Dissolved Oxygen in Wines. Cienc. Investig. Agrar. 2014, 41 (2), 27–28. <https://doi.org/10.4067/s0718-16202014000200014>.
3. Vidal, J. C.; Boulet, J. C.; Moutounet, M. Les apports d'oxygène au cours des traitements des vins. Bilan des observations sur site. 2ème partie. Revue Française d'oenologie, 2003, 201, 32-34,36-38.
4. Day, M.P.; Aagaard, O.; Waters, E.J. Dissolved oxygen measurements during processing in the winery. Blair, R.J., Lee, T.H. and Pretorius, I.S., eds. Proceedings of the 14th Australian wine industry technical conference: 3–8 July 2010; Adelaide, SA, Australia (The Australian Wine Industry Technical Conference: Urrbrae, SA, Australia) pp. 379–380.
5. Day, M. P.; Schmidt, S. A.; Smith, P. A.; Wilkes, E. N. Use and Impact of Oxygen during Winemaking: Use and Impact of Oxygen during Winemaking. Aust. J. Grape Wine Res. 2015, 21, 693–704. <https://doi.org/10.1111/ajgw.12199>.
6. Moenne, M. I.; Saa, P.; Laurie, V. F.; Pérez-Correa, J. R.; Agosin, E. Oxygen Incorporation and Dissolution during Industrial-Scale Red Wine Fermentations. Food Bioproc. Tech. 2014, 7 (9), 2627–2636. <https://doi.org/10.1007/s11947-014-1257-2>.



7. Aziz, M. Ben; M'Barek, H. N.; Douieb, H.; Hajjaj, H. Influence of Enological Treatments on Dissolved Oxygen Content of Moroccan Red Wine. *International Journal of Advanced Research*, 2016 4(3), 156–160.
8. Catarino, A.; Alves, S.; Mira, H. Influence of Technological Operations in the Dissolved Oxygen Content of Wines. *J. Chem. Chem. Eng.* 2014, 8 (4). <https://doi.org/10.17265/1934-7375/2014.04.010>.
9. Castellari, M.; Simonato B.; Torielli G.B.; Spinelli P.; Ferrarini R. Effects of different enological treatments on dissolved oxygen in wines. *Italian Journal of Food Science*, 2004, 16:387-396.
10. Du Toit W. J.; Marais J.; Pretorius I. S.; Du Toit M. "Oxygen in must and wine: a review," *South African Journal of Enology & Viticulture*, 2006, vol. 27, no. 1, pp. 76–94.
11. Cano-López, M.; Pardo-Mínguez, F.; Schmauch, G.; Saucier, C.; Teissedre, P.-L.; López-Roca, J. M.; Gómez-Plaza, E. Effect of Micro-Oxygenation on Color and Anthocyanin-Related Compounds of Wines with Different Phenolic Contents. *J. Agric. Food Chem.* 2008, 56 (14), 5932–5941. <https://doi.org/10.1021/jf8006147>.
12. Smith, P. A.; McRae, J. M.; Bindon, K. A. Impact of Winemaking Practices on the Concentration and Composition of Tannins in Red Wine: Impact of Winemaking Practices on Tannins. *Aust. J. Grape Wine Res.* 2015, 21, 601–614. <https://doi.org/10.1111/ajgw.12188>.
13. Del Alamo-Sanza, M.; Nevares, I. Recent Advances in the Evaluation of the Oxygen Transfer Rate in Oak Barrels. *J. Agric. Food Chem.* 2014, 62 (35), 8892–8899. <https://doi.org/10.1021/jf502333d>.
14. Nevares Domínguez, I.; del Alamo-Sanza, M. Oxygène et barriques: Actualisation des connaissances Quantité et voies de pénétration de l'oxygène dans la barrique. *Rev. des oenologues des Tech. Vitivinic. oenologiques* 2014, 41 (153), 41–44.
15. Prat-García, S.; Nevares, I.; Martínez-Martínez, V.; del Alamo-Sanza, M. Customized Oxygenation Barrels as a New Strategy for Controlled Wine Aging. *Food Res. Int.* 2020, 131 (May), 108982. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.108982>
16. K. Lisjak, *The Role of Oxygen in New Vinification Technologies of White and Red Wines*, University of Ljubljana, 2007.
17. Silva, M. A.; Julien, M.; Jourdes, M.; Teissedre, P.-L. Impact of Closures on Wine Post-Bottling Development: A Review. *Eur. Food Res. Technol.* 2011, 233 (6), 905–914. <https://doi.org/10.1007/s00217-011-1603-9>.



Capítulo 5

Importancia de los materiales en la oxigenación durante el movimiento de vino en bodega

María del Álamo Sanza e Ignacio Nevares Domínguez
Grupo UVaMOX- Universidad de Valladolid

Este capítulo está basado en el trabajo de Nevares, I.; Fernández-Díaz, A.; del Álamo-Sanza, M. Characterization and Control of Hidden Micro-Oxygenation in the Winery: Wine Racking. *Foods* 2021, 10 (2), 386.

5. 1. Introducción

5. 2. Materiales Y Métodos

5.2.1 Materiales

Vino Modelo

Mangueras

Conexiones

Juntas

Gases inertes

5.2.2 Protocolos de medición

Medida del oxígeno disuelto

Medida de la permeabilidad al oxígeno de mangueras y conectores

Inertizado de mangueras con gases de inertizado.

5.3. Resultados

5.3.1 Efecto de las conexiones en la incorporación de oxígeno al vino

5.3.2 Efecto del tipo de manguera

5.3.3 Inertización de mangueras

5.4. Conclusiones

5.5. Referencias

El trasiego de vino es una operación habitual en la mayoría de las bodegas del mundo y la incorporación de oxígeno depende principalmente de los equipos y materiales utilizados. El conocimiento de estos aportes es importante para controlar el proceso de elaboración. Este capítulo presenta los datos del aporte de oxígeno debido al **uso de mangueras de diferentes materiales**: caucho butilo (IIR), caucho nitrilo butadieno (NBR), caucho etileno propileno dieno monómero (EPDM), polietileno de ultra alto peso molecular (UHMW) y caucho natural (NR), en las dimensiones DN32, DN50 y DN80, **con conectores** DIN 11851 y Tri-CLAMP y **con juntas de distintos materiales**: NBR, EPDM, fluorocarbono (FKM/FPM),

caucho de silicona (Q/VMQ), politetra- fluoroetileno (PTFE). También se presenta el uso de diferentes gases de inertizado (N_2 , CO_2 , Ar, $N_2:CO_2$ y $Ar:CO_2$) para la **inertización de mangueras**, así como su impacto económico.

Los menores aportes de oxígeno se consiguen empleando mangueras IIR con los conectores Tri-CLAMP y las juntas FKM. Para la inertización el CO_2 es el gas de inertizado más económico si el tipo de vino lo permite, siendo el N_2 el más recomendado, en cualquier caso. Cuando se utilizaron conjuntamente todas estas recomendaciones se redujo drásticamente la incorporación de oxígeno durante el trasiego de depósito a depósito.

5.1.- Introducción

El proceso de elaboración incluye distintas etapas en las que se puede producir la incorporación de oxígeno en el vino, ya sea por los tratamientos realizados o por el uso de distinto equipamiento¹⁻⁴ como se ha visto en el **Capítulo 4**. La incorporación incontrolada de oxígeno disuelto durante el trasiego del vino es una de las aportaciones más destacables y varía entre 0,37 y 1,81 mg/L^{3,5} dependiendo de muchos factores. La velocidad del vino es uno de ellos, a altas velocidades se pueden aportar hasta 3 mg/L de oxígeno disuelto⁶. La bomba utilizada es otro factor importante, con bomba peristáltica se han reportado aportes de 0,12 mg/L, con bomba de pistón 0,2 mg/L y con bomba centrífuga se han medido aportes de hasta 0,7 mg/L de oxígeno disuelto⁶. Sin embargo, no existen estudios sobre el aporte debido a los diferentes materiales de las mangueras y tipos de conectores, requiriendo todos ellos el uso de juntas de diferentes elastómeros que garanticen un correcto cierre hidráulico sin prestar suficiente atención a su estanqueidad al oxígeno. Estas juntas

de diferentes materiales se pueden encontrar en el mercado, pero no existen recomendaciones claras de los fabricantes sobre qué materiales son los más adecuados para evitar la incorporación del oxígeno atmosférico al vino.

Este capítulo presenta los datos del aporte de oxígeno al vino debido al uso de mangueras de diferentes materiales: Caucho Butilo (IIR), Caucho Nitrilo Butadieno (NBR), Caucho Etileno Propileno Dieno Monómero (EPDM), Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular (UHMW) y Caucho Natural (NR), conectores (DIN 11851 y Tri-CLAMP) de las dimensiones más habituales (DN32, DN50 y DN80), con juntas de distintos materiales: NBR, EPDM, fluorocarbono (FKM/FPM), caucho de silicona (Q/VMQ), politetra-fluoroetileno (PTFE). También se presenta el uso de diferentes gases de inertizado (N_2 , CO_2 , Ar, $N_2 \cdot CO_2$ y $Ar \cdot CO_2$) para la purga del aire de las mangueras y su impacto económico. Por último, se han establecido recomendaciones para garantizar que la incorporación de oxígeno sea mínima.

5.2.- Desarrollo de los experimentos

Se empleó un vino modelo (solución hidroalcohólica 12,5% V/V y pH 3,5) para garantizar la ausencia de compuestos consumidores de oxígeno. El vino modelo se desgasificó a niveles bajos de oxígeno empleando dos contactores de membrana, módulos Liqui-Cel® 4 x 13 Extraflow (3M, Maplewood, Minnesota, Estados Unidos) en serie trabajando con vacío y nitrógeno.

Los **conectores** rápidos más utilizados en enología en España son los roscados, que constan de un macho roscado y una hembra con una tuerca roscada en su interior que para garantizar la estanqueidad lleva una junta (DIN 11851, SMS, juntas tipo macho, etc.). También se emplean los conectores rápidos por presión sin rosca que además incorporan una junta para garantizar la

estanqueidad a los líquidos (CLAMP, Juntas tipo esférica, etc.). Se presentan los resultados del empleo de la conexión DIN 11851 con rosca y las conexiones de presión tipo CLAMP (ISO 2852, DIN 32.676 y BS 4825-3) con acoplamiento rápido, también conocidas como Tri-CLAMP o Tri-clover.

Las **juntas** de ambos tipos de racores más comúnmente suministradas con los racores son de NBR, caucho de nitrilo (copolímero de acrilonitrilo butadieno), aunque existen juntas de EPDM, Fluorocarbono (FKM/FPM) también conocido como Viton®, caucho de silicona (Q/VMQ) y Politetrafluoroetileno conocido como Teflón (PTFE) (*Figura 5.1* y *Tabla 5.1*). Los diámetros estudiados de conectores y juntas fueron DN32 (32 mm), DN50 (50 mm) y DN80 (80 mm).



a)



b)

Fig. 5.1 (a) Detalle de la conexión CLAMP (Tri-clover-Tri- CLAMP) a la izquierda frente a DIN 11851 a la derecha; (b) Juntas para conexión DIN 11851 DN50 de diferentes materiales: Q/VMQ, NBR, PTFE, FKM/FPM y EPDM (de izquierda a derecha)

Tabla 5.1 Compatibilidad de los materiales utilizados en la fabricación de mangueras y juntas frente a distintos fluidos

Fluido	EPDM	NBR	Q/VMQ	FKM/ FPM	PTFE	NR	UHMW	IIR
Vinos y levaduras	4	3	4	2-3	3-4	4	4	4
Zumos de fruta concentrados	1	1	1	3	3-4	4	4	4
Cervecería	3-4	3	1-2	2-3	3-4	4	4	4
Alcoholes	2-3	1-3	3-4	3-4	3-4	4	4	4
Ozono y condiciones atmosféricas	4	1-2	4	3-4	3-4	4	3	4

1 - No apto, 2 - Nivel de aptitud limitado, 3 - Nivel de aptitud normal, 4 - Nivel de aptitud alto. (Fuente: Alfa Laval). EPDM: Caucho de etileno propileno dieno monómero; NBR: Caucho de nitrilo butadieno; Q/VMQ: Caucho de sílicona; FKM/FPM: Fluorocarbono; PTFE: Politetrafluoroetileno; NR: Caucho natural; UHMW: Polietileno de ultra alto peso molecular e IIR: Caucho butílico.

Las **mangueras** fabricadas con Caucho Butilo (IIR) son las más ampliamente recomendadas para el movimiento del vino en las bodegas, por lo que se emplearon como referencia. En colaboración con IVG colbachini spa se estudiaron los diámetros DN32 y DN50 (los más comunes en bodegas pequeñas y medianas respectivamente para el trasiego de vino), y el efecto de la longitud de la manguera fabricada con este material. También se analizaron mangueras fabricadas con otros materiales, como caucho nitrilo butadieno (NBR), caucho etileno propileno dieno monómero (EPDM), polietileno de ultra alto peso molecular (UHMW) y caucho natural (NR) (Tabla 5.1).

- **Caucho butílico - IIR** - Es un copolímero elastomérico de isobutileno con pequeñas cantidades de isopreno (1-2,5% en moles). Su propiedad

más importante es su muy baja permeabilidad a gases y líquidos. Se estudió el **Vinoflex easy** (IVG Colbachini, Padua, Italia), adecuado para alimentos líquidos no grasos en diámetros DN32 y DN50.

- **Caucho nitrilo butadieno -NBR** - La manguera DN32 utilizada en el estudio fue Igiemoil-HF 10 S7B (Tubi Thor, Lesmo, Italia). Se utiliza con leche, yogur, productos lácteos, alimentos grasos de origen vegetal, zumos de frutas y bebidas con bajo contenido de alcohol. El interior de la manguera es un tubo de caucho NBR de calidad alimentaria de color blanco totalmente desprovisto de olor y sabor y de aspecto especular. La manguera DN50 probada fue la **Millenium easy** (IVG Colbachini, Padua, Italia): se trata de una man-



a)

Fig. 5.2. (a) Detalle de las mangueras con el conector DIN 11851; (b) Vista del anillo de caracterización de las mangueras de diferentes materiales

guera corrugada de pared dura para productos alimentarios como aceite de oliva, vino, cerveza, zumo de frutas, alimentos grasos, leche y alcohol hasta 96°. Es un tubo de caucho sintético blanco, liso, apto para uso alimentario, insípido e inodoro.

- *Caucho de monómero de etileno propileno dieno - EPDM* - es un elastómero termoestable vulcanizable con azufre producido a partir de etileno, propileno y una pequeña cantidad de dieno no conjugado, como el hexadieno. La manguera DN32 probada fue la Roiman AM410E, actualmente LM1S (Sem-perit, Wimpassing, Austria). Se trata de una manguera flexible de aspiración y descarga para uso en cervecerías e industrias alimentarias y de bebidas, adecuada para alcohol (máx. 40%), refrescos, alimentos grasos (máx. 36%) y alimentos no grasos. La manguera DN50 estudiada fue la **Milk Service** (IVG Colbachini, Padua, Italia).
- *Polietileno de ultra alto peso molecular - UHMW* - es un polímero termoplástico lineal de etileno con un



b)



Fig. 5.3. Detalle de los tres tamaños de conectores CLAMP ensayados (DN32, DN50 y DN80) con ambas tapas ciegas y en los que se ensayó la OTR para dos juntas

peso molecular de millones. Tiene buena resistencia al desgaste y a los productos químicos, dureza y propiedades antifricción, pero escasa procesabilidad. Fabricada mediante moldeo por compresión y extrusión a golpe de ariete, la manguera de 32 mm probada fue la Superior-HF SBB Blue (Tubi Thor, Lesmo, Italia). La manguera DN50 probada fue la **Shetland** (IVG Colbachini, Padua, Italia): una manguera de pared dura para la aspiración y el suministro de alcoholes de hasta 96° sin alterar su olor ni sabor.

- **Caucho natural -NR-** es poliisopreno. Tanto la resistencia química y medioambiental como las propiedades mecánicas se mejoran mediante la reticulación (vulcanización), generalmente por tratamiento con azufre. La permeabilidad al aire varía de $11,8 \times 10^{-8}$ a 40 °C hasta $43,9 \times 10^{-8}$ a 80 °C, expresada en $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}/\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{atm}$; en estudios con nitrógeno, la permeabilidad a 21,1 °C es de $6,12 \times 10^{-8} \text{ cm}^2 / \text{s} \cdot \text{atm}$. La manguera DN50 probada fue la **Vinoflex NR** (IVG Colbachini, Padua, Italia) de caucho natural, sólo disponible en un diámetro de 50 mm. Es igual que la manguera de butilo, pero el material es NR, caucho natural.

Gases de inertizado

Se emplearon gases de inertizado suministrados por **Carburos Metálicos (Grupo Air Products)**, cuyas principales características se detallan en el **Capítulo 3**. Se trabajó con nitrógeno (N_2), dióxido de carbono (CO_2), argón (Ar), y mezclas 80/20 de nitrógeno y dióxido de carbono ($\text{N}_2:\text{CO}_2$) y argón y dióxido de carbono (Ar: CO_2)

Protocolos de medición

Medida del oxígeno disuelto Se utilizaron sondas TROXROB10 (Pyro-Science GmbH, Alemania) Trace Range Robust Oxygen (rango de medida: 0-10% O_2 ; límite de detección: 0,004% O_2) en un dispositivo óptico de medida de oxígeno FireSting O_2 (Pyro-Science GmbH, Alemania). También se emplearon sondas de inmersión en oxígeno DP-PSt6 de 10 m de longitud, con una precisión de ± 1 ppb, conectadas a equipos de medición de trazas OXY-4 (PreSens GmbH, Alemania). Todos los equipos se calibraron periódicamente en dos puntos siguiendo las instrucciones del fabricante utilizando un mezclador de gas GM-3 (Sensor Sense, Nijmegen, Países Bajos).

Medida de la permeabilidad al oxígeno de mangueras y conectores. Para medir la permeabilidad al oxígeno de las mangueras, se utilizaron en todos los casos racores DIN 11851 con juntas de NBR. Con este tipo de conector se fabricó un colector con una válvula para evacuar el oxígeno mediante ciclos de CO_2 y N_2 y también controlar la presión y la temperatura. Para garantizar la ausencia de oxígeno se inyectó el CO_2 por un tubo en el centro de la manguera y a continuación se inyectó N_2 con el racor hacia abajo para eliminar el CO_2 .

Las mangueras se probaron en una sección de tres metros que equivale a un volumen de fluido de 2,41 L en DN32 y 5,89 L en DN50 (Figura 5.2). Se estudiaron IIR, EPDM, UHMW y NBR de distintos productores para

DN32, y para DN50 se estudiaron mangueras de IIR, EPDM, NR y NBR, de un mismo productor (IGV Golbanchini Spa, Padua, Italia). Los resultados de la tasa de entrada de oxígeno (Oxygen Transmission Rate; OTR) de las mangueras fabricadas con diferentes materiales tuvieron en cuenta la tasa debida al racor doble.

Se utilizó el mismo procedimiento para medir las juntas de diferentes materiales, pero sustituyendo la sección de la manguera por dos tapones ciegos (Figura 5.3) que permitieron medir la infiltración del oxígeno atmosférico en los dos tipos de conexiones CLAMP y DIN, en tres tamaños (DN32, DN50 y DN80) y con juntas de diferentes materiales (Q/VMQ, NBR, PTFE, FKM/FPM y EPDM).

Inertizado de mangueras con gases de inertizado. Se utilizó un caudalímetro de área variable calibrado para aire con un rango entre 2 y 25 L/min, modelo Rate-MasterR serie RM-22 (Dwyer Instruments, Inc. Michigan, IN, Estados Unidos). Para comparar el caudal volumétrico real de cada gas en relación con el caudal de aire medido, se utilizó la constante específica de cada gas según (1): Siendo los valores q_{air} (L/min) y R_{gas} (J/kg·K): aire = 287,042; N₂ = 296,786; CO₂ = 188,920; Ar = 208,130; N₂:CO₂ = 275,213 y Ar:CO₂ = 204,288. Con estas correcciones, el factor de conversión de flujo para cada gas fue: N₂ = 1,01683; CO₂ = 0,81127; Ar = 0,85152; N₂:CO₂ = 0,97918 y Ar:CO₂ = 0,84362.

5.3.- Resultados

5.3.1.- Efecto del tipo y junta de conexión en la incorporación de oxígeno al vino

Se estudió la entrada de oxígeno con los diferentes conectores y sus respectivas juntas, expresándose el OTR como la variación de la presión parcial del O₂ con el tiempo (hPa/h). Es importante señalar que cada marca comercial emplea colores diferentes para las juntas de cada material, por lo que el color no debe tomarse como indicativo del material de la junta. La Tabla 5.2 muestra los resultados para los dos tipos de conectores, en los tres diámetros más comunes en las bodegas y con las juntas de los cinco materiales habitualmente disponibles. La última columna de la tabla indica que **en todos los casos hay diferencias estadísticamente significativas entre usar un tipo de junta u otro cuando se emplean mangueras de un diámetro y conexión concretos.**

Tabla 5.2. Permeabilidad al oxígeno ($\times 10^{-3}$ hPa/h) de juntas fabricadas con distintos elastómeros en diferentes conectores y diámetros (n = 3)

Conexión	Diámetro (mm)	Materiales de las juntas					p nivel
		NBR	FKM/FPM	Q/VMQ	EPDM	PTFE	
DIN 11851	DN32	3,50 ± 0,57 c	0,93 ± 0,39 a	179,08 ± 4,13 b	4,94 ± 0,83 a	3046,83 ± 893,96 b	0,0102 *
	DN50	1,50 ± 0,10 b	0,73 ± 0,06 a	1093,15 ± 21,02 c	3,40 ± 0,56 a	2366,80 ± 251,10 a	0,0001 ***
	DN80	0,82 ± 0,08 a	4,20 ± 0,66 b	18,68 ± 0,48 a	2,90 ± 0,26 a	6194,63 ± 400,80 c	0,0000 ***
TRICLAMP	DN32	1,28 ± 0,56 a	0,70 ± 0,08 a	76,70 ± 1,64 c	3,06 ± 0,68 a	105,25 ± 28,26 a	0,005 **
	DN50	0,92 ± 0,18 b	0,68 ± 0,16 b	57,40 ± 1,02 b	2,10 ± 0,10 a	487,97 ± 67,26 b	0,0003 ***
	DN80	2,08 ± 0,55 c	1,72 ± 0,24 c	8,53 ± 0,14 a	1,88 ± 0,33 a	3459 ± 41,21 c	0,0000 ***

< 0,05 o ** p < 0,01 o *** p < 0,001 en las filas indica diferencias entre los distintos materiales para cada conexión y diámetro. En las columnas, diferentes letras indican diferencias significativas entre diámetros para la misma conexión y material. NBR: Caucho nitrilo butadieno; FKM/FPM: Fluorocarbono; Q/VMQ: caucho de silicona; EPDM: caucho de etileno propileno dieno monómero y PTFE: politetrafluoroetileno.

El Viton (FKM/FPM) fue el material que permitió una conexión más estanca al oxígeno, independientemente del diámetro de la manguera y para ambos tipos de conectores, estos resultados confirmaron lo descrito en la bibliografía^{4,7-12}.

A continuación, se situaron las juntas de NBR, EPDM y Q/VMQ, obteniéndose las mayores entradas de oxígeno con las juntas de PTFE. La *Tabla 5.3* presenta la comparación de la incorporación de oxígeno (OTR) con el uso de los distintos materiales, para cada diámetro y para cada tipo de conector, respecto al uso de Viton (FKM/FPM) obteniéndose un **índice relativo** para cada caso.

Las juntas de Viton (FKM/FPM) permitieron una conexión más estanca al oxígeno, independientemente del diámetro de la manguera y para ambos tipos de conectores (DIN 11851, Tri-CLAMP).

Tabla 5.3. Índice relativo de comparación de los niveles de OTR de los diferentes materiales de las juntas en relación con el vitón (FKM/FPM), para los dos tipos de conectores y para cada uno de los diámetros estudiados

	DIN 11851			Tri-CLAMP		
	DN32	DN50	DN80	DN32	DN50	DN80
PTFE	3294	3227	1475	150	718	2011
NBR	4	2	0.2	2	1	1
FKM/FPM	1	1	1	1	1	1
Q/VMQ	194	1491	4	110	84	5
EPDM	5	5	1	4	3	1

Los resultados indicaron que con DN80 el uso de juntas de FKM/FPM y de EPDM es semejante, siendo incluso mejor NBR. Sin embargo, con DN32 o DN50 las juntas NBR y EPDM permearon entre 3 y 5 veces más oxígeno que el FKM/FPM y las de silicona Q/VMQ entre 80 y 1500.

Por último, destacaron las altas incorporaciones de oxígeno con el empleo de juntas de teflón (PTFE), probablemente debido a que su mayor dureza hace más difícil conseguir uniones estancas metal-polímero-metal, lo que resulta ser un inconveniente.

La *Figura 5.4a* muestra la tasa de infiltración de oxígeno teniendo en cuenta el efecto de todos los factores estudiados (material de la junta, diámetro y tipo de conector), los resultados se expresaron en mg/L.h para así comparar el comportamiento global del material.

Como se ha indicado anteriormente, para la mayoría de los diámetros, el uso de FKM/FPM permitió una unión más estanca, seguido de NBR y el EPDM. Aunque el PTFE es el material con menor permeabilidad al oxígeno^{13,14}, no es muy adecuado para este tipo de conectores con un continuo montaje y desmontaje en bodega, ya que su baja elasticidad impide un correcto funcionamiento continuado. Si se compara globalmente el comportamiento de ambos conectores, se observa que en general, **el conector Tri-CLAMP permite uniones más estancas que el conector DIN 11851, independientemente del diámetro o del material de la junta (Figura 5.4b).**

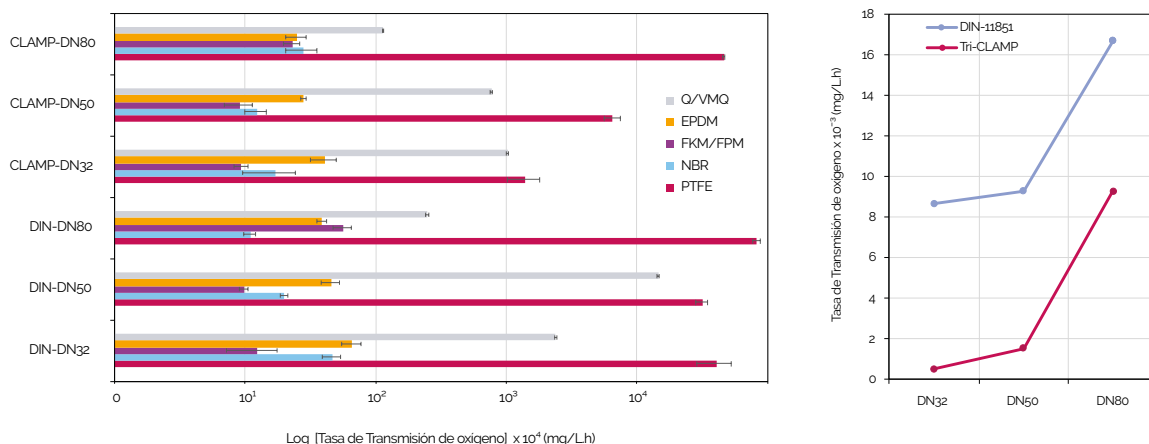


Fig. 5.4. (a) Tasa de Transmisión de Oxígeno (mg/L.h) en los diferentes conectores según el diámetro, así como el material de la junta referido al volumen del conector; (b) Comparación de la OTR media corregida con el volumen para ambos conectores según el diámetro

5.3.2.- Efecto del tipo de manguera

El análisis de la permeabilidad al oxígeno de las mangueras se realizó en mangueras de 3 m de longitud con conectores DIN 11851 fabricadas con 5 materiales diferentes: caucho butílico (IIR), caucho nitrilo butadieno (NBR), caucho de monómero de etileno propileno dieno (EPDM), polietileno de ultra alto peso molecular (UHMW) y caucho natural (NR). La *Tabla 5.4* muestra los resultados obtenidos expresados por metro de manguera, corrigiendo previamente el efecto de los conectores, y por litro para poder comparar los resultados independientemente del diámetro de la manguera. Los datos obtenidos con los diferentes materiales se convirtieron a mg/L.h considerando la presión del gas de medida y la temperatura del ensayo para cada metro de manguera (*Figura 5.5*). La comparación del uso de un diámetro de 32 mm o de 50 mm al utilizar una manguera de IIR, EPDM o NBR indicó que, en todos los casos se incorporaba significativamente más oxígeno (mg/L.h) con la manguera de 32 mm que con la de 50 mm.

Tabla 5.4. Tasa transmisión de oxígeno (hPa/h) alcanzado en mangueras de diferentes materiales en los dos diámetros ensayados (n = 3)

Diámetro (mm)	Material	OTR Medido (hPa/h)	Manguera OTR ^(1,2) (hPa/h)	Manguera OTR ^(1,2) (hPa/h-m)
DN32	IIR	0,0291 ± 0,0003 a	0,0268 ± 0,00001 a	0,0089 ± 0,00001 a
	EPDM	0,1125 ± 0,0098 b	0,1102 ± 0,0095 b	0,0367 ± 0,0095 a
	UHMW	0,0852 ± 0,0136 b	0,0829 ± 0,0133 b	0,0276 ± 0,0133 a
	NBR	0,0493 ± 0,0060 a	0,0470 ± 0,0057 a	0,0157 ± 0,0057 a
	p nivel	0,0093 **	0,0084 **	0,2508
DN50	IIR	0,0200 ± 0,0041 a	0,0107 ± 0,0015 a	0,0036 ± 0,0025 a
	EPDM	0,0958 ± 0,0090 b	0,0865 ± 0,0074 c	0,0288 ± 0,0074 c
	NR	0,0742 ± 0,0064 b	0,0650 ± 0,0048 b	0,0217 ± 0,0048 bc
	NBR	0,0230 ± 0,0018 a	0,0137 ± 0,0002 a	0,0046 ± 0,0002 ab
	p nivel	0,0019 **	0,0007 ***	0,0405 *

¹ se eliminó la infiltración por la conexión doble DN32;

² se eliminó la infiltración por la conexión doble DN50. * p < 0,05 o ** p < 0,01 o *** p < 0,001 en las filas indica diferencias entre los distintos materiales para cada diámetro, en las columnas diferentes letras indican diferencias significativas entre materiales para el mismo diámetro IIR: Caucho butílico; EPDM: Caucho de etileno propileno dieno monómero; UHMW: Polietileno de peso molecular ultra alto y NBR: Caucho de nitrilo butadieno.

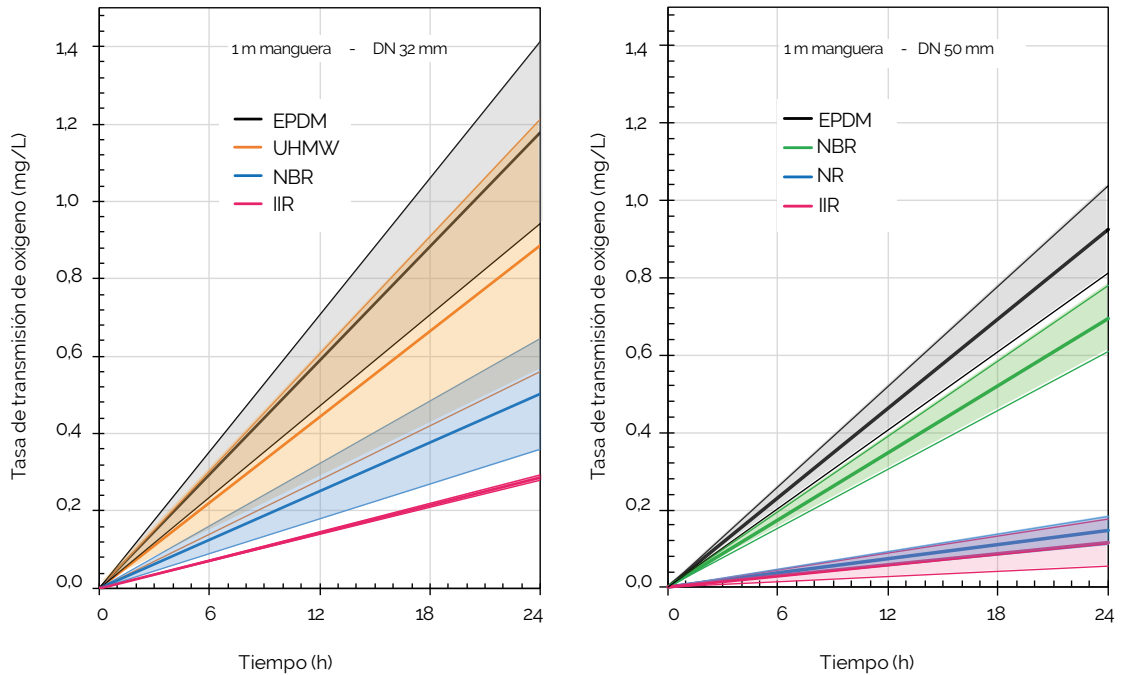


Fig. 5.5. Comparación de OTR (mg/L/h) corregido con la manguera de volumen para ambos diámetros, (a) DN 32 y (b) DN50; y para los diferentes materiales ensayados. El color de la línea sombreada representa la desviación estándar de la media de cada material

5.3.3.- Inertización de mangueras

Además de emplear la manguera fabricada con un material que evite la infiltración de oxígeno, también es importante garantizar la eliminación del aire que contiene justo antes de su utilización. Se estudiaron distintos gases de inertizado a distintos caudales para alcanzar un nivel de oxígeno muy bajo (menor del 0,5% O₂ o 5hPa o 2,5% Air sat.).

La *Tabla 5.5* muestra el tiempo necesario (minutos) para la inertización de 10m de manguera DN32 con un volumen interno de 8,04 L y para 30 m de manguera DN50 con un volumen interno de 58,90 L. Se puede consultar el tiempo necesario para inertizar cada una de las mangueras con cada uno de los gases y cuando se emplean distintos caudales, se puede observar que el tiempo necesario es distinto cuando se emplea un gas u otro, estando de media entre 1,5 y 6 minutos para todos los casos ensayados. Así, para inertizar 10m de manguera DN32 se necesitan de media 2 minutos si se emplean CO₂ o Ar:CO₂, algo menos con N₂:CO₂ y algo más si se emplea N₂ o Ar.

En el caso de 30m de manguera DN50 se necesitan casi 5 minutos con N₂ o N₂:CO₂ y algo más con el resto de los gases. Con el objetivo de comparar el gasto de cada gas necesario para inertizar las mangueras de diferentes materiales y diámetros, se corrigieron los resultados con los caudales volumétricos reales y con el coste de cada gas. En estos casos se suele utilizar el **índice de volumen de gas (I_{va/vg})**, que es la relación entre el volumen de aire purgado y el volumen de gas de inertizado utilizado para desplazar ese aire.

Cuando se realiza una inertización completa con gas de inertizado en la industria química, se recomienda un volumen mínimo igual a 1,5 veces el volumen de la tubería ¹⁵.

Este estudio se calculó este índice con los datos de más de 400 pruebas, lo que permitió comparar mangueras de diferentes diámetros y longitudes.

Tabla 5.5. Tiempo necesario (min) para inertizar las mangueras con los diferentes gases de inertizado y caudales (n=3)

Diametro	Material	Flujo	CO ₂	N ₂	Ar	Ar:CO ₂	N ₂ :CO ₂	plevel
DN32 10 m	IIR	10	1.433±0.076 a	1.000±0.050 a	1.050±0.000 a	1.200±0.000 a	0.950±0.000 a	0.0000***
		5	2.533±0.029 b	1.830±0.156 b	2.300±0.100 b	2.067±0.115 b	1.617±0.029 b	0.0000***
		2.5	3.233±0.076 c	3.450±0.132 c	3.333±0.058 c	3.000±0.150 c	2.150±0.050 c	0.0000***
	NBR	10	1.283±0.029 a	1.117±0.058 a	0.767±0.664 a	1.200±0.000 a	1.000±0.000 a	0.0000***
		5	2.083±0.029 b	1.810±0.053 b	2.517±0.029 b	2.217±0.076 b	1.700±0.000 b	0.0000***
		2.5	3.150±0.087 c	2.383±0.029 c	4.017±0.176 c	3.067±0.029 c	1.883±0.029 c	0.3146
	UHMW	10	1.317±0.029 a	1.067±0.029 a	1.250±0.000 a	1.050±0.000 a	0.950±0.000 a	0.0000***
		5	2.053±0.046 b	1.667±0.029 b	2.083±0.029 b	2.067±0.029 b	1.633±0.029 b	0.0000***
		2.5	3.300±0.050 c	2.467±0.029 c	3.100±0.087 c	2.983±0.029 c	2.200±0.000 c	0.0000***
	EPDM	10	1.417±0.029 a	1.133±0.029 a	1.167±0.029 a	1.150±0.000 a	1.050±0.000 a	0.0000***
		5	2.313±0.129 b	1.890±0.052 b	2.367±0.029 b	2.400±0.050 b	1.717±0.029 b	0.0000***
		2.5	3.317±0.076 c	3.167±0.275 c	3.167±0.029 c	3.183±0.076 c	2.217±0.029 c	0.0000***
DN50 30 m	IIR	20	3.633±0.029 a	3.150±0.087 a	3.950±0.050 a	3.800±0.132 a	3.117±0.076 a	0.5211
		10	4.917±4.258 b	6.483±0.176 b	7.067±0.416 b	7.450±0.300 b	5.700±0.050 b	0.0000***
	NBR	20	3.683±0.275 a	3.117±0.116 a	3.700±0.132 a	3.650±0.132 a	3.000±0.265 a	0.0535
		10	6.883±1.358 b	6.050±0.218 b	7.567±0.202 b	7.717±0.633 b	6.367±0.104 b	0.0023**
	UHMW	20	3.867±0.076 a	2.650±0.000 a	4.017±0.076 a	3.917±0.104 a	3.150±0.050 a	0.0000***
		10	8.217±0.189 b	6.083±0.058 b	7.867±0.058 b	8.033±0.176 b	6.783±0.104 b	0.0000***
	EPDM	20	3.450±0.132 a	2.917±0.116 a	3.550±0.050 a	3.767±0.144 a	3.267±0.362 a	0.0031**
		10	6.983±0.765 b	5.833±0.318 b	7.550±0.087 b	7.750±0.278 b	6.650±0.520 b	0.0032**
	NR	20	3.883±0.340 a	3.117±0.231 a	3.750±0.218 a	3.633±0.104 a	3.367±0.116 a	0.0001***
		10	8.300±0.755 b	5.783±0.116 b	7.600±0.328 b	7.283±0.202 b	6.650±0.132 b	0.0105**

p<0.01 o *p<0.001 en las filas indica las diferencias entre los distintos materiales para cada diámetro, en las columnas letras diferentes indican diferencias significativas entre el flujo para el mismo gas y material

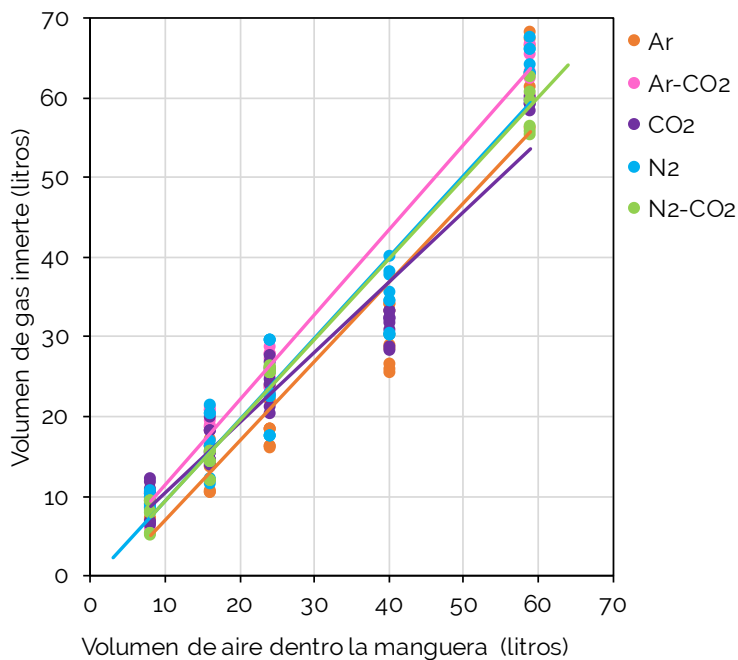


Fig. 5.6- Volumen de gas de inertizado necesario para inertizar completamente las mangueras de IIR con los distintos gases

La *Figura 5.6* muestra la relación entre el volumen de aire desplazado y el volumen de gas de inertizado necesario en el caso para inertizar las mangueras fabricadas con IIR de diferentes longitudes (10, 20, 30 y 50 m) y diámetros (DN32, DN50).

La *Tabla 5.6* muestra el índice $I_{va/vg}$ para cada uno de los gases de inertizado durante el inertizado de mangueras fabricadas con diferentes materiales.

Una inertización perfecta debe ser aquella en la que la sustitución del aire de la manguera por un gas de inertizado se realiza totalmente por desplazamiento y sólo se requiere un volumen de gas de inertizado. Diluir o mezclar el gas de inertizado con el aire de la manguera aumenta la cantidad de gas de inertizado necesaria¹⁶.

Se observa que los gases con mayor gravedad específica (CO_2 , Ar) ofrecen un menor $I_{va/vg}$, ya que son capaces de realizar una inertización por desplazamiento sin apenas mezclarse con el aire del interior de la manguera.

Sin embargo, cuando se emplearon gases con una gravedad específica más baja se requería un mayor volumen de gas de inertizado para barrer todo el aire del interior de la manguera. Además, la cantidad necesaria de cada uno de los gases dependió del material con el que estaba construida la capa interior de la manguera, destacando el N_2 como gas para inertizar mangueras de EPDM y UHMW con $I_{va/vg} \leq 1$. Obviamente, es importante el volumen de gas necesario, pero el valor económico del gas también importante.

La *Tabla 5.6* también incluye el precio (€/L) de los principales gases de inertizado para uso enológico en España (Carburos Metálicos, Air Products, Barcelona, España) y muestra que para inertizar todas las mangueras el gas más económico fue el CO_2 . Aunque debido a su alta solubilidad, no siempre es un gas recomendado para la cobertura del vino (blanketing) en el depósito, sin embargo, en el caso de su uso para inertizar mangueras su uso está justificado porque el volumen de vino en contacto con el gas será muy pequeño. El N_2 es el segundo gas de inertizado más barato para purgar el aire de las mangueras, aunque en la mayoría de los casos la inertización cuesta el doble que cuando se emplea CO_2 .

Tabla 5.6. Comparación del volumen de gas de inertizado para un índice de purga completo, así como el coste de los gases de inertizado probados en las diferentes mangueras estudiadas.

		Gas				
	Propiedades de los gases	CO ₂	Ar	N ₂ :CO ₂	N ₂	Ar:CO ₂
	Densidad (g/L)	1,84	1,669	1,3	1,169	1,41
	Gravedad específica*	1,502	1,362	1,061	0,955	1,151
	Coste del gas €/L	0,004	0,0116	0,0109	0,0065	0,013
Material	Datos de inertización	CO ₂	Ar	N ₂ :CO ₂	N ₂	Ar:CO ₂
IIR	$I_{va/vg}$	0,8857	1	1,0128	1,0225	1,0678
	Coste (10 ⁻³ €/L)	3,54	11,59	11	6,67	13,87
	R ²	0,9314	0,8984	0,9852	0,9275	0,9899
NBR	$I_{va/vg}$	0,8872	1,0501	1,0062	1,0534	1,1099
	Coste (10 ⁻³ €/L)	3,54	12,17	10,92	6,87	14,42
	R ²	0,9833	0,9967	0,9889	0,9957	0,993
EPDM	$I_{va/vg}$	0,9583	1,0496	1,1751	0,9433	1,0839
	Coste (10 ⁻³ €/L)	3,83	12,16	12,76	6,16	14,08
	R ²	0,9912	0,9949	0,9969	0,9976	0,9975
UHMW	$I_{va/vg}$	1,1035	1,1615	1,1107	0,9702	1,1594
	Coste (10 ⁻³ €/L)	4,41	13,46	12,06	6,33	15,06
	R ²	0,9952	0,9972	0,9947	0,9857	0,9978

* Basado en la densidad del aire = 1,225 g/L; $I_{va/vg}$ relación entre el volumen de aire purgado y el volumen de gas de inertizado utilizado para desplazar el aire; R²: coeficiente de determinación.

El resto de los gases cuestan entre tres y cuatro veces más que el CO₂ y sólo serían recomendables para operaciones especiales como por ejemplo para el blanketing de depósitos con vinos con dióxido de carbono disuelto. En este caso habría que determinar la mezcla gaseosa necesaria para no alterar su concentración en CO₂ empleando las curvas de Lonvaud-Funel sobre CO₂ disuelto frente a la concentración en el espacio de cabeza de CO₂¹⁷.

Cabe pensar que a mayor caudal de gas menor tiempo de inertización será necesario, y por tanto menor coste supondrá la inertización de la manguera, sin embargo, se debe tener en cuenta que la velocidad del gas que puede provocar turbulencias en una sección pequeña como en las mangueras. Los gases con CO₂ y por tanto con mayor peso específico, son los que permiten la inertización por desplazamiento a bajas velocidades de gas, mientras que el N₂ como inertiza por dilución del oxígeno del aire hasta su eliminación necesita más caudal para generar mayor turbulencia y compensar su bajo peso específico. Un caso aparte es el Ar, ya que se comporta de forma similar al N₂ a pesar de su gravedad específica.

La *Figura 5.7* muestra lo que cuesta inertizar una manguera de IIR DN32, con cada uno de los gases estudiados y con distintos caudales de 2,5, 5, 10 y 20 L/min. Se observa que a cualquier caudal lo más barato es inertizar con CO₂ y lo más caro con Ar:CO₂. Es interesante destacar que el menor coste con el uso de los gases CO₂, Ar:CO₂ o N₂:CO₂ se produjo con un caudal de 2,5 L/min debido a la baja turbulencia producida al inyectar el gas en la manguera, siendo diferente para cada gas en función de su densidad y capacidad de mezcla (inertización por dilución) o de desplazamiento del aire (inertización por desplazamiento). Al emplear caudales más altos se observó un aumento significativo del coste sin diferencias significativas entre utilizar 5, 10 o 20 L/min. La ventaja de utilizar caudales muy bajos es que se evitan las turbulencias que ponen de manifiesto la ventaja del CO₂ al desplazar el aire. Cuando la manguera se purgó con N₂ o Ar, el coste más bajo se obtuvo utilizando un caudal de 5 L/min, y no hubo diferencias significativas entre el coste asociado al uso de otros caudales.

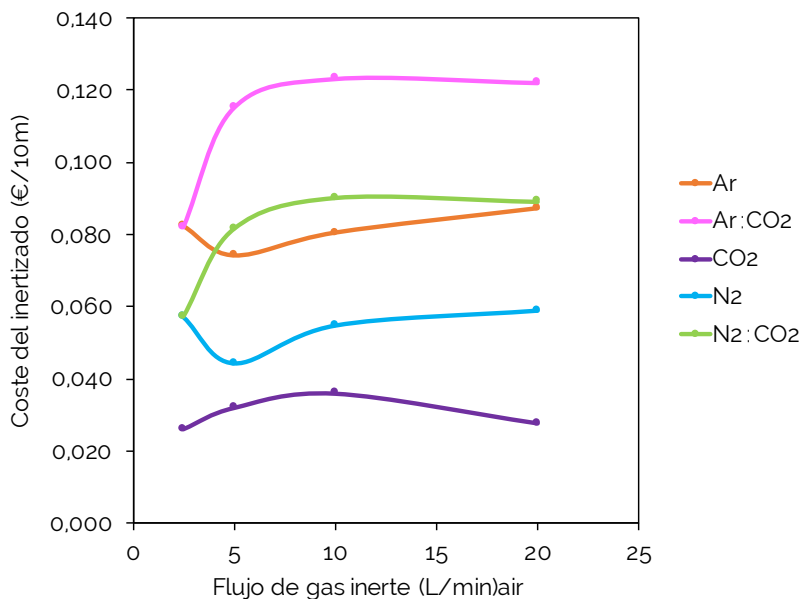


Fig. 5.7- Comparación del coste de inertización (€) para una manguera de 10 m de longitud de IIR con los gases de inertizado probados a diferentes caudales

5.4.- Conclusiones

- Entre los conectores estudiados se encontró que el sistema Tri-CLAMP funciona mejor que el sistema DIN 11851, independientemente del diámetro y el material de la junta.
- Las juntas de FKM/FPM son las que sellan mejor frente a la incorporación de oxígeno con ambos tipos de conectores. Las juntas de NBR, EPDM serían aceptables, mientras que no se recomienda el uso de juntas de Q/VMQ y PTFE.
- Las mangueras de IIR y NBR resultaron ser las más impermeables al O₂, el resto de los materiales no garantizan los bajos niveles de incorporación de O₂. Las mangueras DN50 incorporan una menor cantidad de oxígeno frente a las mangueras DN32.

- Inertización de mangueras:
 - » El CO₂ fue el gas más eficaz para la inertización de mangueras, ya que tiene el $l_{va/vg}$ más bajo, requiriéndose menor cantidad de gas, siendo más recomendable por económico si el proceso de vinificación lo permite.
 - » El siguiente gas recomendado es el N₂ aunque supone un coste del doble, el uso de Ar no es recomendable, ya que su coste económico es el doble que el del N₂ y cuatro veces más que el del CO₂.
 - » La inertización de mangueras más eficaz fue la realizada por desplazamiento, con pequeños caudales que garantizaran una baja turbulencia.

5.5.- Referencias

1. Calderón, J. F.; Alamo-Sanza, M. del; Nevares, I.; Laurie, F. The Influence of Selected Winemaking Equipment and Operations on the Concentration of Dissolved Oxygen in Wines. *Cienc. e Investig. Agrar.* 2014, 41 (2), 273–280. <https://doi.org/10.4067/rcia.v41i2.1340>.
2. Vidal, J. C.; Boulet, J. C.; Moutounet, M. Les Apports d'oxygène Au Cours Des Traitements Des Vins. Bilan Des Observations Sur Site. 2ème Partie. *Rev. française d'oenologie* 2003, No. 201, 32–34,36–38.
3. AZIZ, M. BEN; M'BAREK, H. N.; DOUIEB, H.; HAJJAJ, H. Influence of Enological Treatments on Dissolved Oxygen Content of Moroccan Red Wine. *Int. J. Adv. Res.* 2016, 4 (3), 156–160.
4. Catarino, A.; Alves, S.; Mira, H. Influence of Technological Operations in the Dissolved Oxygen Content of Wines. *J. Chem. Chem. Eng.* 2014, 8, 390–394. <https://doi.org/10.17265/1934-7375/2014.04.010>.
5. Castellari, M.; Simonato, B.; Torielli, G. B.; Spinelli, P.; Ferrarini, R. Effects of Different Enological Treatments on Dissolved Oxygen in Wines. *Ital. J. Food Sci.* 2004, 16 (3), 387–396.
6. Vidal, J. C.; Dufourcq, T.; Boulet, J. C.; Moutounet, M. Les Apports d'oxygène Au Cours Des Traitements Des Vins. Bilan Des Observations Sur Site. 1ère Partie. *Rev. française d'oenologie* 2001, No. 190, 24–31.
7. Ma, C.; Shero, E.; Verma, N.; Gilbert, S.; Shadman, F. Permeation of Moisture and Oxygen Through Polymeric O-Rings. *J. IEST* 1995, 38 (2), 43–46. <https://doi.org/10.17764/jiet.2.38.2.k6491358g0l83691>.
8. Laurenson, L.; Dennis, N. T. M. Permeability of Common Elastomers for Gases over a Range of Temperatures. *J. Vac. Sci. Technol. A Vacuum, Surfaces, Film.* 1985, 3 (3), 1707–1710. <https://doi.org/10.1116/1573005>.
9. Peacock, R. N. Practical Selection of Elastomer Materials for Vacuum Seals. *J. Vac. Sci. Technol.* 1979, 17 (1), 330–336. <https://doi.org/10.1116/1570380>.
10. Sturm, P.; Leuenberger, M.; Sirignano, C.; Neubert, R. E. M.; Meijer, H. A. J.; Langenfelds, R.; Brand, W. A.; Tohjima, Y. Permeation of Atmospheric Gases through Polymer O-Rings Used in Flasks for Air Sampling. *J. Geophys. Res. Atmos.* 2004, 109 (4). <https://doi.org/10.1029/2003jd004073>.
11. Holland, L.; Steckelmacher, W.; Yarwood, J. *Vacuum Manual*; Holland, L., Steckelmacher, W., Yarwood, J., Eds.; E. & F. N. Spon Ltd.: London, England, 1974. [https://doi.org/10.1016/S1043-4526\(08\)60100-X](https://doi.org/10.1016/S1043-4526(08)60100-X).
12. Zhang, H.; Cloud, A. The Permeability Characteristics of Silicone Rubber. In *Proceedings of the SAMPE Fall Technical Conference: Global Advances in Materials and Process Engineering*; Society for the Advancement of Material and Process Engineering: November 6 – 9, Dallas, TX, USA, 2006; p paper no 15.
13. Zhang, D.; Deen, N. G.; Kuipers, J. A. M. Numerical Simulation of the Dynamic Flow Behavior in a Bubble Column: A Study of Closures for Turbulence and Interface Forces. *Chem. Eng. Sci.* 2006, 61 (23), 7593–7608.
14. Massey, L. K.; *Plastics Design Library*; Knovel (Firm). *Permeability Properties of Plastics and Elastomers a Guide to Packaging and Barrier Materials*. PDL handbook series. 2nd ed. *Plastics Design Library*; William Andrew Pub.: Norwich, NY, 2003.
15. Maolin, C.; Changchun, W. Principles of and Tips for Nitrogen Displacement in Gas Pipeline Commissioning. *Nat. Gas Ind.* 2015, 2 (2–3), 263–269. <https://doi.org/10.1016/j.ngib.2015.07.020>.
16. Johnson, J. E.; Svedeman, S. J.; Kuhl, C. A.; Gregor, J. G.; Lambeth, A. K. Pipeline Purging Principles and Practice. In *Volume 2: Design, Construction, and Operation Innovations; Compression and Pump Technology; SCADA, Automation, and Measurement; System Simulation; Geotechnical and Environmental*; American Society of Mechanical Engineers, 1996; Vol. 2, pp 765–775. <https://doi.org/10.1115/IPC1996-1882>.
17. Lonvaud-Funel, A.; Matsumoto, M. Le Coefficient de Solubilité Du Gaz Carbonique Dans Les Vins. *VITIS - J. Grapevine Res.* 1979, 18 (2), 137–137. <https://doi.org/10.5073/VITIS.1979.18.137-147>.



Capítulo 6

Trasiegos: aplicación de gases de inertizado para prevenir la incorporación de oxígeno al vino

Rubén del Barrio Galán, María del Álamo Sanza e Ignacio Nevarés Domínguez
Grupo UVaMOX- Universidad de Valladolid

Este capítulo está basado en el trabajo de del Barrio-Galán, R.; Nevarés, I.; del Alamo-Sanza, M. Characterization and Control of Oxygen Uptake in the Blanketing and Purging of Tanks with Inert Gases in the Winery. *Beverages* 2023, 9, 19.



6. 1. Introducción

6. 2. Desarrollo de los experimentos

6.3. Resultados

6.3.1. Aplicación de gases para el inertizado de un depósito vacío antes del trasiego (purging o flushing)

6.3.2. Determinación del volumen de gas para el inertizado total de un depósito vacío (relación coste beneficio)

6.3.3. Optimización del proceso de inertizado

6.3.4. Eficacia de la cobertura de gas en el depósito origen con diferentes gases y diferente volumen de gas adicionado

6.4. Conclusiones

6.5. Referencias

6.1.- Introducción

La presencia de oxígeno atmosférico genera fenómenos de oxidación en el vino que afectan a su evolución química y sensorial. Durante el proceso de elaboración del vino, existen múltiples etapas en las que la concentración de oxígeno disuelto se incrementa, de forma intencionada o no, a través de los tratamientos o equipos utilizados, desde el estrujado de la uva hasta el embotellado o envasado del vino final¹⁻⁴, siendo inevitable el aporte de oxígeno. En general, este aporte se considera negativo para las características sensoriales de los vinos blancos y rosados principalmente¹⁵⁻⁷. De todas las etapas el trasiego del vino es una de las más críticas en la incorporación de oxígeno, debido a la dificultad que existe para crear una capa de gas de inertizado eficaz sobre la gran superficie del vino expuesta al aire, lo que conlleva una gran incorporación de oxígeno al vino¹⁵⁻⁷. El resultado de esta etapa es un incremento de oxígeno disuelto en el vino pudiendo pasar de 0,37 mg/L a valores superiores a 4 mg/L, el incremento dependerá de la técnica y la tecnología empleada^{4,8-11}. Durante el trasiego, hay tres puntos

principales a considerar para prevenir la oxidación del vino: el depósito que se vacía, el depósito que se llena y las mangueras y bombas utilizadas para realizar el movimiento del vino¹².

El nivel de protección del vino se ve afectado por la incorporación de oxígeno debido al consumo del anhídrido sulfuroso (SO_2) que en esta operación se reduce entre 10 y 20 mg/L de SO_2 libre de un vino¹³. En los últimos años, la demanda de vinos más suaves, afrutados y aromáticos ha obligado a la industria enológica a realizar grandes esfuerzos para producir vinos de más alta calidad. Es por ello que se emplean diferentes gases de inertizado como el nitrógeno (N_2), el dióxido de carbono (CO_2) y el argón (Ar), así como las mezclas de éstos en diferente proporción, para minimizar los posibles problemas de inestabilidad química, física y sensorial del vino relacionados con una incorporación elevada de oxígeno durante su trasiego. Un estudio realizado por Schenk et al.¹⁴ en vino blanco ya hablaba de la importancia del uso de los gases de

inertizado como el N_2 , CO_2 y Ar, así como la mezcla de Ar y CO_2 para desplazar el oxígeno que quedaba en el espacio de cabeza en la superficie del vino y la parte superior del recipiente donde se almacenaba. Sin embargo, no se ha prestado tanta importancia al inertizado de dicho recipiente antes de su llenado con el vino. Por tanto, siempre que se realice un trasiego es de importancia relevante proteger con gas de inertizado tanto el depósito origen que contiene el vino como el depósito que se va a llenar, además de las mangueras y bomba utilizados. Idealmente, para desplazar el aire contenido en un depósito vacío se debe incorporar el gas por la parte inferior del depósito y la dosificación del gas debe ser lenta para minimizar la turbulencia y la mezcla del gas de inertizado con el aire a medida que el depósito se inertiza y, de este modo, conseguir desplazar el aire ¹⁵.

A día de hoy, no se cuenta con la información suficiente sobre los procesos de control de la incorporación de oxígeno al vino durante el trasiego entre depósitos, operación que siempre está presente en el proceso de vinificación. El vino en el depósito origen, que se está vaciando, está en contacto con el aire que ocupa el espacio de cabeza entre la superficie del vino y la parte superior del depósito. La cantidad de aire que puede entrar en contacto con el vino será mayor cuanto mayor volumen de vino se haya trasegado, implicando un mayor riesgo de incorporación de oxígeno al vino. Por otro lado, el depósito destino que se va a llenar de vino, se encuentra lle-

no de aire y por tanto la probabilidad de que ocurra una incorporación incontrolada de oxígeno en este punto es muy alta. Una práctica habitual, para inertizar tanto el depósito origen como el de destino, es introducir una cantidad indeterminada de un gas de inertizado común, normalmente N_2 o CO_2 , hasta que el gas que sale del depósito apague una llama, por ejemplo, con un encendedor o fósforo. Sin embargo, se sabe que la concentración mínima de oxígeno por debajo de la cual no es posible la combustión se sitúa entre el 11,5–17 % cuando se utiliza N_2 y entre el 14,5–17 % cuando es CO_2 ¹⁶. Eso, inevitablemente crea una falsa sensación de protección contra el oxígeno ya que realmente sigue quedando oxígeno presente en el ambiente. Otra práctica común es quemar una "pastilla/pajuela de azufre" con la falsa idea de inertizar ese espacio que contiene aire (ver **Capítulo 8**) o simplemente no hacer nada.

Dentro del sector enológico existe la necesidad de conocer objetivamente los puntos críticos de incorporación de oxígeno durante el trasiego sin el uso de gases de inertizado. Por todo ello, en este capítulo se detallan los diferentes ensayos realizados con el fin de cuantificar la cantidad de oxígeno que se incorpora a un vino durante la operación de trasiego y compararlo con lo que ocurre cuando se aplican diferentes gases de inertizado tanto en el depósito de destino como en el depósito origen. Además, se ha buscado durante el ensayo minimizar los costes económicos optimizando los volúmenes de gas a aplicar.

6.2.- Desarrollo de los experimentos

Durante el desarrollo de las pruebas se utilizó una mezcla hidroalcohólica al 12,5% y pH = 3,5 (denominado vino modelo) que no consume oxígeno y permite cuantificar la incorporación de oxígeno durante los procesos de trasiego. Antes de cada trasiego, el vino modelo fue desgasificado con N_2 aplicado a un caudal de 10 L/min usando un difusor poroso hasta que el contenido de oxígeno fue <1 hPa.

Los estudios se realizaron en la bodega experimental de la Universidad de Valladolid (Campus La Yutera, Palencia) utilizando dos depósitos de 1800 L de capa-

cidad. Para las conexiones se utilizaron dos mangueras de caucho butílico DN32, una de 7 m y otra de 3 m, todas las conexiones fueron DIN 11851 con juntas de Viton. Se utilizaron estos materiales porque fueron los que mejores resultados dieron en un trabajo previo publicado por nuestro grupo¹⁰ detallado en el **Capítulo 5**. Se utilizó una bomba de rodete flexible (Volumex 30/40, BCM Enología s.r.l., Padua, Italia) con un caudal de 6000 L/h. Los gases de inertizado empleados fueron los habitualmente indicados para uso en bodega: N_2 , CO_2 , Ar, y las mezclas $N_2:CO_2$ y Ar: CO_2 (80:20), cuyas propiedades han sido descritas en el **Capítulo 3** de

este manual y fueron proporcionados por Carbueros Metálicos (Air Products Group, Barcelona, España). Para la medida del oxígeno disuelto se utilizaron 8 sondas de inmersión DP-PSt6 de 10 m de largo conectadas a dos dispositivos de medición OXY-4 SMA (PreSens GmbH, Ratisbona, Alemania). Todo el equipamiento se calibró periódicamente de acuerdo con las instrucciones de los fabricantes.

Para la inertización del depósito destino se colocaron 4 sondas para monitorizar el proceso de inertización de dicho depósito (Figura 6.1). La inertización de todo el volumen del depósito con los diferentes gases se monitorizó con la sonda colocada en la parte superior del depósito a 1.7 m (Figura 6.1, número 4). El proceso de optimizado de dicho depósito se realizó formando capas de diferente espesor con los diferentes gases de inertizado estudiados y se monitorizó con las sondas colocadas en el interior del depósito, a 0,04 m, 0,4 m y 1 m de altura desde el fondo, e introducidas a través de un conector situado en el parte superior (Figura 6.1). Cada gas se inyectó a través de una válvula situada en el fondo del depósito. A continuación, se abrió la botella de gas de inertizado a utilizar y se ajustó la presión con un medidor de presión absoluta a 1013 mba (presión atmosférica estándar) regulando el caudal de gas deseado. La inertización finalizó cuando las diferentes sondas colocadas a diferentes alturas, que midieron la presión parcial de oxígeno (p_{O_2}), alcanzaron un valor de $p_{O_2} < 1$ hPa (Figura 6.1).

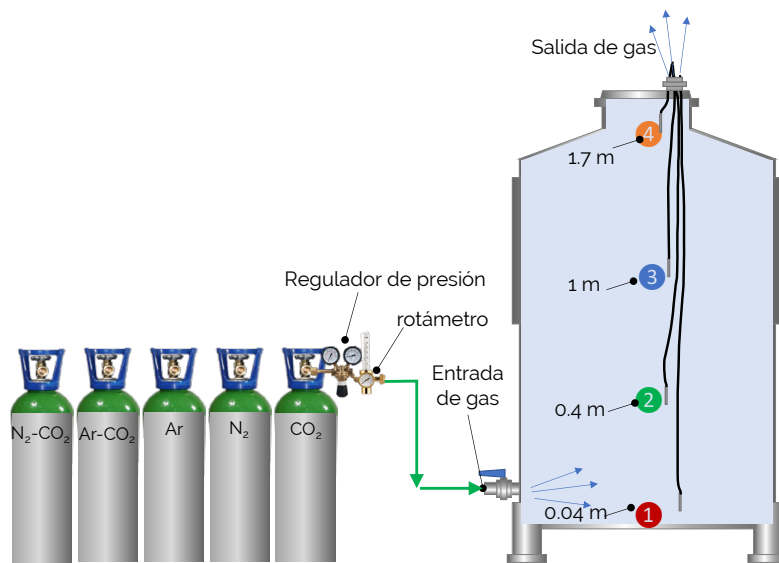


Fig. 6.1: Esquema de la conexión de los gases de inertizado a un depósito vacío para proceder a su inertización y colocación de las sondas para la monitorización del proceso

A continuación, se retiraron con cuidado las sondas y se cerró el conector por el que fueron insertadas las sondas para evitar la entrada de oxígeno. Una vez evacuado el oxígeno del interior del depósito destino, y antes de comenzar el trasiego del vino, también se inertizaron las mangueras hasta llegar a valores de $p_{O_2} < 1$ hPa. Para la inertización de las mangueras se siguió el protocolo establecido en el trabajo anteriormente publicado¹⁰ y el proceso se monitorizó con las sondas situadas en las válvulas de entrada y salida según se muestra en la Figura 6.2.

Se desarrolló un sistema dinámico para el seguimiento de los diferentes niveles de oxígeno en el vino, en la interfase vino-aire y en la capa de gas por encima de la superficie del vino que iba subiendo o bajando en función del llenado o vaciado de cada depósito monitorizado. Se utilizaron 2 sistemas dinámicos (flotadores), uno para el depósito origen y otro para el destino en los que se insertaron las sondas de medición del O_2 (Figura 6.2).

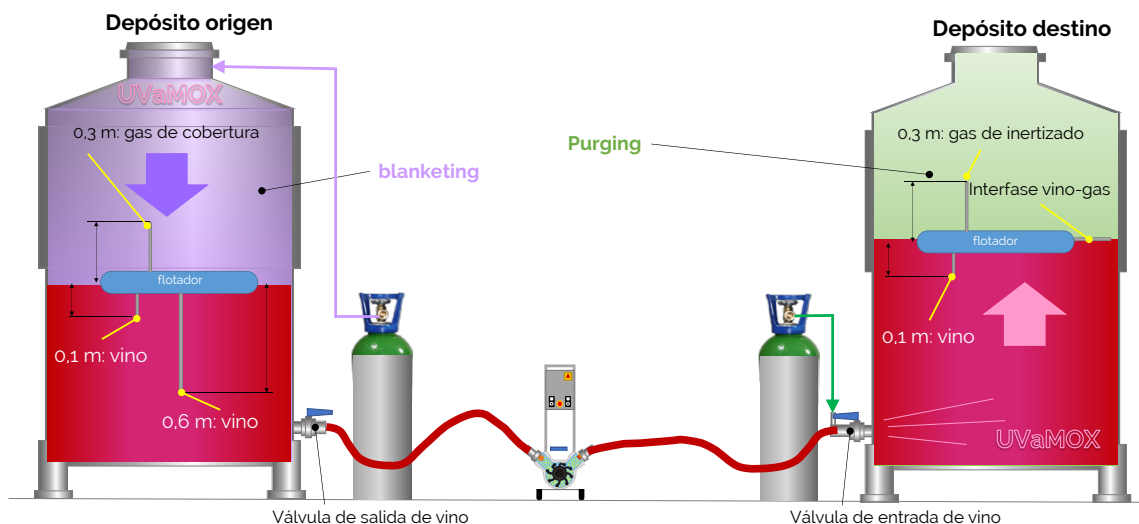


Fig. 6.2: Montaje de los dos sistemas de seguimiento dinámico del contenido en oxígeno tanto en el vino como en la capa gaseosa por encima de la superficie del vino en el depósito trasogado y en el depósito destino

El protocolo de protección del vino con una cobertura de gas de inertizado en el depósito origen (conocido como blanketing) consistió en crear una cobertura de gas de inertizado por encima del vino en el depósito origen con el objetivo de acompañar al vino durante el vaciado para protegerlo del oxígeno del aire que entra por la abertura superior del depósito. Los volúmenes de cada gas de inertizado aplicados durante el vaciado del depósito fueron 1 , $\frac{1}{2}$ y $\frac{1}{4}$ del volumen del depósito. El objetivo fue buscar el volumen mínimo de gas de inertizado que permitiera realizar un acompañamiento del vino para protegerlo del oxígeno del aire que entra por la parte superior del depósito durante su vaciado. Para inyectar cada gas se adaptaron las tapas de los depósitos con conectores rápidos permitiendo introducir el gas de inertizado de manera sencilla manteniendo la tapa cerrada, impidiendo así la entrada de aire.

Al comienzo de la operación, el depósito estaba completamente lleno de vino dejando un espacio mínimo entre la superficie del vino y la parte superior del depósito. En la realización de los ensayos se aseguró que este escaso espacio gaseoso estuviera prácticamente libre de oxígeno ($p_{O_2} < 10$ hPa) antes de realizar el trasiego. Para ello, debe inyectarse primero el gas de inertizado para desplazar el aire que quede en ese espacio. A continuación, se comenzó el trasiego activando la bomba y se inyectó el volumen de gas correspondiente al volumen de vino que se iba trasiegando al depósito destino. Una vez inyectado el volumen de gas a ensayar se cerró la entrada de gas y en los casos de $\frac{1}{2}$ y $\frac{1}{4}$ del volumen del depósito, se permitió la entrada de aire hasta la finalización del trasiego (Figura 6.2).

6.3.- Resultados

6.3.1.- Aplicación de gases para el inertizado de un depósito vacío antes del trasiego (purging o flushing)

En la actualidad, se conocen diferentes métodos para realizar el inertizado de un depósito destino vacío que contiene aire en su interior como son el desplazamiento, la dilución, el cambio de presión y la purga por

vacío, siendo los dos primeros los más habituales en bodega. El objetivo de todos ellos es reducir o eliminar por completo el contenido de oxígeno o cualquier gas no deseado de un sistema determinado introduciendo un gas de inertizado en el sistema¹⁷⁻²¹. La inertización puede ser total o parcial, siendo esta última aquella en la que se reduce la concentración de oxígeno hasta el nivel considerado aceptable para cada aplicación. En enología se establece que un recipiente está completamente inertizado cuando la concentración de oxígeno en el aire es inferior al 0,5% (2,5% aire saturado o 5 hPa)^{3,17-22}. En el inertizado se requiere que el gas de inertizado se utilice a un caudal bajo para evitar turbulencias y que dicho gas de inertizado preferentemente tenga una densidad superior a la del gas a desplazar, en este caso el aire.

La *Figura 6.3* muestra un ensayo realizado donde se monitorizó el contenido de oxígeno disuelto en el vino modelo que había sido desoxigenado previamente a su trasiego y sin aplicar ningún gas de inertizado. Se vio que el vino modelo llegó a la válvula de entrada del depósito vacío destino prácticamente libre de oxígeno, pero al entrar en dicho depósito durante los primeros 2 minutos de trasiego el vino alcanzó el nivel de saturación de oxígeno ($p_{O_2} > 200$ hPa; aproximadamente > 9 mg/L). Este aumento probablemente se debió a la entrada violenta del vino en el depósito destino, a la formación de turbulencias y a una gran superficie de líquido en contacto con el aire del interior del depósito. A medida que se llenaba de vino el depósito de destino, la concentración de oxígeno disuelto en el vino modelo disminuía. Teniendo en cuenta el oxígeno incorporado durante ese tiempo y el volumen de vino afectado calculado a partir del caudal, la oxigenación equivalente media recibida por dicho vino se estimó en 1,39 mg/L. En este caso, esta incorporación de oxígeno afectaría a la protección de un vino real, ya que el vino podría perder 5,6 mg/L de SO_2 , debido al consumo del anhídrido sulfuroso presente¹³. Se pudo observar una incorporación continua de O_2 a medida que se realizaba el trasiego ya que, transcurridos 12 minutos de trasiego, el vino llegaba a la válvula de entrada del depósito de destino con unos niveles de oxígeno que sólo podían haber sido adquiridos en el depósito de origen (*Figura 6.3*). Esto pudo deberse a la incorporación de oxígeno del aire del espacio de cabeza mientras se vaciaba el depósito origen, ya que en este ensayo no se aplicó una cobertura protectora de gas de inertizado (blanketing). Por tanto, se pudo ver que la cantidad de oxígeno que entra en contacto con el vino modelo es diferente en cada momento del trasiego siendo mayor al inicio y menor al final, asumiendo un valor promedio de 1,39 mg/L.

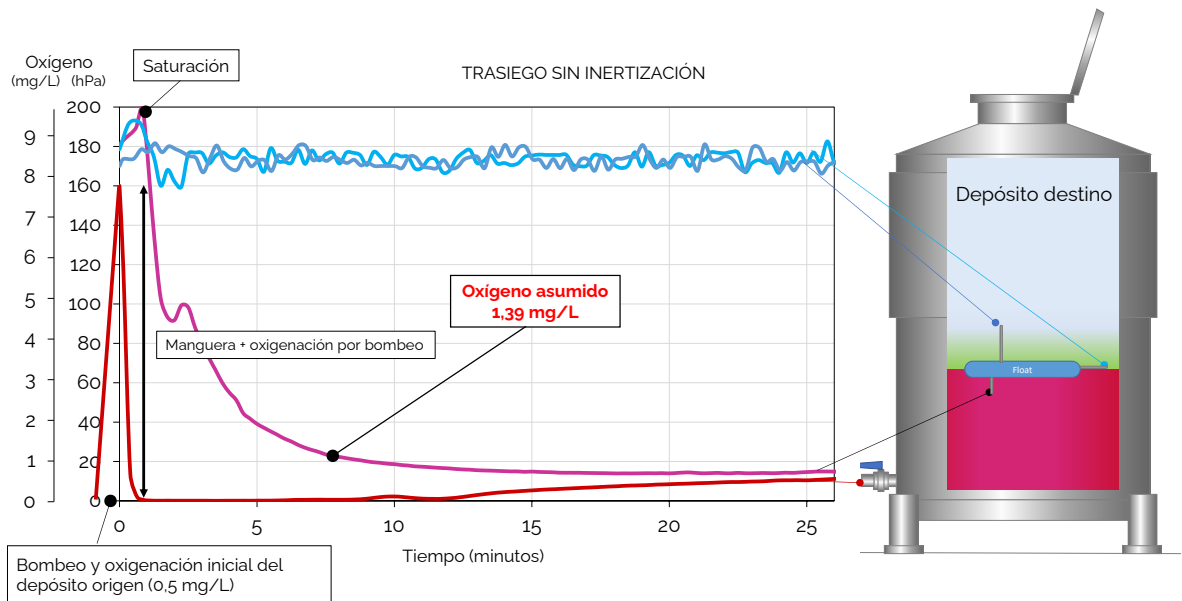


Fig. 6.3: Evolución de los niveles de oxígeno disuelto y oxígeno gaseoso en un depósito vacío sin inertizar durante su llenado con vino y el sistema de seguimiento dinámico desarrollado

6.3.2.- Determinación del volumen de gas para el inertizado total de un depósito vacío (relación coste beneficio)

El N_2 ha sido históricamente el gas utilizado por excelencia para la inertización. Esto era debido a su extraordinaria pureza de obtención, su alta capacidad para inertizar y su ilimitada producción. En la actualidad, con las nuevas tendencias de elaborar vinos cada vez más suaves y afrutados, el N_2 , por sí solo, queda lejos de ser ese gas ideal para este proceso. Esto es debido a que, en general, se considera que un depósito está completamente inertizado cuando los valores de oxígeno son inferiores al 2,5 % de aire saturado, lo que equivale a una presión parcial de oxígeno de 5 hPa y, para ello, se necesita incorporar entre 3 y 7 volúmenes (del depósito a inertizar) de N_2 ¹⁹⁻²¹. La puesta en el mercado de otros gases de inertizado más densos hace pensar que pueden ser más efectivos a la hora de desplazar el O_2 contenido en un recipiente. Por este motivo, es necesario aportar información acerca del volumen que es necesario emplear, en función de gas de inertizado que se utilice, para llevar a cabo el inertizado total de un depósito destino vacío que se va a llenar de vino. Así, el grupo UVaMOX ha realizado diferentes experiencias para monitorizar el proceso de inertizado total y secuencial de un depósito vacío aplicando diferentes gases de inertizado (ver Figura 6.2).

La Figura 6.4 muestra la evolución del contenido de O_2 cuando se inyectaron diferentes gases hasta alcanzar valores de $p_{O_2} < 5$ hPa, equivalentes a un contenido de oxígeno inferior al 0,5%. Cada uno de los gases estudiados formó progresivamente una cobertura de cada gas en el fondo del depósito destino que aumentó en altura con el volumen de gas inyectado. Este ensayo permitió establecer el volumen de cada gas estudiado necesario para formar una capa protectora de gas de inertizado con espesores de 0,04 m (correspondientes al 3% del volumen del depósito), 0,4 m (correspondiente al 25%), 1 m (correspondiente al 60%) y 1,7 m (100%) y que permitiera mantener valores de oxígeno en la capa protectora inferiores al 2,5% de aire saturado. Así, se vio que es posible realizar coberturas de diferentes espesores con cada gas de inertizado y que se mantienen en la parte inferior del depósito destino. Como era de esperar, el volumen de gas necesario aumentaba a medida que aumentaba la capa de gas a formar (0,04 m (3%), 0,4 m (25%), 1 m (60%) y 1,7m (100%)). Para la inertización completa del depósito (1,7 m), el menor volumen de gas de inertizado utilizado fue con la mezcla $Ar:CO_2$ empleando 0,7 depósitos. A continuación, y en orden creciente, la mezcla $N_2:CO_2$ con 1 depósito, CO_2 , Ar con 1,25 de depósitos y, finalmente, N_2 con 2,7 depósitos. Por lo tanto, el menor consumo de gas de inertizado se obtuvo utilizando la mezcla $Ar:CO_2$, siendo claramente la más efectiva. Estos resultados eran de esperar, ya que el CO_2 y el Ar son los gases más densos y pesados y, por lo tanto, pueden realizar la purga por desplazamiento más rápido^{23,24}. Por el contrario, el N_2 tiende a disolverse con el O_2 y no logra desplazarlo^{10,17}.

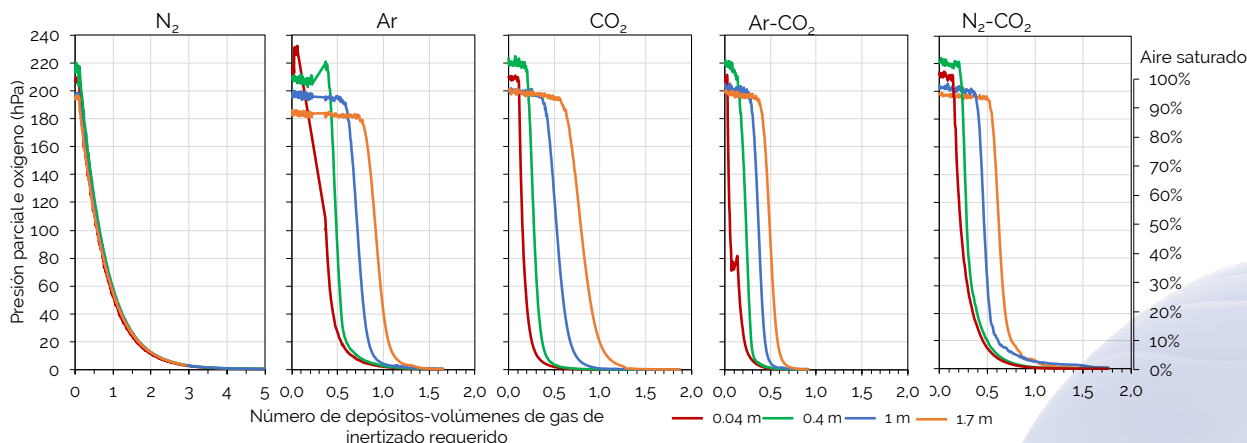


Fig. 6.4: Evolución de los niveles de oxígeno a cuatro alturas en el proceso de inertización completa de un depósito vacío con los diferentes gases de inertizado utilizados

Además de la eficacia de cada gas de inertizado utilizado es importante tener en cuenta el coste económico de la aplicación de estos gases para las bodegas. Por lo tanto, en términos de coste económico (€/m³ de capacidad del depósito), la inertización con CO₂ fue claramente la más recomendable, mientras que la inertización con Ar y N₂ supone un mayor coste para realizar el inertizado completo del depósito destino (Figura 6.5).

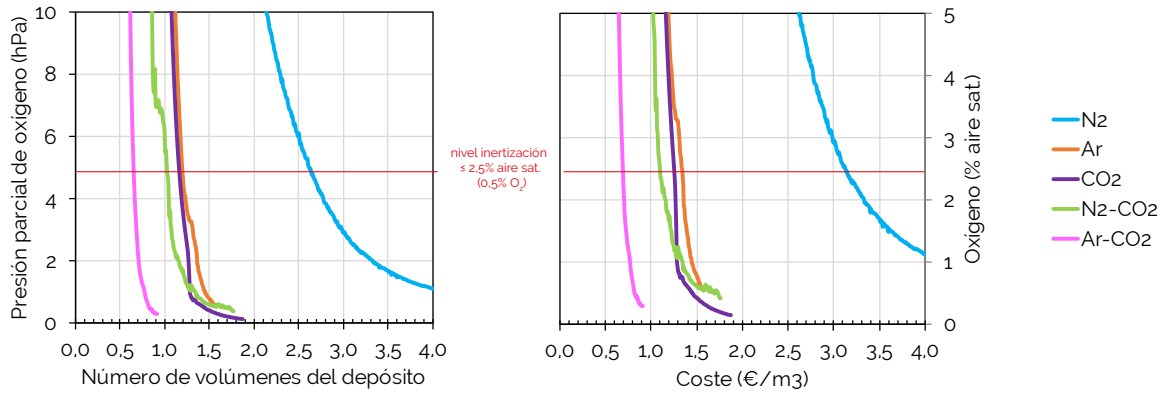


Fig. 6.5: Detalle del índice volumétrico (número de volúmenes de gas respecto al volumen del depósito) y del coste (€/m³) durante la inertización completa de un depósito vacío con los cinco gases de inertizado ensayados

6.3.3.- Optimización del proceso de inertizado

Los resultados obtenidos en los ensayos de inertización total mostraron una clara estratificación por capas de cobertura de cada gas de inertizado, capas de espesor proporcional al volumen de gas incorporado y que se acumularon en la parte inferior del depósito destino.

En base a esto, el siguiente objetivo fue establecer el espesor mínimo que permitía garantizar una buena protección del vino modelo durante su trasiego al depósito destino. Para ello se realizaron experiencias con diferentes espesores de cobertura de cada gas para optimizar la cantidad de gas como el tiempo que se requiere para la inertización completa de un depósito. En concreto se aplicaron diferentes volúmenes de cada gas en el depósito destino (3%, 25% y 60% del volumen del depósito antes de realizar el trasiego) (ver Figura 6.6).

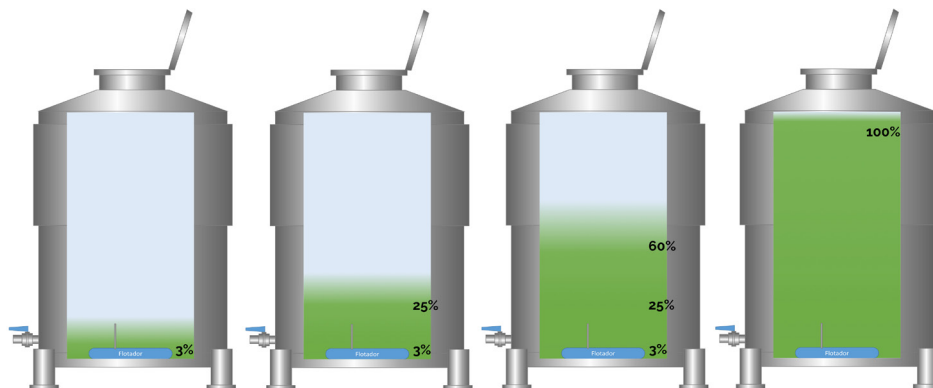


Fig. 6.6: Diagrama del proceso de optimización del inertizado con los diferentes gases de inertizado para generar una capa correspondiente al 3% (0,04 m de altura), 25% (0,4 m de altura) y 60% (1 m de altura)

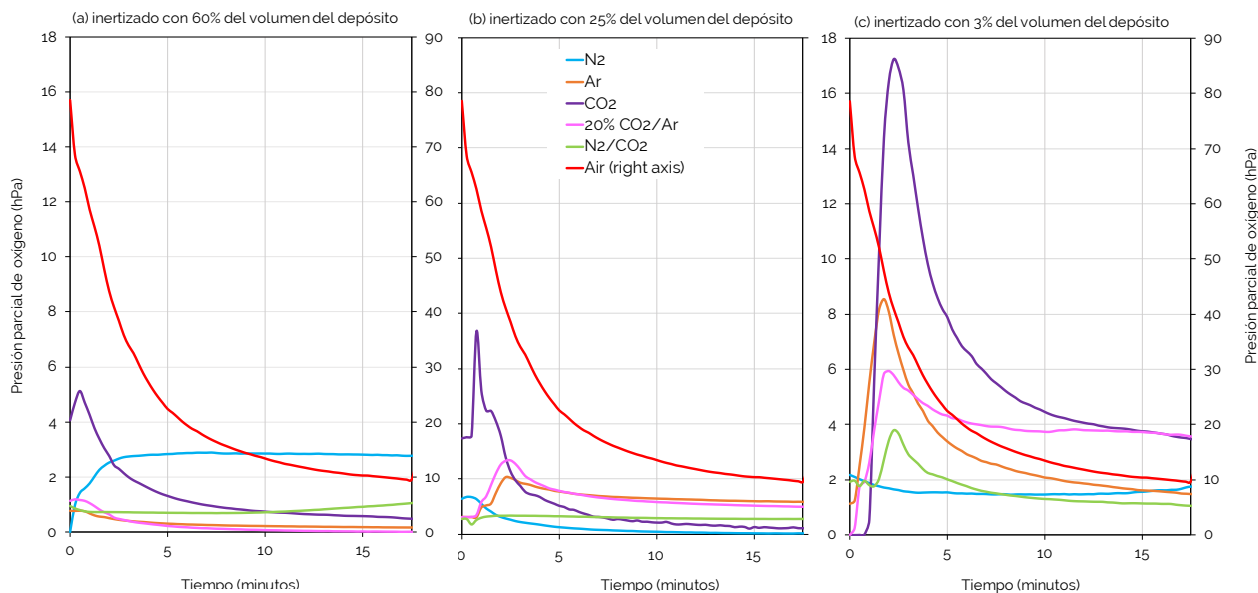


Fig. 6.7: Evolución de los valores de oxígeno disuelto en el vino durante un trasiego al aire y con los cinco gases de inertizado ensayados con tres intensidades diferentes

Como era de esperar, los valores de oxígeno disuelto en el vino cuando se realizaba un trasiego del vino sin aplicar inertización fueron siempre mayores que cuando se aplicaba cualquier gas de inertizado, incluso con el volumen más pequeño (3%) (Figura 6.7). Cuando se aplicaron los diferentes gases se observó que, en general, a medida que disminuía el espesor de la capa de cobertura de cada gas, disminuía el nivel de protección observándose un aumento en el contenido de oxígeno disuelto en el vino. En general se observó que, durante los primeros minutos de trasiego, el CO₂ era el gas que menos protección ofrecía con los diferentes volúmenes aplicados (3%, 25% y 60%) frente a la incorporación de oxígeno al vino. En cambio, cuando el vino se trasiega después de inertizar con N₂ y con N₂:CO₂, los valores de incorporación de oxígeno al vino fueron menores.

Cuando la medida de oxígeno comienza a ser más estable (desde la mitad del trasiego hasta el final), se pudo observar que el nivel de protección aplicando el 60% y el 25% de volumen fue muy similar. Por lo tanto, se puede decir que aplicando el 25% del volumen del depósito sería suficiente para mantener un contenido bajo de oxígeno en el vino. En cambio, el nivel de protección aplicando el 3% del volumen del depósito el nivel de protección fue mucho menor, ya que los valores de oxígeno aumentaron en todos los casos estudiados. La incorporación del 25% del volumen del depósito de cada gas en el depósito vacío destino antes del trasiego permitió formar una capa y mantener unos niveles de oxígeno en el espacio de cabeza entre la superficie del vino y la parte superior del depósito por debajo de lo que se considera inertización total (Figura 6.8a), siendo el Ar el gas que permitió mantener los niveles de oxígeno más bajos, muy probablemente debido a su alta densidad. Además, el incremento en mg/L de oxígeno en el vino cuando entra al depósito destino fue bastante bajo aplicando el 25% de cada gas (Figura 6.8b). Sin embargo, tal como se comentó previamente, desde un punto de vista coste-beneficio, el CO₂ es más recomendable para desplazar el oxígeno del depósito vacío.

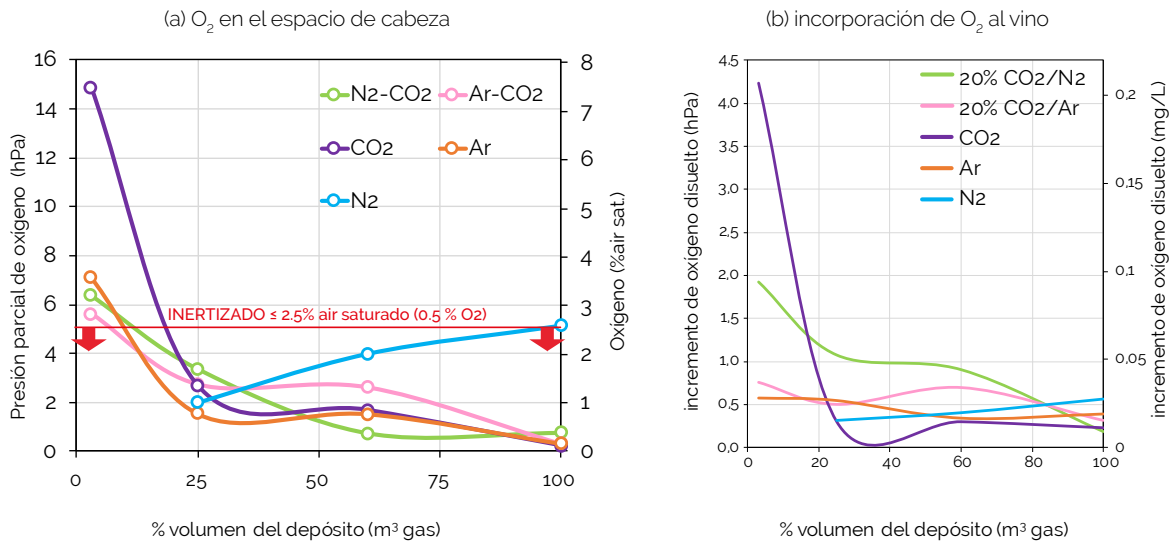


Fig. 6.8: Variación en el depósito destino vacío del a) porcentaje de volumen del depósito de gas de inertizado necesario para asegurar la inertización ($pO_2 \leq 2.5\%$ aire saturado.) del espacio gaseoso por encima del vino, y b) repercusión en la incorporación de oxígeno disuelto en el vino trasegado al llenar el depósito

6.3.4.- Eficacia de la cobertura de gas (blanketing) en el depósito origen con diferentes gases y diferente volumen de gas adicionado

Tras los efectos positivos observados con el inertizado del depósito vacío destino (purging) donde se va a trasegar el vino, era previsible creer que la práctica de incorporar un volumen determinado de gas de inertizado, para formar una capa de cobertura que permita proteger el vino en el depósito origen durante su vaciado (blanketing), contribuiría significativamente a evitar la incorporación de oxígeno al vino y, por tanto, a protegerlo del aire que entra por la tapa durante el vaciado del depósito. Por todo ello, se realizaron diferentes experiencias con vino modelo para evaluar los valores de oxígeno en el espacio de cabeza por encima de la superficie del vino, en un depósito origen que se vacía empleando diferentes gases de cobertura (blanketing).

Según la bibliografía consultada, Schenk et al.,¹⁴ fueron los primeros en aplicar una cobertura de gas a los vinos que se almacenaban en depósitos de 50L, parcialmente llenos, para protegerlos del oxígeno. Sin embargo, no se han visto estudios que apliquen gases de inertizado acompañando al vino mientras se trasega hacia otro depósito. Por ello, además de estudiar la eficacia de los diferentes gases también se realizaron ensayos con diferentes volúmenes de cada gas para optimizar y establecer el volumen mínimo que permite mantener al vino protegido de la oxigenación durante el trasego. Se aplicaron volúmenes de cada gas correspondientes a 1, ½ y ¼ de depósito y se pudo observar que cuanto mayor era el volumen de gas incorporado al depósito con vino durante el vaciado, mayor era el nivel de protección del espacio de cabeza generado entre el vino y la parte superior del depósito origen, a excepción del N₂:CO₂ (Figura 6.9). En general, se vio que cuando ya no se inyectaba gas de inertizado en las pruebas con ½ y ¼ de volumen de depósito, el nivel de protección del espacio de cabeza disminuía, y este efecto protector era mucho menor en las pruebas realizadas con N₂ y N₂:CO₂. Por tanto, en base a estos resultados, se pudo afirmar que, aplicando ½ del volumen del depósito de Ar, CO₂ y Ar:CO₂ se puede proteger adecuadamente el espacio de cabeza del depósito origen durante todo el trasego.

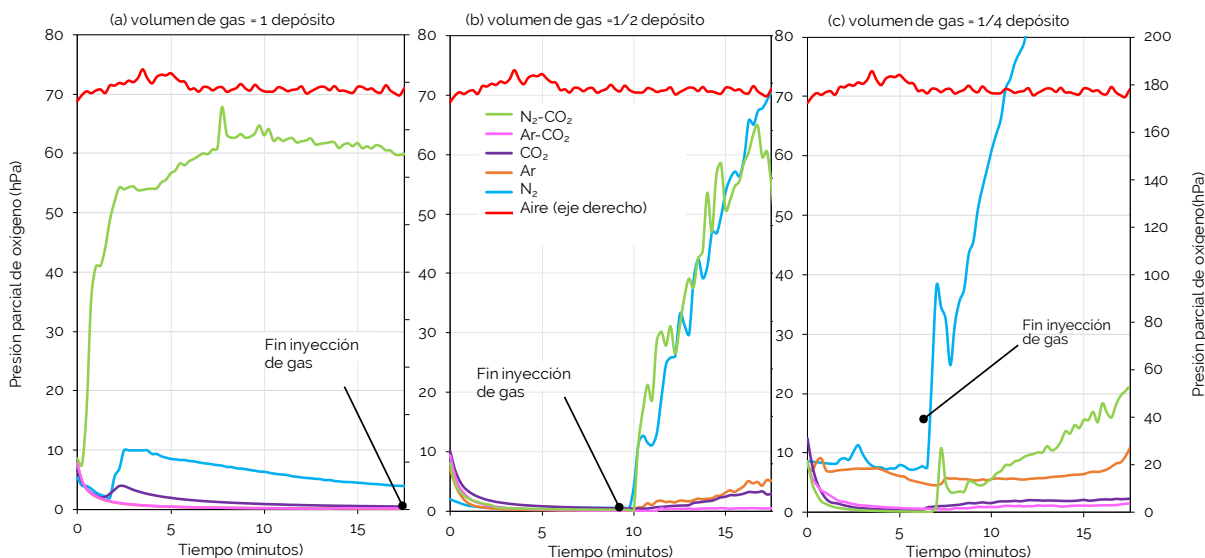


Fig. 6.9: Evolución de los valores de oxígeno en el espacio de cabeza por encima de la superficie del vino de un depósito trasegado que se vacía durante un traseigo al aire y con los cinco gases de inertizado ensayados con tres intensidades diferentes de gas de cobertura (blanketing)

También se monitorizó el oxígeno disuelto en el vino a la salida del depósito origen lo que permitió medir la cantidad de oxígeno incorporado al vino cuando no se aplicaba cobertura de gas y cuando se aplicaban diferentes volúmenes de cada uno de los gases estudiados (Figura 6.10). El efecto fue parecido a lo que ocurría en el espacio de cabeza entre el vino y la parte superior del depósito. En el caso del traseigo sin realizar cobertura de gas de inertizado (línea roja), cuando el depósito estaba medio lleno, se vio claramente la incorporación del aire que entraba en el depósito mientras se vaciaba. En cambio, cuando se inyectó gas de inertizado al mismo tiempo que se realizaba el traseigo y con el mismo caudal de vaciado (Figura 6.10a), todos los gases inyectados minimizaron la incorporación de oxígeno al vino, excepto el N_2 y la mezcla $N_2:CO_2$, que se comportaron peor que el resto de gases. El uso de N_2 , un gas no recomendado para la inertización por cobertura¹⁶, fue responsable de los peores resultados. La Figura 6.10b muestra la evolución del oxígeno disuelto en el vino en la válvula de salida del depósito de traseigo cuando se inyectó $\frac{1}{2}$ del volumen del depósito y luego se permitió la entrada de aire. En este caso, el comportamiento en la evolución del contenido de oxígeno disuelto del vino trasegado se mantuvo relativamente constante, evidenciándose que apenas hubo incorporación desde el espacio de cabeza, y lo mismo ocurrió con la inyección de $\frac{1}{4}$ de volumen (Figura 6.10c). En general, el N_2 y su mezcla con el CO_2 mostraron un comportamiento más desigual. En todos los estudios realizados, el vino modelo mostró en la válvula de salida del depósito origen valores de oxígeno disuelto muy bajos, siendo menores cuanto mayor era el volumen de cobertura de gas aplicado.

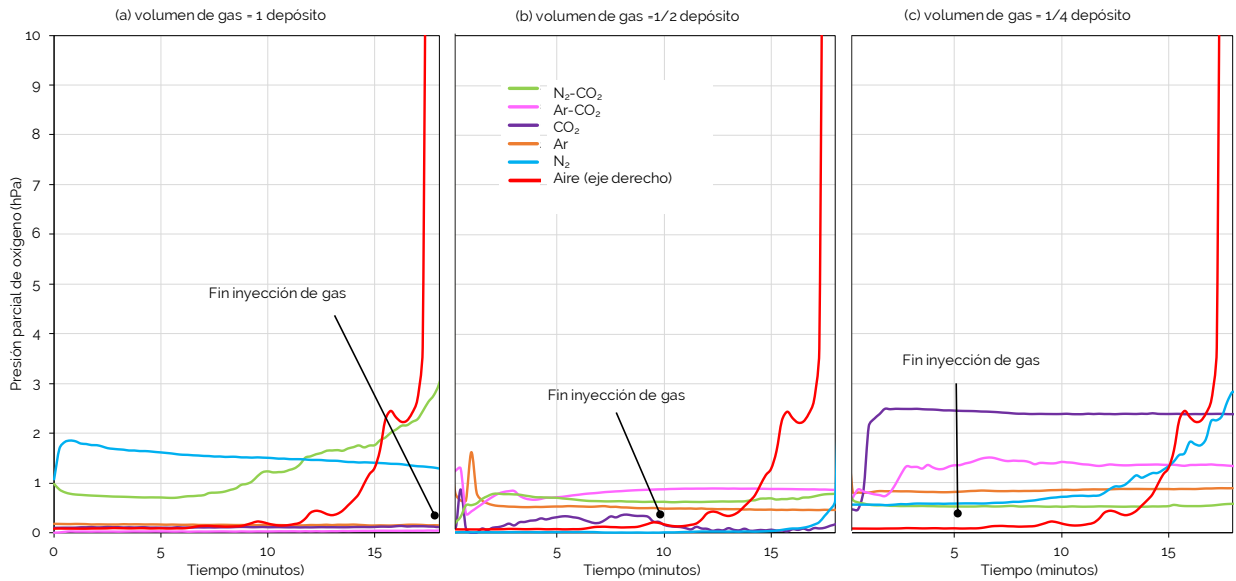


Fig. 6.10: Evolución de los valores de oxígeno disuelto en el vino en la válvula de salida de un depósito trasiegado que se vacía durante un trasiego al aire y con los cinco gases de inertizado ensayados con tres intensidades diferentes de gas de cobertura (blanketing)

6.4.- Conclusiones

Inertizar un depósito destino vacío con diferentes gases es efectivo para desplazar el oxígeno de dicho depósito, siendo la mezcla Ar:CO₂ la más efectiva y requiriendo menos volumen de gas para desplazar el oxígeno. En cambio, la utilización de N₂ requiere mucho más volumen para retirar el oxígeno, ya que en lugar de desplazarlo como los otros gases probados se diluye con el oxígeno siendo el gas menos recomendado. Por otro lado, desde el punto de vista económico, el gas más recomendable es el CO₂.

El nivel de protección del vino trasiegado y el espacio de cabeza en el depósito vacío de destino difieren en función del gas utilizado y del espesor de la capa de gas (% del volumen del depósito) formado. Se recomienda inertizar con un 25% del volumen del depósito que se va a llenar con cada gas de inertizado para proteger el vino trasiegado, con el fin de obtener buenos resultados de coste-beneficio durante el trasiego.

Para la cobertura de gas en el depósito origen, se recomienda la adición de ½ depósito de Ar o CO₂ y la mezcla de ambos para mantener inerte el espacio de cabeza entre la superficie del vino y la parte superior del depósito que se vacía durante el trasiego. La adición de este volumen permite mantener también niveles bajos de oxígeno disuelto en el vino que se está trasiegando desde el depósito origen.

Los resultados obtenidos en este trabajo han permitido optimizar la inertización de los depósitos con diferentes gases, minimizando así el volumen necesario para evitar la captación de oxígeno durante los trasiegos.

6.5.- Referencias

1. Calderón, J.F.; del Alamo-Sanza, M.; Nevares, I.; Laurie, F. The influence of selected winemaking equipment and operations on the concentration of dissolved oxygen in wines. *Cienc. Investig. Agrar.* 2014, 41, 273–280.
2. Catarino, A.; Alves, S.; Mira, H. Influence of technological operations in the dissolved oxygen content of wines. *J. Chem. Chem. Eng.* 2014, 8, 390–394.
3. Masella, P.; Angeloni, A.; Guerrini, L.; Spadi, A.; Maioli, F.; Calamai, L.; Parenti, A. A deeper understanding of the qualitative consequences of food pumping: A case study of wine. *Food Bioprod. Process.* 2022, 131, 13–21.
4. Day, M.P.; Schmidt, S.A.; Smith, P.A.; Wilkes, E.N. Use and impact of oxygen during winemaking. *Aust. J. Grape Wine Re.* 2015, 21, 693–704.
5. Moutounet, M.; Mazauric, J.P. L'oxygène dissous dans les vins. *Rev. Fr. Oenol.* 2001, 186, 12–15.
6. Castellari, M.; Simonato, B.; Torielli, G.B.; Spinelli, P.; Ferrarini, R. Effects of different enological treatments on dissolved oxygen in wines. *Ital. J. Food Sci.* 2004, 16, 387–396.
7. Ribéreau-Gayon, P.; Glories, Y.; Maujean, A.; Duboudieu, D. The Chemistry of Wine Stabilization and Treatments, Volume 1. In *Handbook of Enology*, 3rd ed.; John Wiley & Sons: Chichester, UK, 2021; p. 519. ISBN 9781119587668-1.
8. Vivas, N.; Glories, Y. Les phénomènes d'Oxydoreduction liés à l'élevage en barrique des vins rouges: Aspects technologiques. *Rev. Fr. Oenol.* 1993, 142, 33–38.
9. Available online: https://www.awri.com.au/industry_support/winemaking_resources/storage-and-packaging/pre-packaging_preparation/gas-adjustment/ (acceso en noviembre de 2022).
10. Nevares, I.; Fernández-Díaz, A.; del Alamo-Sanza, M. Characterization and control of hidden micro-oxygenation in the winery: Wine racking. *Foods* 2021, 10, 386–410.
11. del Barrio-Galán, R.; Nevares, I.; del Alamo-Sanza, M. Characterization and Control of Oxygen Uptake in the Blanketing and Purging of Tanks with Inert Gases in the Winery. *Beverages* 2023, 9, 19. <https://doi.org/10.3390/beverages9010019>
12. Wilson, D.L. Wine transfer using inert gas for prevention of oxidation. *Aust. Grapegrow. Winemak.* 1985, 256, 110–111.
13. Goode, J. Oxygen & Wine. Research Gets Specific about Oxygen, Closures, Bottling and Aging. *Wines & Vines*, August 2009, pp. 26–32. Available online: https://winesvinesanalytics.com/sections/printout_article.cfm?content=66003&article-feature
14. Schenk, W.; Bach, H.P.; Nobis, P. Ein Versuch zur Prüfung verschiedener Gasüberlagerungs-Methoden in Wein-Anbruchgebunden. *Zeitschrift für Weinbau und Kellerwirtschaft.* 1977, 24(2), 65–81.
15. Iowa State University 2022. Use of inert gases. <https://store.extension.iastate.edu/product/16405>
16. Green, D.W.; Robert, H.P. Perry's Chemical Engineers' Handbook, McGraw-Hill Professional, 8th ed.; McGraw-Hill: New York, NY, USA, 2007; Chapter 23; ISBN 978-0-07-142294-9.
17. Girardon, P. Gases in Enology. In *Gases in Agro-Food Processes*, 1st ed.; Cachon, R., Girardon, P., Voilley, A., Eds.; Academic Press: London, UK, 2019; pp. 433–449. ISBN 9780128124659.
18. American Gas Association. Purging Principles and Practices, 3rd ed.; American Gas Association: Washington, DC, USA, 2001. Available online: <https://law.resource.org/pub/us/cfr/ibr/001/aga.purging.2001.pdf>
19. Dharmadhikari, M. Use of Inert Gases. Midwest Grape and Wine Industry Institute. Available online: <https://www.extension.iastate.edu/wine/use-inert-gases> (acceso en diciembre de 2022).
20. Moroney, M. Use of Inert Gases. Available online: <https://www.extension.iastate.edu/wine/publications/use-of-inert-gases-2> (acceso en diciembre de 2022).
21. Reinhardt, H.J.; Himmen, H.R.; Kaltenecker, J. Inerting in the Chemical Industry, Ed. Linde Gases Division. Available online: https://www.lindegas.com/en/processes/inerting_purging_and_blanketing/index.html# (acceso en diciembre de 2022).
22. Lewis, D. Blanketing in storage tanks. *Aust. Grapegrow. Winemak.* 1990, 4, 100–101.
23. Zoecklein, B. Gases: Carbon Dioxide, Argon, and Nitrogen. (n.d.). Department of Food Science & Technology, Virginia Tech. https://www.apps.fst.vt.edu/extension/enology/downloads/wm_issues/Winery%20Gases/Winery%20Gases1.pdf (acceso en enero de 2023)
24. Stamp, C. Indispensable Inert Gas. *Wines & Vines*. 2009. Available online: https://winesvinesanalytics.com/sections/printout_article.cfm?article-feature&content=66992 (acceso en enero de 2023).



Capítulo 7

Retirada de oxígeno mediante borboteo de gases

Rubén del Barrio Galán
Grupo UVaMOX- Universidad de Valladolid

7.1. Introducción

7.2. Métodos para retirar el oxígeno disuelto en el vino mediante borboteo de gas de inertizado

7.3. Experiencias de retira de oxígeno en vino modelo

7.3.1. Optimización del caudal de N_2 para la retirada de oxígeno y utilización de otros gases

7.3.2. Escalado en el uso de N_2 para la retirada de oxígeno en vino modelo

7.4. Experiencias de retira de oxígeno en vino blanco y tinto

7.5. Conclusiones

7.1.- Introducción

Tal como se ha venido abordando en los capítulos anteriores, dentro del sector enológico es bien sabido que una alta concentración de oxígeno disuelto puede provocar la oxidación de los vinos, especialmente en vinos blancos¹. El vino va incorporando oxígeno durante todo el proceso de elaboración y en todos aquellos momentos dondequiera que entre en contacto con el aire. A menudo, la incorporación total de oxígeno al vino al final del proceso de elaboración puede ser superior aquella que no afecta, o que afecte en la menor medida posible a las características del vino. Se ha estimado que el contenido de oxígeno disuelto en vinos tintos embotellados debe ser inferior a 1,25 mg/L y en vinos blancos y rosados inferior a 0,6 mg/L². El momento habitual en el que se suele eliminar el oxígeno disuelto del vino es justo al final del proceso de vinificación. Esto se hace para minimizar al máximo la incorporación de oxígeno antes de que el vino sea embotellado. La eliminación del exceso de oxígeno disuelto del vino suele realizarse aplicando un borboteo continuo de gas de inertizado al vino, mayoritariamente nitrógeno (N_2). Esta técnica es conocida como "sparging" y empezó a utilizarse en el sector enológico en 1960³. A parte de N_2 , se pueden utilizar otros gases de inertizado utilizados de manera más o menos frecuente

en el sector enológico como el argón (Ar), dióxido de carbono (CO_2) o una mezcla de N_2 y CO_2 . Desde el punto de vista económico se prefiere el N_2 al Ar ya que es más barato. A menudo también se utiliza una mezcla de N_2 y CO_2 para mantener los niveles de dióxido de carbono disuelto en el vino, pero es menos eficiente⁴ que el N_2 .

La técnica del sparging está basada en la ley de Henry (Capítulo 1) que indica que la solubilidad de un gas en un líquido es proporcional a su concentración en la atmósfera existente sobre este líquido⁵. De este modo, si se disuelve N_2 en un vino de forma abundante el resto de los gases que se encuentran disueltos en el vino, como el oxígeno (O_2) o el CO_2 , tienden a intercambiarse con el N_2 de las burbujas para reestablecer el equilibrio, siendo eliminados del vino por arrastre con el N_2 sobrante por encima de su solubilidad en el vino⁵. Este sistema ha resultado ser efectivo para eliminar dichos gases del vino y también para reducir el exceso de SO_2 y ciertos aromas azufrados procedentes de procesos reductivos^{5,6}. Sin embargo, no se sabe con certeza cómo esta práctica puede afectar a la composición del vino, así como los factores físico-químicos y operativos que pueden influir en la eficacia del borboteo⁶.

Este procedimiento ha resultado ser muy eficaz también para eliminar el CO_2 ^{5,6}. Por otro lado, el proceso de desgasificado con N_2 o con otros gases de inertizado puede variar según el tipo de vino ⁷. En el caso de los vinos blancos, por ejemplo, se puede utilizar N_2 con el fin de eliminar el oxígeno disuelto. Sin embargo, este proceso también puede reducir el CO_2 por debajo del nivel óptimo, lo que puede afectar a la frescura y al sabor del vino. Para evitar este escenario, normalmente se recomienda utilizar CO_2 solo o una mezcla de CO_2 y N_2 . Con los vinos tintos, el N_2 suele ser la elección óptima para realizar el sparging. Sin embargo, algunos vinos tintos también suelen necesitar una pequeña cantidad de CO_2 disuelto, por lo que una mezcla de 2 partes de N_2 y 1 parte de CO_2 a veces puede producir resultados más deseables ⁷.

Por otro lado, los efectos potenciales del sparging sobre la concentración de compuestos aromáticos siguen siendo relativamente desconocidos, especulándose sobre el efecto de esta técnica en los compuestos aromáticos de interés para la calidad del vino. Según indican algunos autores ⁸ el sparging, a menos que se aplique con cuidado, puede eliminar por arrastre ciertos compuestos que influyen de manera positiva en el sabor y el aroma del vino. Sin embargo, un reciente trabajo realizado por Walls et al. ⁶ en vino blanco describe que no se producía una modificación significativa de los compuestos volátiles estudiados tras desoxigenar el vino en unas determinadas condiciones.

Siempre que sea necesario realizar sparging, debe hacerse con una relación gas/líquido lo más baja posible. El tamaño de la burbuja del gas, relación entre el caudal del gas de inertizado y el caudal del vino (si

la operación se realiza durante un trasiego de vino), el tiempo de aplicación (duración de contacto entre el gas de inertizado y el vino), la temperatura del vino, la presión a la que se aplique el gas de inertizado, el número de veces que se aplique el gas, la cantidad inicial de oxígeno en el vino, el diseño de toda la instalación de vinificación y la selección del equipamiento para realizarlo son los aspectos a tener en cuenta ⁸⁻¹². Según Girardon ⁸ la eficacia de este proceso se puede mejorar mediante la aplicación de turbulencia en espiral con un vórtice en línea pudiendo aumentar la eficiencia alrededor del 90%. Otros autores han utilizado un mezclador-agitador para realizar esta técnica en vino modelo con el objetivo de eliminar el oxígeno ⁶. Sin embargo, ha de tenerse en cuenta que si la agitación es elevada se puede favorecer un régimen de burbujas heterogéneo en vez de homogéneo, que es el que ocurre a tasas de flujo de gas más bajas y se caracteriza por formar burbujas más pequeñas que se elevan uniformemente desde el difusor de gas hasta la superficie del vino ¹³. La eficacia del sparging va a depender también de la matriz del vino sobre el que se quiera aplicar. El momento más idóneo para realizar el sparging suele ser al final del proceso de elaboración del vino, ya que es en este punto donde el vino tiene un menor contenido proteico, parámetro que parece tener una importancia relevante en el proceso de desorción del oxígeno en el vino cuando se le aplica N_2 . Además, los niveles de etanol, glicerol, azúcar y extracto seco podrían afectar a la viscosidad del vino, lo que en consecuencia podrían afectar al proceso de desorción de oxígeno. En general, en soluciones acuosas como el vino, la presencia de fenoles, ácidos, alcoholes, surfactantes e iones también afectan a este proceso ¹⁴.

7.2.- Métodos para retirar el oxígeno disuelto en el vino mediante borboteo de gas de inertizado

Los dos métodos más comunes para eliminar el oxígeno disuelto en un vino son borbotear el gas de inertizado en un depósito con el vino mediante la formación de una columna de burbujas del gas de inertizado y/o borbotear el gas en línea durante el movimiento del vino ^{3,4,14,15}.

- *Columna de borboteo en depósito cilíndrico*: recipiente con forma cilíndrica que contiene el vino, normalmente un depósito con diferente altura y diámetro, y a través del cual se introduce por su parte inferior el gas a borbotear a través de un difusor poroso. El ascenso del gas a través del vino genera una columna de

burbujas apreciable en la superficie una vez iniciado el proceso. Este tipo de recipiente es el más eficaz para la eliminación de oxígeno disuelto al tener una mayor relación entre la altura y el diámetro, lo que permite un mayor tiempo de contacto entre el gas y el vino favoreciendo la eliminación del oxígeno (Figura 7.1).

- *Borboteo en línea:* Se introduce el gas directamente en una corriente del vino que fluye a través de una tubería o manguera (Figura 7.1). La cantidad de puntos donde aplicar el gas puede ser 1 o varios en función de la distancia que vaya a recorrer el vino desde el punto inicial hasta el final. Esta técnica permite también eliminar el oxígeno incorporado en un proceso, por ejemplo, el filtrado por el que pase el vino.

Se ha estimado que para un vino que se encuentra saturado de oxígeno, un solo paso a través de una columna de borboteo reduce la concentración de oxígeno disuelto en mayor medida que a través de un borboteo en línea³. En cambio, para un vino con niveles más bajos de oxígeno disuelto los dos métodos son igualmente efectivos. Sin embargo, estos resultados no son necesariamente indicativos de que un método sea más eficaz que el otro, ya que existen numerosos factores no contabilizados que afectarán a la eficiencia de cada proceso. Por otro lado, Cant³ también evaluó la eficacia del borboteo de un determinado volumen de N₂ para eliminar el oxígeno presente en un vino, en una sola vez o en dos veces, siendo más efectivo realizarlo en dos veces.

Existen otros métodos para eliminar el oxígeno disuelto en agua como la ebullición a presión atmosférica o la ebullición a presión reducida¹⁶. Sin embargo, es un proceso que requiere un gasto energético mucho mayor que el sparging y que es perjudicial para la calidad del vino debido a la destrucción de componentes aromáticos positivos y la pérdida de etanol¹⁷.

Recientemente, se han empezado a utilizar en el sector vitivinícola contactores de membrana¹⁸⁻²¹ que se consideran menos invasivos, ya que su utilización no conlleva la eliminación de compuestos aromáticos del vino. Sin embargo, aparte del coste de estos equipos, su uso requiere que el vino esté bien filtrado antes de entrar en contacto con la membrana y además es necesaria una limpieza regular de la membrana¹⁸⁻²¹.

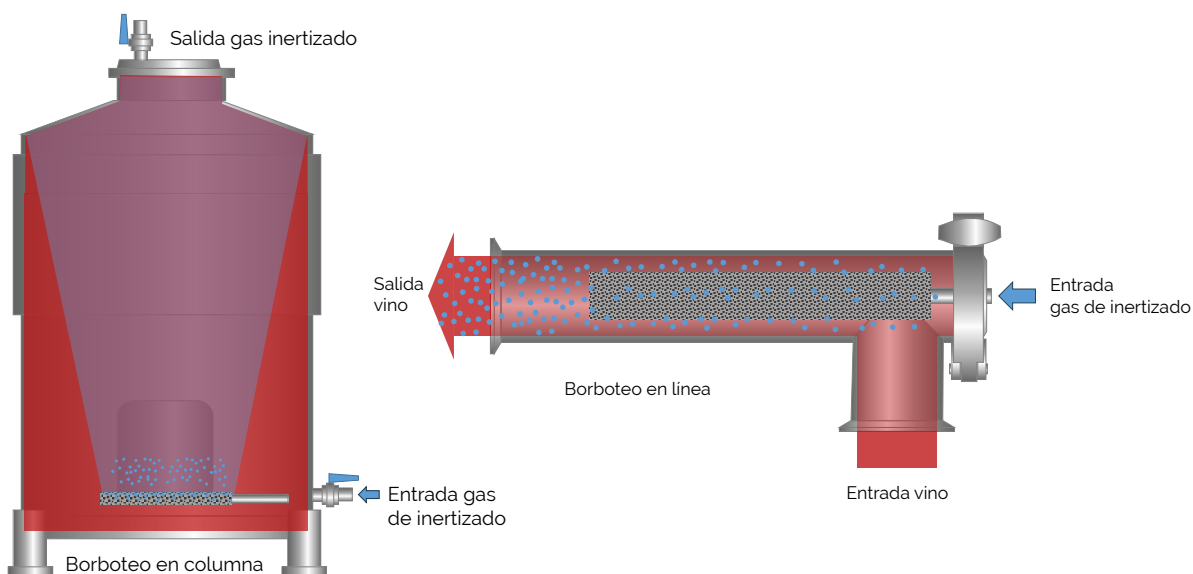


Fig. 7.1- Métodos para eliminar el oxígeno disuelto en un vino, a) Borboteo de gas de inertizado en un depósito con el vino y b) Borboteo de gas en línea durante el movimiento del vino

7.3.- Experiencias de retirada de oxígeno en vino modelo

Se trabajó con un vino modelo que consistía en una disolución hidroalcohólica con un grado alcohólico de 12,6% V/V de alcohol, pero sin el resto de compuestos que forman parte de la matriz de un vino real que pueden consumir oxígeno, y un pH de 3,5. Todas las experiencias realizadas para la retirada de oxígeno mediante sparging se realizaron en la bodega experimental del campus La Yutera (Palencia) de la Universidad de Valladolid. Se siguió la metodología desarrollada por Walls et al.⁶ con ciertas modificaciones. Así, se trabajó al mismo caudal de transferencia de N₂ para desoxigenar el vino modelo. El vino se colocó en un tubo de plexiglás que tenía una capacidad máxima de 4 L formando una columna de 1,5 m de altura y 5 cm de diámetro. La temperatura de trabajo fue de 15,5 °C. El contenido en oxígeno se midió con 2 sondas de inmersión DP-PSt6 conecta-

das a un dispositivo de medición (PreSens GmbH, Ratisbona, Alemania). Todo el equipamiento se calibró periódicamente de acuerdo con las instrucciones de los fabricantes. La metodología consistió en incorporar oxígeno al vino modelo hasta alcanzar unos valores de 3 mg/L de oxígeno disuelto ($p_{O_2} = 63,33$ hPa en referencia agua), valores que pueden alcanzarse con cierta facilidad durante las diferentes operaciones que sufre el vino en su proceso de elaboración. A continuación, se borboteó N₂ a un caudal de 250 mL/minuto hasta alcanzar un contenido en oxígeno 0,3 mg/L ($p_{O_2} > 6,33$ hPa en referencia agua) momento en que cesó el borboteo. Se utilizó un difusor con una superficie de contacto sobre el vino de 11,9 cm², por tanto, la relación superficie de contacto por L de vino fue de 4,75 cm²/L.

7.3.1.- Optimización del caudal de N₂ para la retirada de oxígeno del vino y la utilización de otros gases

Una vez probadas estas condiciones con 2,5 L de vino modelo se vio que se generaba un ambiente muy turbulento para el vino, en cuanto al tamaño de burbuja y cantidad de espuma que se formaba. Por tanto, se ensayaron diferentes caudales de incorporación de N₂, inferiores al propuesto inicialmente, con el objetivo de obtener los resultados más adecuados en cuanto al volumen de N₂ y tiempos necesarios para retirar el oxígeno del vino. De este modo, se estableció que el caudal más idóneo para retirar el oxígeno disuelto en la columna de vino modelo era de 30 mL/min. Comparando los caudales de 250 y 30 mL/min se observó que, aunque fue necesario emplear más tiempo, el caudal de 30 mL/min permitió reducir el volumen de N₂ por litro de vino (Lgas/Lvino) necesario para desoxigenar el vino (Tabla 7.1).

Tabla 7.1. Comparativa en gasto de N₂ utilizando diferentes caudales

Caudal	Vol. gastado N ₂ (L)	Lgas/Lvino	Tiempo (min)
250	0,310	0,12	1,25
30	0,25	0,10	7,64

A continuación, se evaluó la eficacia de otros gases de inertizado como el CO₂ y Ar con el mismo volumen de vino modelo y en las mismas condiciones de temperatura y caudal de gas incorporado. En la Figura 7.2 se muestra la cinética de retirada de oxígeno en el vino modelo con cada uno de los gases utilizados y el volumen que fue necesario aplicar para cada litro de vino en cada ensayo. Como se puede observar, el gas más efectivo para retirar el oxígeno del vino modelo, hasta unos valores de 0,3 mg/L ($p_{O_2} = 6,3$ hPa), fue el N₂. La eficacia del Ar fue muy similar a la del N₂ y, en cambio, el CO₂ fue el que peores resultados mostró debido a

que fue necesario incorporar este gas durante más tiempo y, por tanto, supuso un mayor gasto en volumen para conseguir retirar el oxígeno del vino. El N_2 es el gas menos denso de los 3 lo cual puede explicar la mayor eficacia a la hora de desplazar el oxígeno fuera del vino. En cambio, el Ar y el CO_2 son gases más densos y forman unas burbujas de mayor tamaño que el N_2 y, por tanto, no consiguen desplazar el oxígeno del vino de manera tan rápida. Además, el CO_2 tiene la peculiaridad de ser altamente soluble en el vino siendo este otro factor que puede afectar a su eficacia a la hora de desplazar el oxígeno.

Dado que la gran mayoría de las bodegas disponen de generadores de N_2 , lo más recomendable desde el punto de vista eficacia-coste económico es la utilización de este gas para la retirada de oxígeno en el vino.

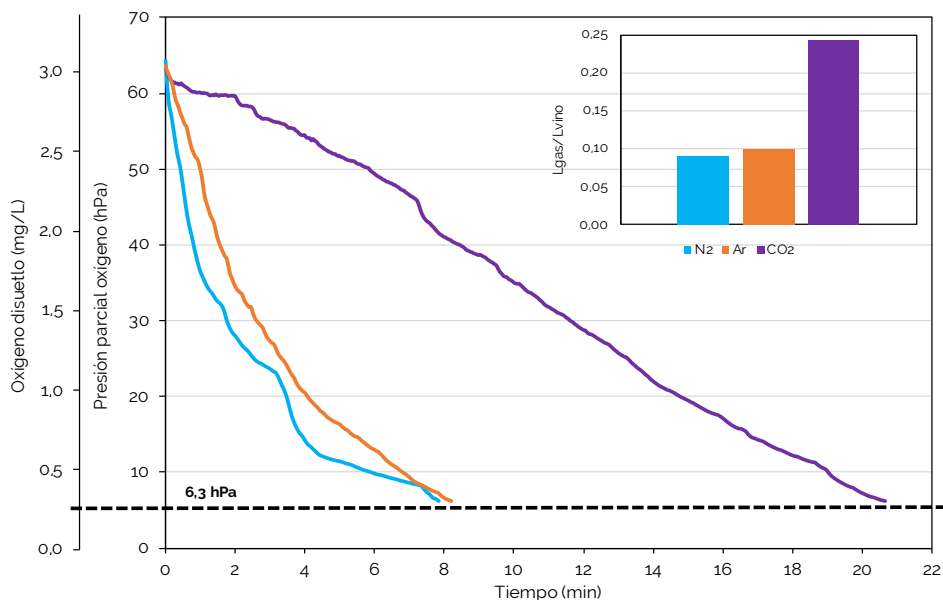


Fig. 7.2.- Evolución de la retirada de oxígeno en el vino modelo con cada uno de los gases utilizados y el volumen que fue necesario aplicar por cada litro de vino en cada ensayo

7.3.2.- Escalado en el uso de N_2 para la retirada de oxígeno en vino modelo

Una vez optimizado el caudal en el tubo de 2,5 L, y probado que el N_2 era el gas que mejores resultados aportaba, se realizaron pruebas de escalado en mayores volúmenes de vino modelo (40, 100, 500, 1000 y 1800 L) utilizando N_2 en las mismas condiciones de temperatura. El caudal de trabajo fue ajustado proporcionalmente al volumen de vino con el que se trabajó. Además, se utilizaron difusores de diferente tamaño en función del volumen de vino (ver *Tabla 7.2*). La *Figura 7.3* muestra la cantidad de N_2 que fue necesaria incorporar por cada litro de vino modelo, así como el volumen total de N_2 . Como era de esperar, a mayor volumen de vino mayor fue la cantidad total de N_2 a incorporar para poder retirar el oxígeno dejando valores de 0,3 mg/L. En cambio, observando el índice L_{gas}/L_{vino} se vio que, en función del volumen de vino al que se desea retirar el oxígeno, la cantidad de N_2 a incorporar oscilaba entre 0,09 L y 0,23 L por cada litro de vino modelo. En general, se vio que el volumen más bajo de gas a utilizar fue para 2,5 L. En cambio, para el resto de los volúmenes el índice L_{gas}/L_{vino} a aplicar era similar.

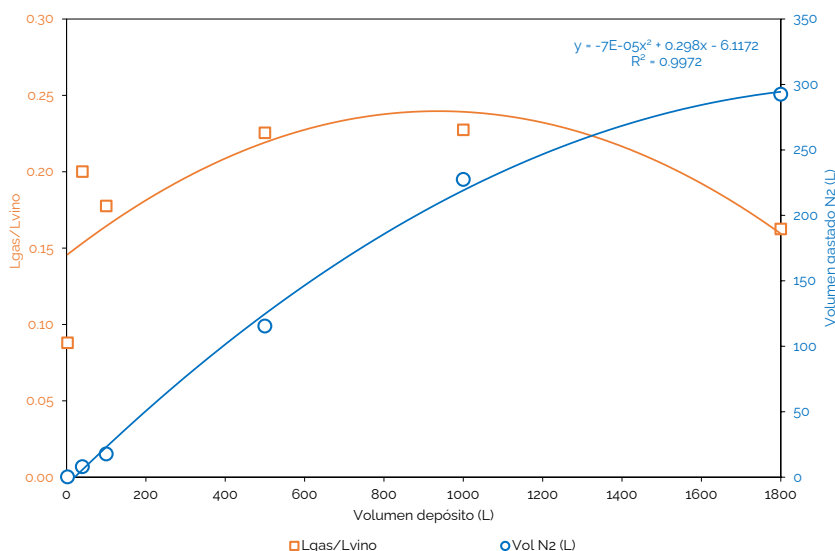


Fig. 7.3.- Variación de la cantidad de N_2 necesaria por cada litro de vino modelo, y el volumen total de N_2

Tabla 7.2. Comparativa en gasto de N_2 utilizando diferentes difusores

Vol depósito (L)	Superficie difusora (cm ²)	Caudal (L/min)	Ratio S_{porosa}/L_{vino}
2,5	11,9	0,03	4,75
40	24,5	0,48	0,61
100	25,9	1,2	0,12
500	58,1	6	0,12
1000	268,8	12	0,27
1800	268,8	21,6	0,15

7.4.- Experiencias de retirada de oxígeno en vino blanco y tinto

Una vez realizadas las experiencias en vino modelo se procedió a realizar las pruebas de retirada de oxígeno en vino real. Para ello se utilizó un vino blanco y un vino tinto de la variedad Verdejo y Tempranillo respectivamente (control). El vino blanco tenía un grado alcohólico de 12,98%, un pH de 3,29, acidez total de 5,1 g/L, $SO_2L < 6$ mg/L y SO_2T de 113 mg/L. El vino tinto un grado alcohólico de 13,70%, pH 3,77, acidez total de 5,5 g/L, $SO_2L < 6$ mg/L y SO_2T de 83 mg/L. Igual que en el caso del vino modelo, a ambos vinos se les realizó una incorporación de oxígeno hasta los 3 mg/L denominado "saturado" para, a continuación, proceder a su retirada aplicando diferentes gases de inertizado (N_2 , CO_2 y Ar) hasta alcanzar los 0,3 mg/L a un caudal de 30 mL/min.

Todos los ensayos se realizaron por duplicado en un tubo de plexiglás, con volumen de 2,5L de vino que formaba una columna de 1,5m y tenía un diámetro de 5cm.

La Figura 7.4 muestra los resultados obtenidos en cuanto al tiempo necesario para retirar el oxígeno en el vino blanco y en el vino tinto, así como el gasto de cada gas por cada litro de vino. Los resultados de desoxigenado obtenidos en ambos vinos fueron muy parecidos, siendo estos a su vez muy parecidos a los obtenidos y descritos anteriormente en vino modelo. El N_2 fue el gas más efectivo y el CO_2 el que peores resultados mostró.

Los pocos estudios científicos encontrados al respecto en vino real indican que el borboteo de un gas de inertizado para retirar el oxígeno de un vino no afecta significativamente a la composición fisicoquímica de dicho vino⁶. Dado que al borbotear gas de inertizado suele haber una pérdida o evaporación de alcohol del vino cabe la posibilidad de que realmente sí que se esté

produciendo una modificación de otros compuestos que influyen en las características colorimétricas y gustativas del vino. Por este motivo, se analizaron los parámetros enológicos clásicos, el color y el índice de polifenoles totales (IPT) de los vinos resultantes de los experimentos realizados (Tabla 7.3).

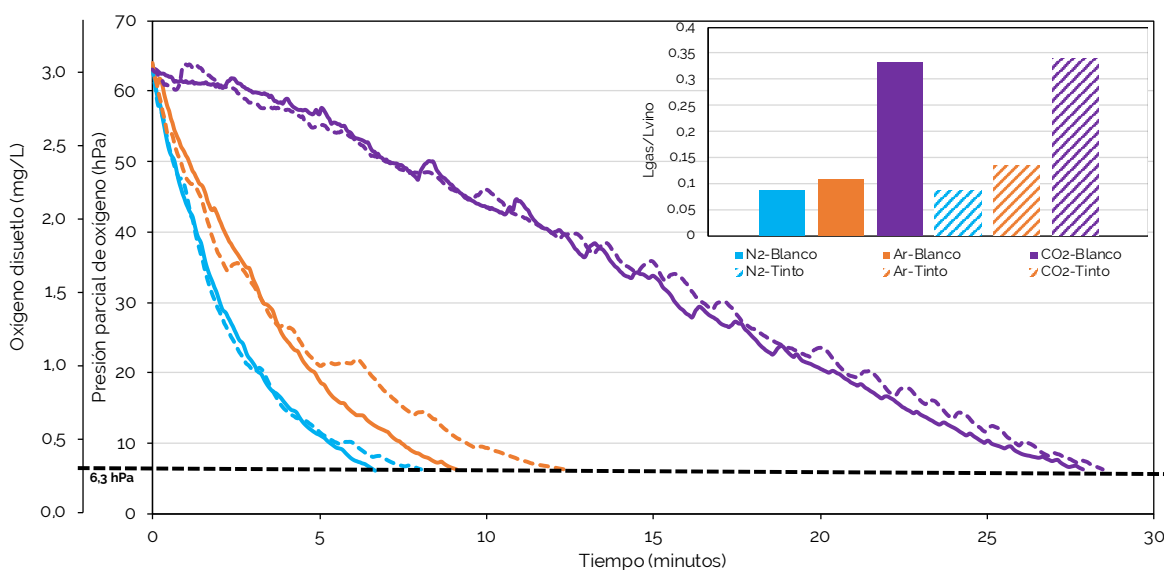


Fig. 7.4.- Evolución de la retirada de oxígeno en el vino modelo con cada uno de los gases utilizados y el volumen que fue necesario aplicar por cada litro de vino blanco o tinto en cada ensayo

Tabla 7.3. Comparativa de los parámetros enológicos, el color y el índice de polifenoles totales en los vinos con los diferentes tratamientos de desoxigenación

Parámetro	Vino blanco					Vino tinto				
	Control	Saturado	N ₂	CO ₂	Ar	Control	Saturado	N ₂	CO ₂	Ar
Grado alcohólico (% vol)	12,98 ± 0,00	12,93 ± 0,00	12,99 ± 0,01	12,95 ± 0,04	12,91 ± 0,01	13,69 ± 0,00	13,56 ± 0,00	13,40 ± 0,04	13,63 ± 0,01	13,57 ± 0,16
Acidez Total (g/L)	5,1 ± 0,0	5,1 ± 0,0	5,1 ± 0,0	5,2 ± 0,1	5,1 ± 0,0	5,5 ± 0,0	5,5 ± 0,0	5,4 ± 0,0	5,6 ± 0,1	5,5 ± 0,0
pH	3,29 ± 0,00	3,29 ± 0,00	3,28 ± 0,00	3,29 ± 0,01	3,29 ± 0,01	3,77 ± 0,0	3,76 ± 0,0	3,77 ± 0,01	3,76 ± 0,01	3,78 ± 0,01
Sulfuroso Libre (mg/L)	<6	<6	<6	<6	<6	<6	<6	<6	<6	<6
Sulfuroso Total (mg/L)	113 ± 0	117 ± 0	111 ± 1	113 ± 2	110 ± 0	83 ± 0	92 ± 0	86 ± 1	88 ± 1	81 ± 0

Parámetro	Vino blanco					Vino tinto				
	Control	Saturado	N ₂	CO ₂	Ar	Control	Saturado	N ₂	CO ₂	Ar
Metanol (mg/L)	67 ± 0	74 ± 0	70 ± 3	63 ± 3	70 ± 1	193 ± 0	189 ± 0	187 ± 1	183 ± 12	186 ± 6
1-Propanol (mg/L)	46 ± 0	46 ± 0	46 ± 1	47 ± 1	46 ± 0	30 ± 0	30 ± 0	30 ± 1	31 ± 1	30 ± 1
Isobutanol (mg/L)	15 ± 0	16 ± 0	16 ± 1	16 ± 1	15 ± 0	60 ± 0	63 ± 0	60 ± 0	64 ± 2	60 ± 3
2-Metil-1-Bu-tanol (mg/L)	20 ± 0	20 ± 0	21 ± 1	20 ± 1	21 ± 1	49 ± 0	48 ± 0	48 ± 0	50 ± 2	49 ± 2
3-Metil-1-Bu-tanol (mg/L)	125 ± 0	128 ± 0	126 ± 1	126 ± 4	127 ± 1	208 ± 0	199 ± 0	202 ± 2	206 ± 6	207 ± 10
Alcoholes Superiores (mg/L)	206 ± 0	210 ± 0	208 ± 4	208 ± 7	208 ± 1	347 ± 0	340 ± 0	339 ± 3	349 ± 10	345 ± 16
Índice de polifenoles totales	4 ± 0,03	4 ± 0,16	4 ± 0,03	4 ± 0,04	4 ± 0,04	62 ± 0,34	61 ± 0,62	58 ± 0,93	61 ± 1,02	54 ± 1,02
Intensidad colorante (420+520+620)	0,121 ± 0,000	0,113 ± 0,000	0,113 ± 0,002	0,115 ± 0,005	0,118 ± 0,000	16,0 ± 0,04	14,7 ± 0,02	14,3 ± 0,28	14,0 ± 0,14	14,2 ± 0,04
Tonalidad (420/520)						0,761 ± 0,002	0,746 ± 0,002	0,739 ± 0,004	0,736 ± 0,004	0,734 ± 0,002

En el caso de los vinos blancos se vieron ciertas diferencias en algunos de los parámetros analizados, así, el vino control fue el de mayor intensidad de color (IC) y los vinos saturado y tratado con N₂ los que menos. La *Figura 7.5a* muestra el promedio del barrido espectral realizado al vino blanco sometido a las distintas condiciones observándose que, tanto en el caso del vino blanco como en el caso del vino tinto, la saturación con aire provocó la pérdida de absorbancia, más acusada en el caso de los vinos tintos. El barrido espectral se realizó entre las longitudes de onda de 330 nm y los 700 nm con un espectrofotómetro Perkin Elmer LAMBDA 25 UV/vis. Por otro lado, el vino blanco tratado con CO₂ presentó mayor valor de acidez total que el resto de los vinos, debido a la posible disolución del CO₂, lo que puede tener cierta incidencia en la percepción sensorial de dicho vino.

En el caso de los vinos tintos, aquellos desoxigenados con N₂ y Ar presentaron un menor contenido en IPT que el resto de los vinos. Además, los vinos desoxigenados con los 3 gases de inertizado tenían menor intensidad colorante y tonalidad que el vino control y el saturado. La *Figura 7.5b* muestra el barrido espectral realizado a los vinos tintos, observándose que tanto el vino saturado como los tratados con los diferentes gases de inertizado tenían un espectro de absorbancia más bajo que el vino control. Por lo tanto, tanto la dosificación de oxígeno (saturación) como los tratamientos posteriores con gases de inertizado tienen una cierta influencia en el espectro de los vinos, reduciendo la absorbancia que refleja la pérdida de los compuestos responsables, posiblemente debido a la oxidación inicial y posterior pérdida por polimerización y precipitación.

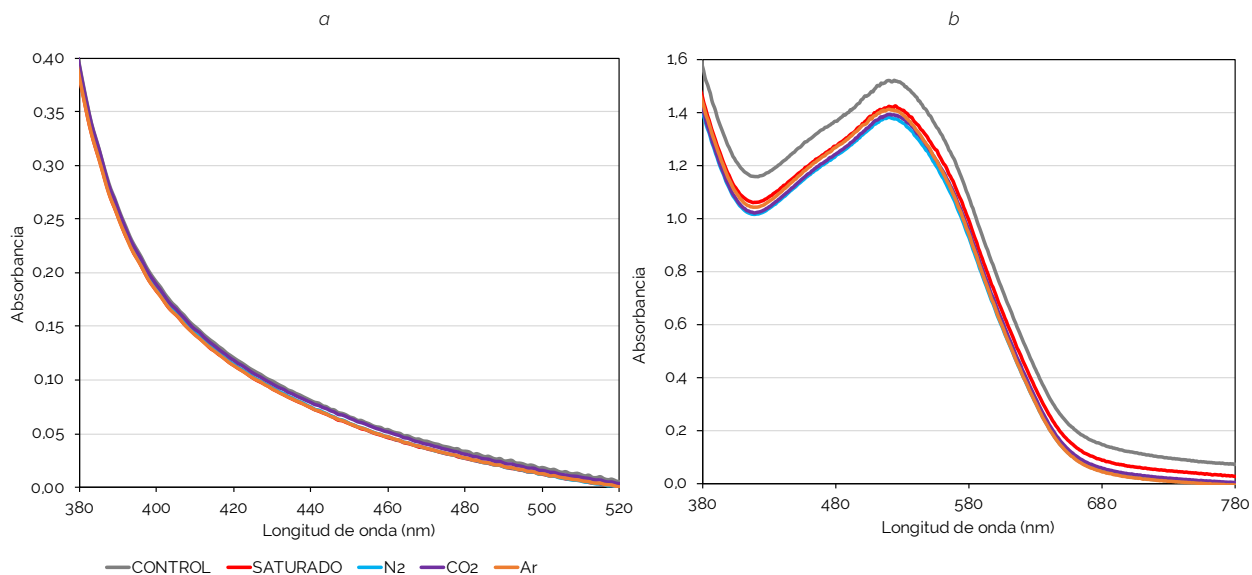


Fig. 7.5.- Barrido espectral realizado a los vinos a) blancos y b) tintos tras ser borboteados con los diferentes gases de inertizado ensayados

7.5.- Conclusiones

El N_2 resultó ser el gas más efectivo para desoxygenar el vino modelo frente a otros gases de inertizado, como el CO_2 y el Ar.

La optimización del caudal de N_2 para desoxygenar el vino modelo permitió reducir el volumen de gas necesario por litro de vino, aunque el tiempo invertido fuera mayor.

El escalado del sparging en vino modelo hasta un volumen de 1800L permitió establecer un índice (L_{gas}/L_{vino}) que oscila entre los 0,09 y 0,23 L de gas por litro de vino, en función del volumen de vino a desoxygenar.

Los ensayos realizados en vino blanco y vino tinto mostraron resultados similares a los obtenidos en vino modelo, siendo el N_2 el gas más efectivo y el CO_2 el que peores resultados mostró.

El uso de gases de inertizado para la retirada del oxígeno disuelto en vinos tuvo un efecto sobre la composición físico química de los vinos. El vino oxigenado (saturado) y el posterior desoxygenado con los gases de inertizado tuvo una influencia en el espectro de los vinos, principalmente en los vinos tintos, disminuyendo su absorbancia.

7.6.- Referencias

1. Coetzee, C.; du Toit, W.J. A comprehensive review on Sauvignon Blanc aroma with a focus on certain positive volatile thiols. *Food Res. Int.* 2012, 45, 287-298.
2. Steiner, T. *Wines & Vines - Strategies to Manage Dissolved Oxygen*. 2013. <https://winesvinesanalytics.com/features/article/119752/Strategies-to-ManageDissolved-Oxygen> (consultado en mayo de 2023).
3. Cant, R.R. The Effect of Nitrogen and Carbon Dioxide Treatment of Wines on Dissolved Oxygen Levels. *Am. J. Enol. Vitic.* 1960, 11, 164-169.
4. Vidal, J.C.; Moutounet, M. Control of the Oxygen Supply During the Conditioning Part 1: Principles And Wine Preparation. *Rev. Fr. Oenol.* 2008, 229.
5. Hidalgo Togados, J. Empleo de gases inertes. En *Tratado de enología*, 2a ed.; Mundiprensa, Ed.; Madrid, Spain, 2011; Vol. 2, pp 1267-1286. ISBN 9788484767527
6. Walls, J., Sutton, S., Coetzee, C. and du Toit, W.J. Sparging of white wine. *Australian J. Grape Wine Res.* 2022, 28, 450-458.
7. Nitrogen Gas Sparging. 2014. <https://www.southteksystems.com/es/nitrogen-gas-sparging/>
8. Girardon, P. Gases in Enology. In *Gases in Agro-Food Processes*, 1st ed.; Cachon, R., Girardon, P., Voilley, A., Eds.; Academic Press: London, UK, 2019; pp. 433-449. ISBN 9780128124659.
9. Farkaš, J. *Biotechnológia vína*. 1983, ALFA Bratislava. p 984.
10. Grainger, K.; Tattersall, H. *Wine Production: Vine to Bottle*. Blackwell Publishing Ltd Ed.; Oxford, UK, 2005. ISBN 978-14051-1365-6
11. Jung, R. Impact of oxygen level in wine at bottling. *Practical Wine Vine J.* 2009.
12. Bálaš, V.; Furman, D.; Timár, P.; Ševčík, M. Oxygen Removal from the White Wine in Winery. *Acta Chim. Pharm. Indica*, 2017, 7, 107
13. Besagni, G.; Gallazzini, L.; Inzoli, F. On the scale-up criteria for bubble columns. *Petroleum*, 2019, 5(2), 114-122.
14. Sutton, S.; Pott, R. W. M.; Du Toit, W. Desorption of oxygen from wine and model wine solutions in a bubble column. *Chem. Eng. Sci.* 2022, 255, 117648.
15. Butler, I.B.; Schoonen, M. A. A.; Rickard, D.T. Removal of dissolved oxygen from water: A comparison of four common techniques. *Talanta*. 1994, 41(2), 211-215.
16. Schenk, W.; Bach, H.P.; Nobis, P. Ein Versuch zur Prüfung verschiedener Gasüberlagerungs-Methoden in Wein-Anbruchgebunden. *Zeitschrift für Weinbau und Kellerwirtschaft*. 1977, 24(2), 65-81.
17. Sutton, S. Evaluating the desorption of oxygen from wine. Thesis presented for the degree of Master of Agricultural Sciences. Stellenbosch University. 2022.
18. Nordestgaard, S. Gains in speed, labour and gas consumption for winemakers. *Australian New Zealand Grape Wine*. 2018, 648, 61-67.
19. Vidal, J.C.; Vidal, V.M.; Waidelich G. Exact Management of Dissolved Gases of Wines by Membrane Contactor. *Bulletin de l'OIV*, 2011, 962-963-964(84), 179-187.
20. Blank, A.; Vidal J.C. Utilisation d'un contacteur membranaire pour la gestion exacte des gaz dissous. *Revue Française d'œnologie*, 2013, 261, 7-12.
21. Waidelich, G.; Vidal, J.C. Eight years of experiences in gas management in wine with membrane contactors. *Mempro 5*, Apr 2014, Toulouse, France. 2014.



Capítulo 8

Persistencia de la cobertura con gas de inertizado durante el almacenamiento de vinos

María Asensio Cuadrado
Grupo UVaMOX- Universidad de Valladolid



8.1. Introducción

8.2. Estudio de la persistencia del inertizado de depósitos

8.2.1 Forma de aplicación del gas de inertizado

8.2.2 Optimización del volumen de gas de inertizado empleado

8.2.3 La persistencia a medio plazo

8.2.4 Tratamiento del espacio vacío con SO₂

8.3. Conclusiones

8.4. Referencias

8.1.- Introducción

El manejo de vino en bodega hace que se produzcan situaciones en las que el vino de un depósito quede desprotegido, por ejemplo, durante el trasiego de parte del vino del depósito hacia otro depósito o en una operación de embotellado con interrupciones de varias horas o incluso días, situaciones en las que los depósitos se quedan incompletos dejando un espacio de aire ¹ por encima del vino (espacio de cabeza). En esta situación el vino que queda en el depósito incompleto está desprotegido, y para evitar esta situación es recomendable utilizar algún tipo de protección del vino, siendo habitual la sustitución del aire del espacio vacío del depósito por un gas de inertizado que impida que el oxígeno se incorpore al vino, evitando así el crecimiento microbiano aeróbico y la oxidación del vino ².

Hace más de 40 años, en 1981, Peynaud ¹ afirmó que un vino conservado en recipientes incompletos que está en contacto con el aire recibe el oxígeno que entra en disolución por la superficie y se difunde en la masa. La cantidad de oxígeno que se disuelve en el vino en una hora y en una superficie de 100 cm² es de 1.5 mL/L, y en cuatro horas toda la superficie del vino estará saturada de oxígeno ². **Por ello, el enólogo debe establecer un límite aceptable de oxígeno para el mantenimiento de su vino,**

ya que de forma simplificada podemos asumir que 1 mg/L de O₂ disuelto en el vino puede llegar a consumir 4 mg/L de SO₂, siendo recomendable mantener la concentración de oxígeno en el espacio de cabeza por debajo del 0,5% ².

La inertización o purgado del volumen de aire que se encuentra por encima del vino en el depósito puede realizarse de tres formas: por desplazamiento, por dilución y por cambio de presión (más información en el [Capítulo 3](#)). En enología se ha visto que el método más utilizado y en el que menos gas de inertizado se necesita, es el inertizado por desplazamiento. El gas de inertizado que se introduce desplaza al gas existente en la cámara o espacio que se está purgando, y el volumen de gas que se necesita idealmente es el volumen de la cámara que se quiere inertizar. En el caso de un depósito incompleto en el que se quiere realizar el inertizado se puede proceder de dos maneras sin necesidad de realizar modificaciones en el depósito. La primera sería introducir el gas de inertizado mediante algún racor o válvula presente en la tapa para conectar el suministro del gas (*Figura 8.1a*), y la segunda sería pasar el gas de inertizado por un tubo hasta la superficie del vino (*Figura 8.1b*). Los gases de inertizado más utilizados en la industria del vino son el

N_2 , Ar y CO_2 , ya que tienen poca o ninguna reactividad con el vino, y pueden ser usados individualmente o como una mezcla en proporciones variables ¹. Si se piensa que estos gases y sus mezclas (excepto el N_2) son más pesados que el aire a evacuar (Capítulo 3), la incorporación del gas de inertizado justo al nivel del vino, sobre la superficie del vino, parece que puede ser más efectiva (Figura 8.1b). También es necesario tener en cuenta que, si el gas de inertizado incorporado tiene mayor densidad que el gas a desplazar, es posible que el espacio de cabeza por encima del punto de inyección no quede inertizado ¹.

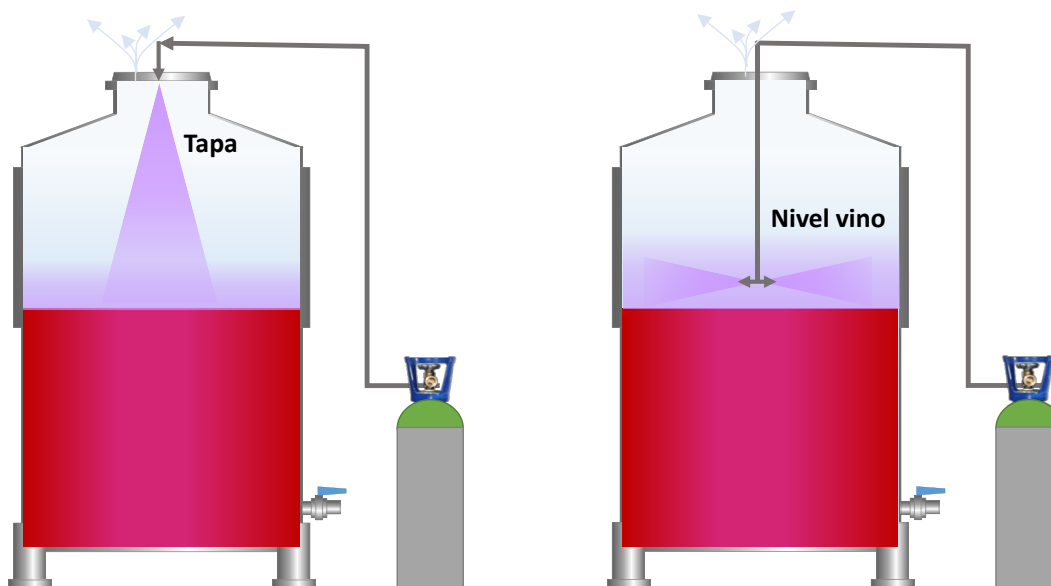


Fig. 8.1. Incorporación de un gas de inertizado en un depósito incompleto por: a) la tapa superior o b) al nivel de la superficie del vino

8.2.- Estudio de la persistencia del inertizado de depósitos

Se realizaron distintas pruebas con el objetivo de determinar qué gases de inertizado de uso en enología son los más efectivos para la protección, frente a la incorporación del oxígeno atmosférico con el tiempo, del vino que está en un depósito incompleto. Las pruebas experimentales fueron llevadas a cabo en las instalaciones de la Universidad de Valladolid, Campus La Yutera, simultáneamente por duplicado en dos depósitos de 1.100 litros de volumen con 550 litros de mezcla hidroalcohólica al 12,5% V/V de grado alcohólico, y pH=3,5, al que a partir de ahora se llamará vino modelo debido a que presenta características similares al vino, pero que no consume oxígeno, lo que permite medir la acumulación del oxígeno que se incorpora en diferentes situaciones.

Antes de comenzar cada prueba, este vino modelo fue desoxigenado mediante borboteo con N_2 , por ser el gas que mejores resultados da para esta finalidad (Capítulo 7). Las condiciones de desgasificación fueron de 6 L/min de N_2 (1 atm. y 15°C) durante 3 horas. Para evitar interferencias de desgasificación del N_2 , el vino modelo desoxigenado se dejó reposar durante 30 minutos y el gas del espacio vacío del depósito se reemplazó con aire atmosférico mediante soplado para simular una situación real.

Los cinco gases de inertizado estudiados fueron N_2 , CO_2 , Ar, Ar- CO_2 (80:20) y N_2 - CO_2 (80:20) suministrados por Carburos Metálicos, S.A.

8.2.1.- Forma de aplicación del gas de inertizado

La aplicación del gas de inertizado en el espacio de cabeza del depósito parcialmente vacío se realizó de las dos formas diferentes descritas anteriormente. Una vez reposado el vino modelo de los dos depósitos, se procedió a introducir el gas de inertizado elegido para cada experimento. Para inertizar todo el espacio de cabeza disponible se introdujeron 550 litros (condiciones normales a 1 atm. y 15°C) de gas en cada depósito por una válvula de conexión rápida de gas situada en la tapadera (Figura 8.2). La incorporación de ese mismo volumen de gas se realizó justo por encima de la superficie del vino, para ello se empleó un tubo colocado desde la conexión rápida de la tapadera hasta una te final que incorporaba el gas paralelamente a la superficie del vino (Figura 8.1).

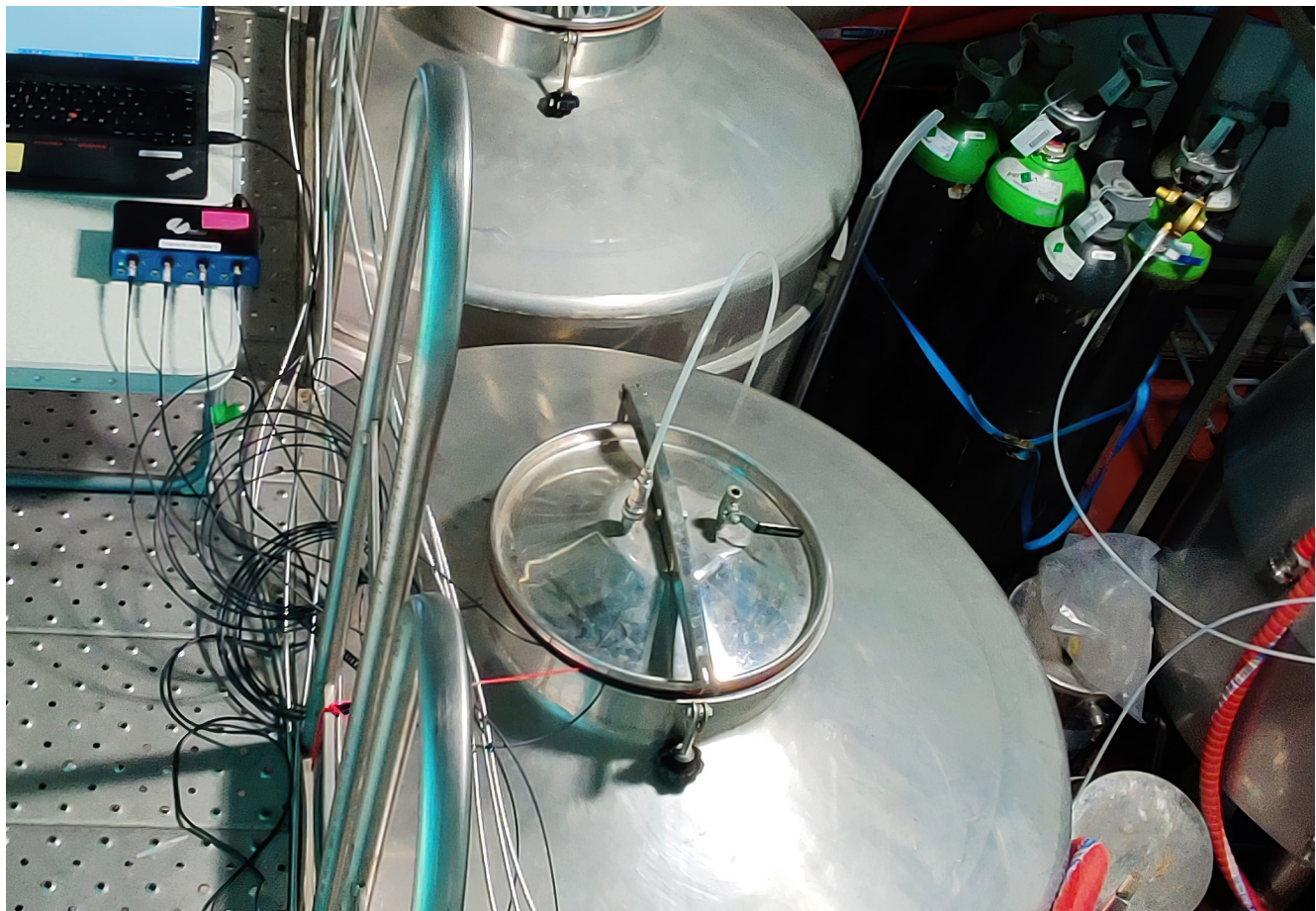


Fig. 8.2. Vista de los depósitos con cobertura de inertizado para el análisis de la persistencia del inertizado, en detalle se puede observar la inyección del gas por la tapa

Se analizó la modificación de la composición del gas del espacio de cabeza, es decir, se evaluó la persistencia del gas de inertizado incorporado durante un periodo de 50 horas, por ser el tiempo correspondiente a un fin de semana (dos días). Además, también se evaluó otra situación dejando el mismo volumen de vino modelo desgasificado, pero en este caso el espacio vacío del depósito se dejó con aire, sin el uso de un gas de inertizado. Las medidas en el vino indicaron que tras dos días, cuando se dejaba aire en el espacio de cabeza, se incorporaban 39,8 hPa (1,916 mg/L; expresada en agua a 15°C y 965 hPa) de oxígeno disuelto. En todos los ensayos con el uso de gases de inertizado se minimizó enormemente la incorporación de O₂ al vino, que en el peor de los casos alcanzó 17,5 hPa (0,84 mg/L).

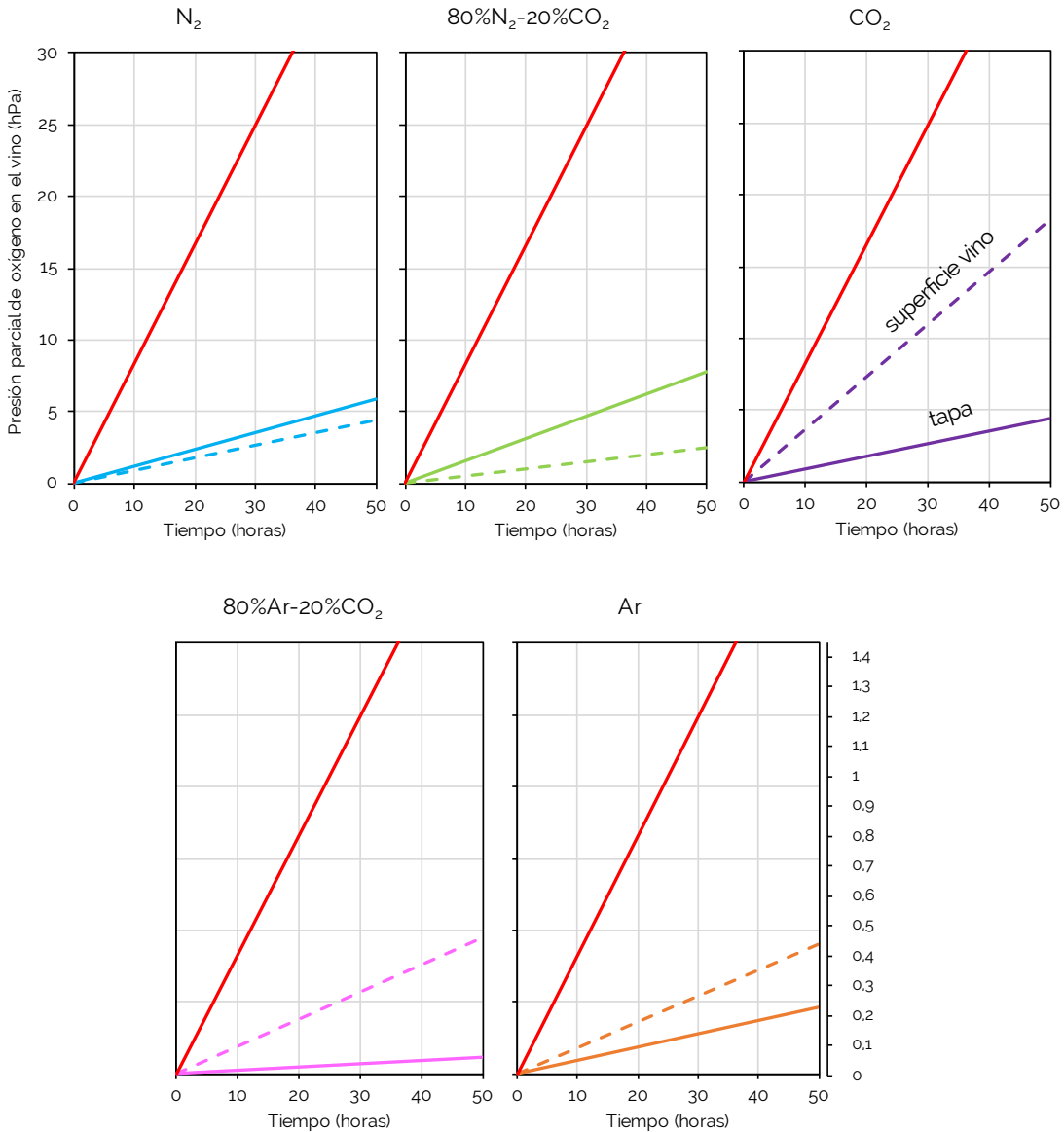


Fig. 8.3. Comparación de la persistencia en la protección al O_2 atmosférico de diferentes gases de inertizado con el aire (línea roja). Línea continua es la incorporación por la tapa y la línea discontinua a nivel de la superficie del vino

Comparando la forma de incorporación del gas de inertizado, se puede observar cómo, por lo general, es más efectivo aplicar los gases más densos paralelamente a la superficie del vino, a excepción del $N_2:CO_2$, que es más efectivo hacerlo por la tapa (Figura 8.3). En cuanto al N_2 no se aprecian diferencias importantes en la incorporación del gas por la tapa o por encima de la superficie del vino, resultado esperable de acuerdo con el tipo de inertización que realiza el nitrógeno, inertización por dilución. Como punto a favor estaría que en ambos casos el N_2 presenta un nivel de persistencia de la cobertura de inertizado suficiente para garantizar que se incorporen menos de 0,25 mg/L de oxígeno al vino.

En las pruebas realizadas de ambas formas, se observa que el gas que presenta más persistencia en la protección frente al O_2 atmosférico fue la mezcla Ar- CO_2 , siendo el CO_2 el que peores resultados ofreció. Este resultado está muy lejos de lo que se podría esperar atendiendo a la densidad del CO_2 , ya que actúa por desplazamiento (*Figura 8.3*), y podría justificarse por su alta solubilidad. Así, la desaparición progresiva de la cobertura de CO_2 disminuiría su capacidad de barrera frente al oxígeno atmosférico. Se realizaron medidas de la acidez y el pH en la superficie del vino antes y tras los dos días de la formación de la capa de CO_2 , pero no se apreciaron variaciones significativas.

8.2.2.- Forma de aplicación del gas de inertizado

Atendiendo a los resultados descritos anteriormente que mostraron que, para la mayoría de los gases estudiados, la mayor persistencia de la cobertura del gas de inertizado con el tiempo se producía cuando el gas era introducido por la tapa, se procedió a optimizar el método reduciendo el volumen de gas de inertizado a la mitad del volumen vacío del depósito. Así, una vez acondicionado y sin oxígeno disuelto el volumen de vino modelo (la mitad del depósito), se procedió a introducir por la válvula de la tapa el volumen del gas de inertizado elegido para cada experimento, teniendo en cuenta en el caudalímetro el factor de corrección volumétrico de cada gas. Para inertizar la mitad del espacio vacío, se introdujeron en esta ocasión 255 litros de gas en cada depósito en condiciones normales (1 atm, y $15^\circ C$, a un caudal de $1\text{ m}^3/h$ medido con un caudalímetro) por una válvula con un conector rápido en la tapa (*Figura 8.2*).

Comparando si es mejor introducir el volumen total de gas de inertizado o la mitad del volumen vacío del depósito (*Figura 8.4*), se observa cómo en todos los casos con la mitad no se mantiene el nivel de protección por lo que siempre es mejor utilizar el volumen completo que medio volumen (*Figura 8.5*).

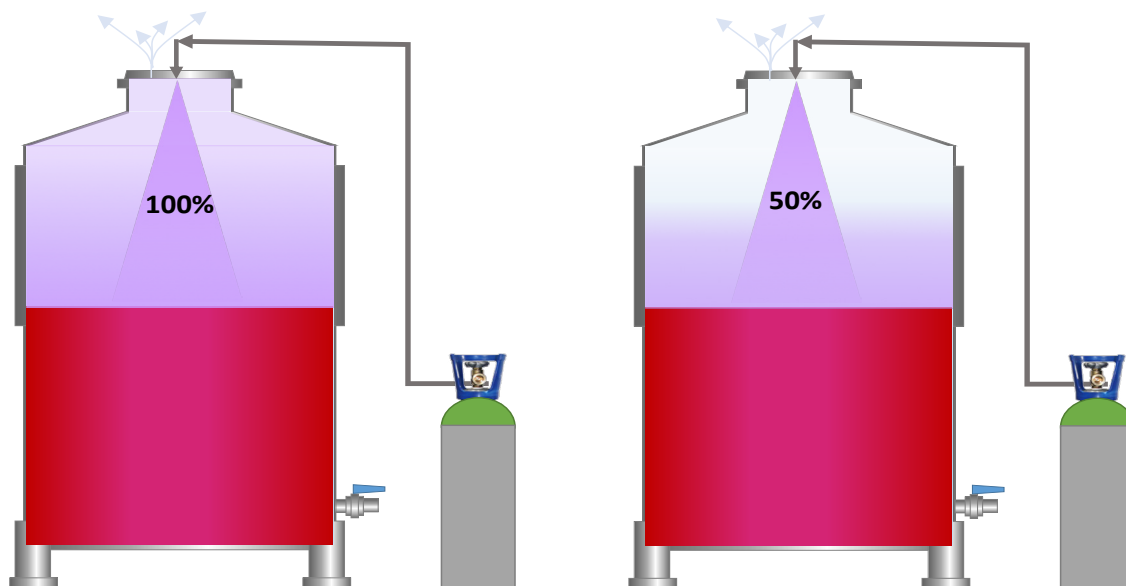


Fig. 8.4. Incorporación del volumen total de gas de inertizado o la mitad del volumen vacío del depósito

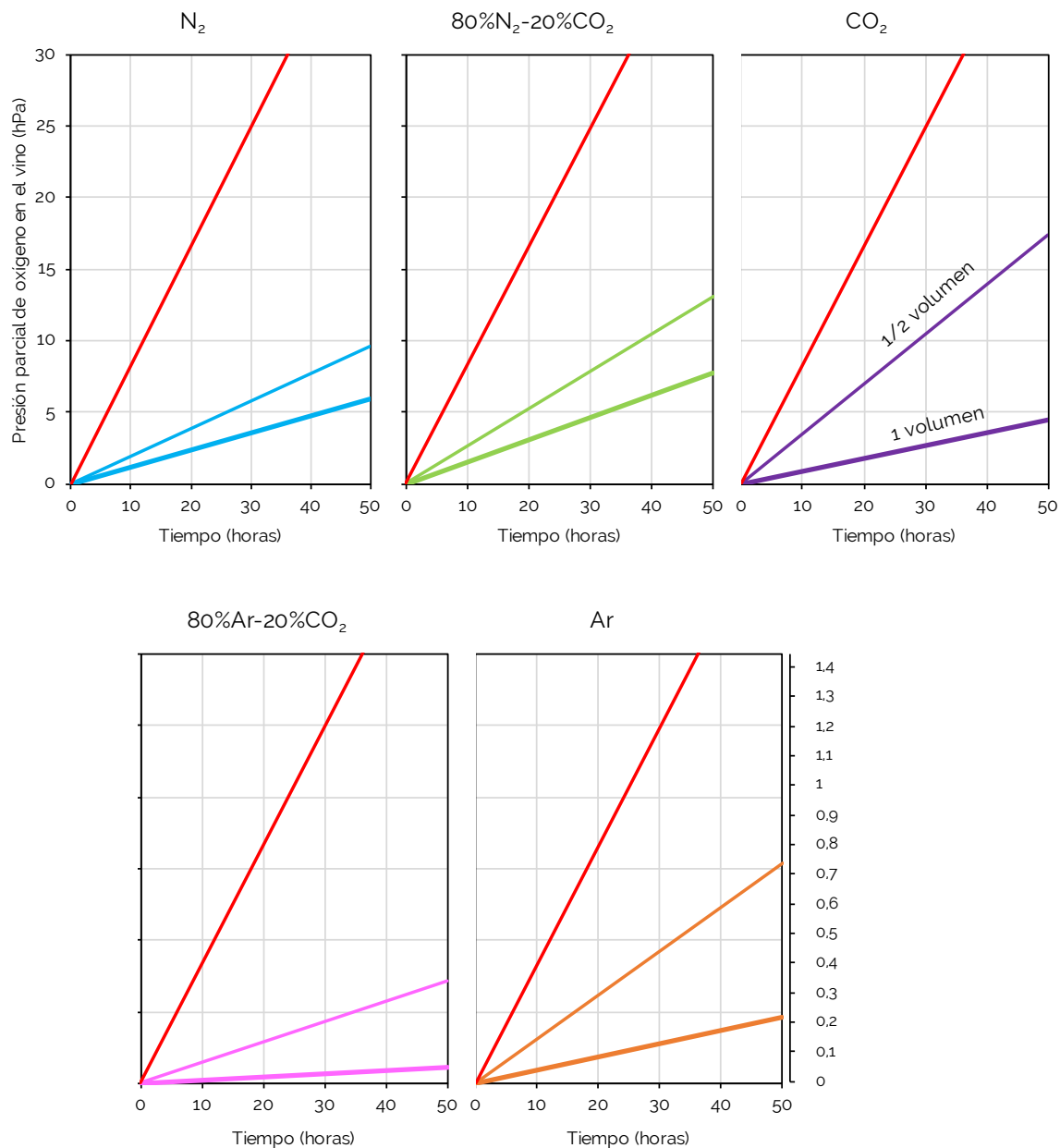


Fig. 8.5. Comparación de la persistencia en la protección al O₂ atmosférico de diferentes gases de inertizado con el aire (línea roja). Línea fina es la incorporación de un volumen de gas del 50% del volumen vacío del depósito y la línea gruesa de un volumen de gas similar al volumen vacío del depósito

8.2.3.- La persistencia a medio plazo

La práctica habitual en la mayoría de las bodegas es llenar completamente de vino los depósitos evitando dejar espacio vacío, pero en algunas ocasiones es necesario o práctico seguir utilizando el depósito origen/inicial por tratarse de una operación de varios días que no se ha terminado. Como se ha visto en

apartados anteriores esta situación implica la incorporación del oxígeno atmosférico en el vino de forma apreciable, incorporación que ocasiona modificaciones en el vino, oxidación, combinación del sulfuroso libre del vino reduciendo su protección...

Como se ha descrito anteriormente, cuando se usan gases de inertizado en el espacio vacío se consigue minimizar enormemente la disolución del oxígeno en el vino, que aunque sigue produciéndose una incorporación constante de oxígeno durante los dos días siguientes a la inertización, se observa una reducción desde 1,916 mg/L (cuando no se emplean gases de inertizado) a 0,055 mg/L (1,145 hPa = 0,055 mg/L; agua a 15°C y 965 hPa) con la mezcla Ar:CO₂. Con el ánimo de comprobar la capacidad de minimizar la disolución del oxígeno atmosférico durante más tiempo, se prolongaron las medidas en los dos depósitos durante una semana empleando el mismo volumen del gas que mejores resultados dio, que el espacio vacío en el depósito (Figura 8.5).

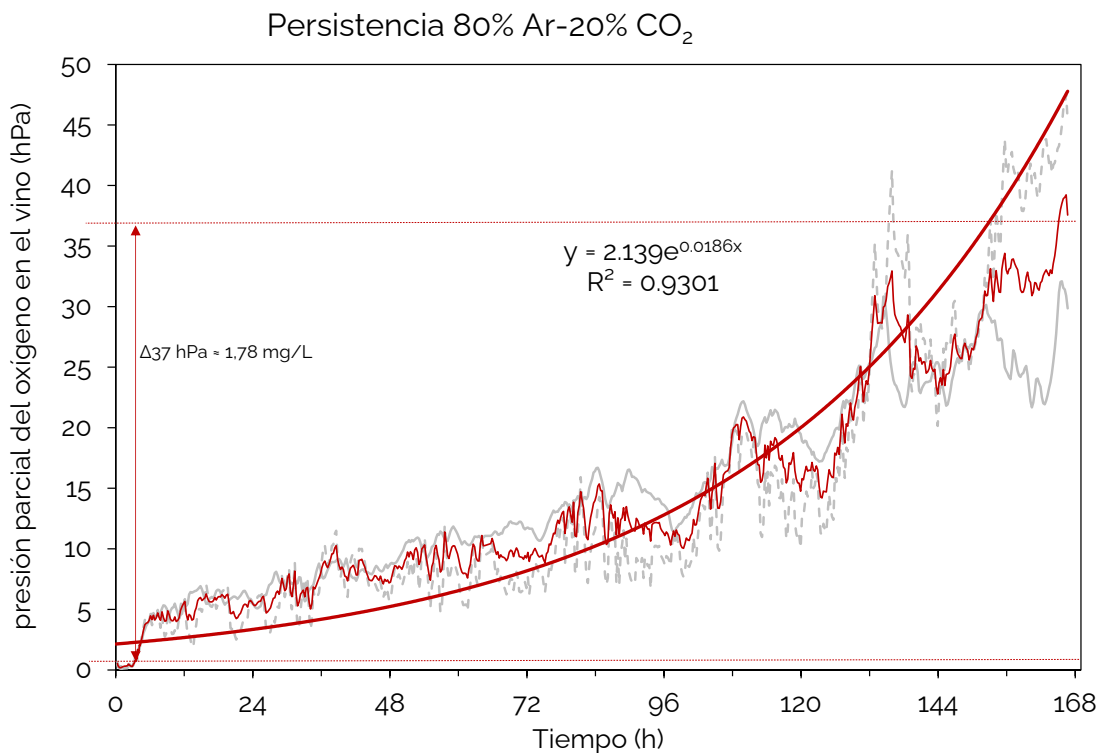


Fig. 8.6. Evolución del oxígeno disuelto en el vino con una cobertura de Ar:CO₂ igual al volumen vacío del depósito durante una semana

En la Figura 8.6 se muestra la evolución de la incorporación de oxígeno disuelto en el vino con el tiempo, que lejos de seguir una evolución lineal, como podría esperarse (Figura 8.3), tiene una tendencia exponencial. Si la incorporación de oxígeno siguiera una tendencia lineal, se incorporarían 3,85 hPa (equivalentes a 0,185 mg/L en agua a 15°C y 965 hPa) de acuerdo con la Figura 8.3, sin embargo, como la tendencia es exponencial se alcanza un nivel de oxígeno disuelto equivalente de 1,78 mg/L (37 hPa, 15°C y 965 hPa). Así, se debe destacar que mientras **la mejor cobertura con gas de inertizado para un depósito vacío permite mantener relativamente intacto un vino durante un par de días**, a partir del tercer día desaparece la linealidad y el efecto es progresivamente más acentuado.

8.2.4.- Tratamiento del espacio vacío con SO₂

También se analizó la incorporación de oxígeno atmosférico al vino cuando el depósito a medio llenar se trata con anhídrido sulfuroso gas. Para ello se utilizó una pastilla de azufre para producir por combustión SO₂, práctica habitual en bodegas en las que se utiliza dicho procedimiento para la inertización de las barricas o depósitos. Cuando se analizan los resultados (*Figura 8.6*) se comprueba que no produce ningún efecto en la reducción de la incorporación de oxígeno al vino, así el nivel de oxígeno disuelto alcanzado en el vino es prácticamente el mismo que al dejarlo con aire. Se demostró que no crea ningún tipo de barrera contra la disolución de oxígeno del aire en el vino.

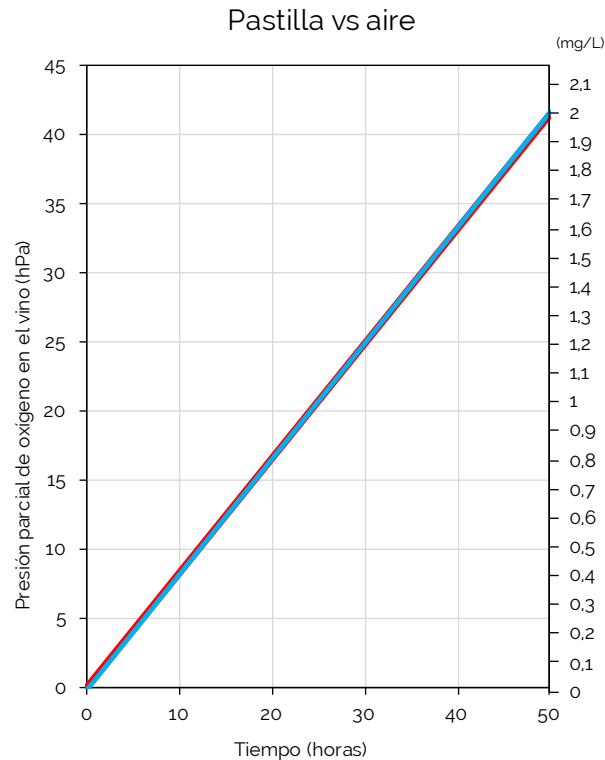


Fig. 8.7. Comparación de la incorporación del oxígeno atmosférico al vino cuando el espacio vacío del depósito está con aire (rojo) o cuando se quema una pastilla de azufre (azul)

8.3.- Conclusiones

El espacio vacío (aire) en un depósito con vino afecta de manera muy importante en la disolución del oxígeno atmosférico en el vino. La aplicación de cualquier gas de inertizado mejora notablemente esta incorporación reduciéndola hasta niveles que son aceptables en la mayoría de los casos. La cobertura con gas de inertizado es recomendable realizarla con el mismo volumen de gas que el espacio vacío, es decir, sustituir completamente el volumen de aire por un gas de inertizado. En el caso de los gases más densos que el aire es mejor realizar la inyección por la tapa, algo que puede realizar cualquier bodega

sin ninguna instalación adicional más que el gas de inertizado necesario. En el caso del N_2 resulta prácticamente indiferente realizar la incorporación por la parte superior del depósito o al nivel de la superficie del vino. Únicamente la mezcla N_2CO_2 ha presentado resultados opuestos. La optimización para reducir el volumen de gas utilizado en base al uso de un gas con densidad mayor que el aire no ha resultado ser adecuada. La formación de una cobertura para aislar al vino, empleando la mitad del volumen de gas que el volumen de aire de la parte superior de depósito, si bien mejora frente a no usar gases de inertizado, es claramente peor que la opción de usar el mismo volumen de gas que el espacio vacío que presenta el depósito a medio llenar.

La sensación de profilaxis que aporta la quema de pastillas de azufre no debe confundirse con la inertización del volumen vacío de vino. Los ensayos realizados indicaron que la incorporación del oxígeno atmosférico es similar a cuando no se quema la pastilla de azufre, comprobándose así que esta práctica no inertiza el espacio vacío del depósito.

La persistencia de la cobertura de gas de inertizado sobre el vino mantiene la baja incorporación de oxígeno al vino en niveles aceptables en un período de dos-tres días, pero a partir del tercer día, si se mantiene la situación del depósito sin renovar la cobertura, los niveles de incorporación aumentan geométricamente hasta alcanzar valores de incorporación de oxígeno no aceptables.

8.4.- Referencias

1. Blouin J. & Peynaud E. Enología práctica: conocimiento y elaboración del vino 2013 (4a ed. revisada y ampliada). Mundi-Prensa.
2. Dharmadhikari, M. Use of inert gases. 2022 Midwest Grape and Wine Industry Institute, Iowa State University. <https://store.extension.iastate.edu/product/16405-pdf>
3. Cachon R. Girardon P. & Voilley Andrée. Gases in agro-food processes. Academic Press. 2019 Retrieved June 28 2023 from <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812465-9.00018-9>



Capítulo 9

El aporte de oxígeno en el embotellado

Luis Miguel Cárcel Cárcel
Grupo UVaMOX- Universidad de Valladolid

9. 1. Introducción

9. 2. El oxígeno en la botella

9. 3. Equipos de embotellado

9.3.1 Fundamentos de los sistemas de embotellado

9.3.1.1 Enjuagado y soplado de las botellas

9.3.1.2 Llenado

9.3.1.3 Taponado

9. 4. Aportes de oxígeno en el embotellado

9.4.1 Depósito pulmón

9.4.2 Bomba de alimentación

9.4.3 Inertizado de las botellas

9.4.4 Operación de llenado

9.4.5 Taponado

9. 5. Tecnología disponible para la reducción del aporte de oxígeno

9.5.1 Inertizado de las botellas

9.5.2 Llenado

9.5.3 Taponado

9. 6. Conclusiones

9. 7. Referencias

9.1.- Introducción

El embotellado supone una de las fases más importantes en la incorporación de oxígeno en los vinos, y concretamente las fases de llenado y taponado de las botellas, resultando esta operación una de las que mayor cantidad de oxígeno puede aportar al vino si no se realiza de forma correcta. Una vez embotellado el vino su evolución en la botella dependerá tanto del oxígeno incorporado a este a lo largo de todo el proceso, como del oxígeno que contenga en el espacio de cabeza y el que se introduzca por el tapón utilizado para el cierre. Existen numerosos

estudios sobre el efecto del oxígeno en el vino, y no tantos relacionados con el equipo concreto utilizado en las diferentes fases del embotellado; enjuagado de las botellas, llenado y taponado. La mayoría de los equipos comercializados en la actualidad permiten la implementación de sistemas que ayuden a realizar el proceso utilizando gases que disminuyan el aporte de oxígeno en el embotellado, si bien también es importante tener en cuenta el correcto mantenimiento de la embotelladora y seguir una serie de buenas prácticas en el manejo de esta.

9.2.- El oxígeno disuelto (OD) del vino embotellado

En la elaboración del vino se persigue en todo momento que el producto evolucione y llegue al consumidor en las mejores condiciones organolépticas posibles, de forma que en el momento de su degustación se pueda percibir la calidad deseada en el producto, por ello es muy importante el control del oxígeno aportado a lo largo de todo el proceso, ya que tanto el exceso como el defecto de oxígeno en la elaboración del vino puede conducirnos a un producto no deseado.

El oxígeno total en la botella de vino (TPO) será la suma del oxígeno disuelto en el vino (OD) y el oxígeno existente en el espacio de cabeza de la botella (HSO), y de ellos dependerá, junto con el que se introduzca a través del cierre en el periodo de guarda, la evolución del vino hasta su consumo. Los valores de oxígeno total embotellado TPO pueden variar en un rango de 0,6 a 3,3 mg/L¹, si bien otros autores dan valores medidos de hasta 9 mg/L², el oxígeno disuelto entre 0,2 y 1,6 mg/L, y el oxígeno del espacio de cabeza entre 0,3 y 2,3 mg/L. En general, se recomienda alcanzar un TPO máximo de 1,0 mg/L tras el embotellado, sobre todo en vinos blancos, pero con la tecnología habitual en bodega es un nivel difícil de conseguir. Niveles por encima de 2,5 mg/L pueden producir problemas de efecto considerable en la vida útil del vino y su perfil sensorial¹. Valores de OD del orden de 0,5 mg/L o menores antes del embotellado, son recomendados para asegurar la calidad de los vinos blancos⁴.

Las reacciones del oxígeno, tanto con los diferentes compuestos del vino como con el sulfuroso existente (como regla general, 4 mg de SO₂ libre son requeridos para neutralizar 1 mg de oxígeno disuelto), descritas en otros capítulos de esta publicación, harán evolucionar el contenido de la botella en diferentes sentidos, tanto en aroma y sabor, como en color, por lo que los procesos en bodega deben de llevarse a cabo para que una vez en el recipiente definitivo el contenido en oxígeno total sea el deseado, considerando su longevidad en botella.

La afección del oxígeno a los diferentes tipos de vinos también varía en función de estos, con efectos diferentes según se trate de vinos calmados o no, y sean tintos, blancos o rosados, tal como se ha puesto de manifiesto en el [Capítulo 2](#), pudiendo tener tanto efectos favorables como desfavorables, tales como una estabilización del color, reducción de la astringencia o la evolución de los aromas del vino^{2,4}. En los vinos blancos o rosados, que no van a ser conservados en botella durante periodos tan largos, la oxidación puede provocar la pérdida de aromas florales y frutales, así como la evolución no deseada del color y la aparición de aromas secundarios inadecuados.

9.3.- Equipos de embotellado

En la actualidad, la mayoría de los fabricantes producen equipos modulares a los que se puede añadir sistemas accesorios para el trabajo con gases de inertización frente al oxígeno atmosférico, de forma que en la configuración básica se podría realizar un llenado "tradicional", complementando diferentes sistemas en cada etapa para reducir el aporte de oxígeno al vino.

Los equipos se pueden comercializar para cada operación por separado, o en líneas compactas que presentan los diferentes elementos unidos en una sola máquina (*Figura 9.1*), habitualmente enjuagado, llenado y taponado, además de los sistemas de capsulado y etiquetado. La producción de los sistemas de embotellado es muy variable, desde unos cientos de botellas por hora, en sistemas de trabajo muy manual, a varios miles con sistemas completamente automatizados. En este apartado se describen los sistemas más utilizados en la actualidad para el embotellado de vinos.

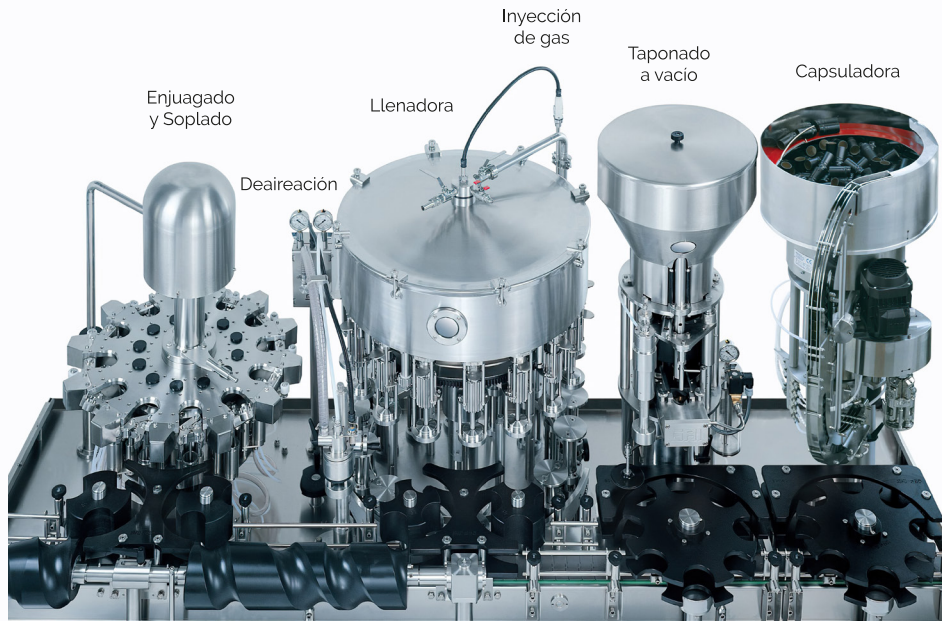


Fig. 9.1. Composición de una embotelladora GAI (Gentileza de DIREMA)

9.3.1 Fundamentos de los sistemas de embotellado

Una embotelladora básica está constituida por la enjuagadora de botellas, la llenadora, la taponadora y la capsuladora, este sistema suele complementarse con la etiquetadora, la cual obviamente no influye en el contenido en oxígeno en el vino más allá de las modificaciones que puedan producirse por el movimiento de la botella en el etiquetado.

9.3.1.1 Enjuagado y soplado de las botellas

En bodega normalmente se emplean botellas de vidrio nuevas, procedentes de fábrica, de un solo uso, las cuales vienen paletizadas tras su fabricación, por lo que en general solamente presentan impurezas o polvo procedentes del periodo de almacenamiento. Los principales sistemas de enjuagado emplean agua, fría o caliente, que debe ser previamente tratada para asegurar su calidad y su esterilidad con el fin de evitar contaminaciones en esta operación.

Existen diferentes configuraciones de enjuagado, pero las más habituales utilizan un sistema de inyección de agua a presión (2 a 3 bar), seguido por un escurrido o, preferentemente, un soplado con aire limpio a una presión de 2 a 4 bar. En los sistemas de enjuagado se puede implementar un soplado con gas, habitualmente nitrógeno, dióxido de carbono, o mezclas de estos con el fin de disminuir el contenido en oxígeno en el interior de la botella vacía tal como se puede comprobar más adelante.

9.3.1.2.- Llenado

En la operación de llenado se introduce el vino en los envases, debiendo conseguir en todos ellos el volumen adecuado para su comercialización. El vino procedente del depósito pulmón de embotellado se introduce en un depósito situado en la embotelladora, el cual alimenta a las boquillas, caños o grifos que constituyen el cabezal de llenado. La

disposición de estas boquillas puede ser lineal o en un sistema de carrusel circular. Existen diferentes tipos de llenadoras según su construcción y funcionamiento, pero las más empleadas a nivel industrial serían las de llenado por gravedad, las de llenado isobárico y las de llenado a vacío.

- **Llenadoras volumétricas:** Las llenadoras volumétricas introducen un volumen constante de líquido en la botella. Tradicionalmente mediante el uso de recipientes del volumen deseado, y actualmente mediante sistemas de medición en línea del volumen.
- **Llenado isobárico:** las llenadoras isobáricas mantienen la misma presión en el depósito de dosificación que en la botella.
- **Llenado por gravedad:** La entrada del líquido tiene lugar por gravedad, eliminándose de manera simultánea el aire que se encuentra dentro de la botella.
- **Llenado isobárico por depresión:** La presión en el depósito, y por lo tanto en la botella es ligeramente inferior a la atmosférica, sobre 0,5 bar, de forma que la velocidad de llenado es mayor que por gravedad.
- **Llenado isobárico por sobrepresión:** En el depósito la presión es ligeramente superior a la atmosférica, es más adecuado para embotellados de vinos que contengan carbónico.
- **Llenado a vacío:** Previamente al llenado de las botellas se genera un vacío en ellas de hasta 0,9 bar, aprovechándose normalmente para in-

troducir gas para inertizar frente al oxígeno (N_2 o CO_2) en el interior. El llenado se realiza a mayor velocidad pudiendo producirse espuma si no está bien regulado.

Existen diferentes diseños del cabezal y boquillas de llenado, pero en general todos ellos disponen de un diseño higiénico que permite el correcto posicionamiento de la botella evitando posibles problemas de rezume o goteo de vino sobre esta, los cabezales disponen de juntas que aseguran la hermeticidad necesaria en el llenado y sistemas de inyección del vino y, en su caso, gas, así como para la evacuación del aire o gas que se encuentra en el interior de la botella. Las llenadoras pueden tener diferente longitud del tubo de inyección de vino. Las llenadoras de tubo largo se introducen dentro de la botella hasta casi el fondo de esta, llenando el recipiente desde el fondo hacia el gollete, son ligeramente más lentas y producen menor aporte de oxígeno en el llenado. Las llenadoras de tubo corto se introducen en la botella hasta unos 70 – 75 milímetros, habitualmente distribuyen el vino en forma de película desde las paredes. Resulta muy importante que la introducción del vino no se realice de forma turbulenta, sobre todo si no se llena en atmósfera inerte, con el fin de disminuir la aportación de oxígeno en el llenado y evitar la formación de espuma.

9.3.1.3.- Taponado

La taponadora de botellas debe de realizar la operación a la mayor brevedad posible tras la operación de llenado. El taponado mediante cierres elásticos (diferentes tipos de corcho o elastómeros plásticos), habitualmente está formado por una tolva de acumulación y dosificación de tapones, un sistema de alimentación del tapón, una mordaza de compresión y un punzón de empuje del tapón en el interior de la botella. La taponadora puede tener uno o varios cabezales según su producción. Existen diferentes tipos de mordazas, y deben de realizar la compresión del tapón de la forma más homogénea posible sin dañar el tapón con el fin de asegurar la correcta recuperación elástica de éste. El diámetro de los tapones debe de estar correlacionado con el diámetro del gollete para asegurar la presión sobre sus paredes por la recuperación elástica del material, siendo los diámetros más habituales de unos 24 milímetros, debiéndose de comprobar el diámetro del gollete de la botella (habitualmente 18,5 mm) para conseguir una estanqueidad adecuada. Hay que tener en cuenta que la introducción del tapón en la botella produce una disminución del espacio libre en el gollete, por lo que se producirá una sobrepresión en el espacio de cabeza, la cual se puede disminuir utilizando dióxido de carbono en la taponadora previamente a la introducción del tapón, el cual por su solubilidad en el vino disminuirá la sobrepresión aunque incorporará este gas al vino, o realizando vacío en el gollete antes de introducir en tapón. El espacio de cabeza se regula en función de la longitud del tapón, habitualmente de 30 a 90 mm desde la boca de la botella.

Los sistemas de cierre mediante taponado a rosca son cada vez más habituales, sobre todo para vinos jóvenes de consumo a corto plazo y en determinados mercados. Existen diferentes sistemas de cierre a rosca, formados por una cápsula tapón de aluminio, dotada de un elastómero, normalmente polietileno expandido recubierto por otro polímero alimentario (PVDC o PET), que es comprimido sobre la botella. La cápsula puede tener la rosca preformada, puede formarse sobre la botella por el cabezal de taponado, o pueden disponer de una pieza interna de plástico con la rosca preformada. El cierre de las botellas mediante tapón de vidrio se ha incorporado en los últimos tiempos, el cierre tiene forma de T con un anillo de silicona que asegura la estanqueidad entre tapón y botella.

9.4.- Aportes de oxígeno en el embotellado.

La cantidad de oxígeno aportada en las diferentes operaciones en bodega varían según la bibliografía consultada, tal como se puede comprobar en el **Capítulo 4**, estimándose que en la elaboración de un vino tinto crianza sin adoptar medidas de control de incorporación de oxígeno, puede finalizarse la elaboración con un contenido en oxígeno hasta 3 veces superior al que tendría un vino elaborado con inertización ⁶. Si se estima porcentualmente la incorporación de oxígeno en las diferentes operaciones del proceso de elaboración, la operación de embotellado figura entre las que suponen una mayor incorporación de oxígeno al producto final, del orden de un 18 al 20%, si se realiza sin el control del proceso de embotellado (*Figura 9.2*). Las operaciones más importantes en el aporte de oxígeno en el embotellado son el llenado y el taponado, puesto que pueden ser responsables del aporte de hasta el 70% del oxígeno del proceso de embotellado.

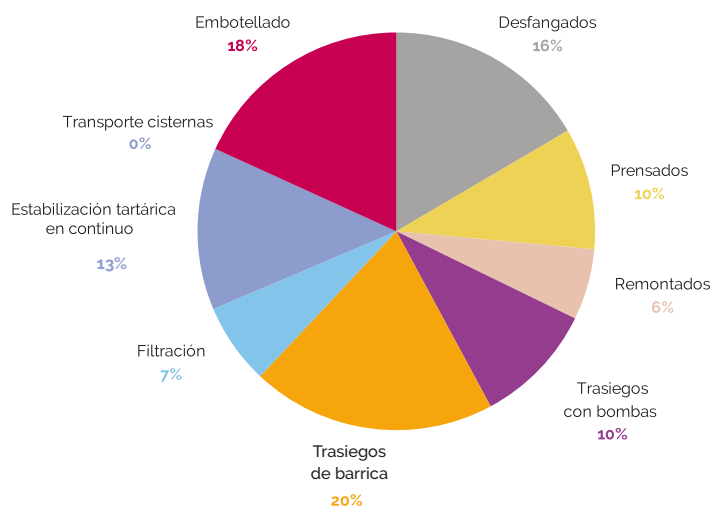


Fig. 9.2. Aportes porcentuales de oxígeno en las principales operaciones en bodega, elaborado a partir de Zaldivar et al.⁶

La incorporación de oxígeno en el proceso de embotellado, dependerá de forma directa de la tecnología empleada para el llenado, fundamentalmente de parámetros como son el trazado de la línea de suministro, diámetro y longitud, el volumen del depósito pulmón, velocidad de la línea y número de boquillas de llenado, el uso de gases de inertización en el proceso, y el sistema de taponado, tipo de cierre y uso de gases o vacío en el taponado (*Tabla 9.1*).

Tabla 9.1. Oxígeno disuelto tras la operación de embotellado

Oxígeno disuelto (mg/L)	Tipo de vino	Uso de gas de inertización	Fuente	Observaciones
0,6	Tinto	Si	Letaief ¹	
3,3	Blanco	No	Letaief ¹	
2,25 - 2,44	Solución SM	Si	Kontoudakis et al. ⁵	
5	Tinto	No	Zaldivar et al. ⁶	(TPO incorporado)
1,5	Tinto	Si	Zaldivar et al. ⁶	(TPO incorporado)
2 - 7	Espumoso		Valade et al. ¹¹	
0,94 - 2,8	Tinto	Si	Catarino et al. ¹⁰	
1,36 - 2,2	Blanco	Si	Catarino et al. ¹⁰	
4,1 - 5,1	Blanco	No	Blackford et al. ⁹	
0,9 - 2	Blanco	Si	Blackford et al. ⁹	
1,4 - 1,6			Vidal et al. ⁷	
2,99 - 4,12			Kulhankova et al. ¹⁷	

El uso de gases de inertización en el embotellado es una práctica cada vez más extendida, y que posibilita una importante reducción de la incorporación del oxígeno en este proceso, por lo que la tecnología actual de embotellado se enfoca principalmente en este aspecto.

9.4.1.- Depósito pulmón

En la operación de embotellado, partiendo del depósito pulmón donde se encuentra el vino previamente a su paso por la embotelladora, resulta de suma importancia el control de este depósito inicial su disposición respecto de la línea, distancia, trazado de la tubería y bomba utilizada para la impulsión del vino, pudiendo fluctuar su aporte entre un 30 y un 70% del aporte global ^{7,8}. En el depósito pulmón, principalmente en el inicio y el final del llenado, se produce un enriquecimiento mayor en oxígeno, por lo que para evitarlo es necesario la inertización previa del depósito, así como su mantenimiento en atmósfera controlada. Se debe evitar presencia de aire en las fases de llenado y vaciado del depósito.

9.4.2.- Bomba de alimentación

Otro de los parámetros importantes es evitar el uso de bombas de tipo centrífugo, ya que, por su sistema de funcionamiento, configuración de rodete y velocidad de giro, incorporan más oxígeno al vino. En cualquier caso, se debe de diseñar un trazado de tuberías con la menor longitud de aspiración posible, y con el menor número de accidentes, codos, válvulas, etc., evitando de este modo la posibilidad de cavitación que pueda por una parte introducir oxígeno en el sistema, y la pérdida de compuestos aromáticos por la vaporización parcial que se produce en este fenómeno ^{6,9}.

9.4.3.- Inertizado de las botellas.

Para controlar el oxígeno en el proceso de embotellado, la primera fase a tener en cuenta es el inertizado de las botellas vacías tras su enjuagado, utilizando nitrógeno, dióxido de carbono, mezcla de estos gases o argón. Debido a la solubilidad del CO₂ en el vino, el uso de este no siempre es adecuado para las características del producto, principalmente para vinos tintos o blancos en los que no se desee su presencia.

El gas de inertización más habitual es el nitrógeno puro insuflado en el interior de la botella a una presión que puede variar entre 1 y 2,5 bar⁹, existiendo recomendaciones de uso de volúmenes de gas de 7 a 8 veces el volumen de la botella¹. El consumo de gas es variable, ya que en función de la velocidad de la línea y la presión de suministro los resultados difieren, precisando de mayor presión, y por lo tanto mayor cantidad de gas, cuanto mayor es la velocidad de inertizado, lo cual incide en los costes del proceso.

9.4.4.- Operación de llenado

En el llenado de las botellas tiene especial importancia el tipo de cabezal de embotellado, la boquilla y el sistema de inyección. La botella de 750 mL vacía contiene unos 200 mg de oxígeno que pueden mezclarse con el vino en la operación de llenado si la introducción del vino se realiza de forma incorrecta, por lo que es fundamental utilizar un sistema adecuado y vigilar su correcto mantenimiento.

El aporte de oxígeno al vino en el llenado dependerá del cabezal de llenado utilizado, las boquillas, así como de su adecuado mantenimiento, el mal estado de una junta o un defecto en la boquilla puede incrementar la oxigenación del vino. A lo largo de un lote de embotellado, se ha observado mayor contenido en oxígeno en las botellas del inicio y del final^{1,6,7}, por lo que se debe prestar especial atención a esas fases, inertizando previamente el circuito y evitando que en la finalización del proceso se incorpore aire al sistema, "empujando" por ejemplo el final con gas de inertización⁵. También es importante reducir al máximo las interrupciones en el proceso de embotellado para minimizar las fases de arranque y parada.

Los principales datos obtenidos de aporte de oxígeno en el embotellado parten del uso de embotelladoras de tipo isobáricas, con llenado por gravedad o con una ligera depresión. En el llenado isobárico por gravedad, se observaron valores de incorporación de oxígeno de alrededor de 0,7 mg/L⁷, con valores de 1,7 mg/L para las 150 primeras botellas, y 1,3 mg/L para las últimas 250.

Sin el uso de sistemas de inertización, el oxígeno total (TPO) en botella resulto aproximadamente un 20% menor en el llenado por gravedad (4,1 mg/L) que en el llenado con gravedad con ligera depresión (5,1 mg/L)⁸.

9.4.5.- Taponado

Durante el taponado de la botella se puede incrementar de forma sensible el contenido en oxígeno, principalmente en el espacio de cabeza y dependiendo del tipo de cierre empleado y la máquina de taponar, por lo que es muy importante el control en esta operación. Cuando se ha utilizado una llenadora con gas de inertización la cantidad incluida en el taponado será menor, sobre todo si el sistema de llenado mantiene el gas sobre la superficie del vino, sin embargo, la introducción del tapón en condiciones ambientales puede incrementar el aporte de oxígeno, y por lo tanto el contenido de este en espacio de cabeza. Es importante tener en cuenta que el volumen del vino se incrementa un promedio de 0,2 mL por cada °C de incremento, por lo que la presión en el espacio de cabeza variará en función de la temperatura, siendo imprescindible la correcta regulación del espacio de cabeza en la botella, con el fin de controlar el intercambio de gases

a través del tapón, así como la temperatura del vino en el llenado y almacenamiento posterior. Las diferentes tasas de transmisión de oxígeno (OTR) de los taponeros empleados también influirán en el oxígeno incorporado en el espacio de cabeza ⁵; una vez decidido el tipo de cierre, es muy importante prestar atención a las condiciones de la maquinaria de taponado y a su funcionamiento, evitando posibles defectos mecánicos que afecten al tapón, asegurando un volumen de cabeza regular y adecuado, ya que un volumen excesivo o escaso pueden repercutir en un mayor intercambio gaseoso por efecto "pistón", e incluso en fugas de vino a través del cierre.

Para reducir la cantidad de oxígeno en el espacio de cabeza de la botella, una de las prácticas más habituales consiste en el uso de una taponadora bajo vacío, pudiendo ser suficiente para ello trabajar con una ligera depresión de 0,2 bar, aunque las recomendaciones son variables, con un vacío de -0,5 a -0,9 bar en la taponadora, y de 0 a -0,3 bar en el espacio de cabeza ¹¹.

En el uso de tapón roscado, la permeabilidad al oxígeno es muy baja, pudiendo variar entre 0,0005 a 0,002 mL/día y botella ¹³, sin embargo, el uso de este tipo de cierres sin uso de gas de inertización en el proceso puede incrementar considerablemente el oxígeno en el espacio de cabeza ¹.

9.5.- Tecnología disponible para la reducción del aporte de oxígeno

La tecnología de embotellado se ha orientado en los últimos años hacia sistemas cada vez más automatizados, tanto en los equipos compactos o monobloc, como en los trenes de embotellado modulares, son sistemas más fácilmente configurables en función de las necesidades de las bodegas, pudiendo implementar sistemas de limpieza CIP o COP, intercambio de sistemas de cierre, y adaptación a diferentes formatos de forma sencilla. Actualmente, las líneas de embotellado básicas pueden complementarse con diferentes sistemas desarrollados por los fabricantes que disminuyan el aporte de oxígeno en las operaciones, principalmente un sistema de desaireación por vacío tras el enjuagado para eliminar parte del aire contenido en la botella vacía, un sistema de soplado con gas de inertización para reemplazar el aire interior, un sistema de inyección de gas y de inertización en el llenado y tras él, además de sistemas de vacío y/o de inyección de gas en el cerrado o taponado de la botella. Algunos equipos permiten la realización de vacío en la botella simultáneamente al insuflado de nitrógeno, disminuyendo así la incorporación de oxígeno.

Además del control de las fases previas al embotellado, que se abordan en otros capítulos, desde el inicio del proceso resultan de suma importancia las fases de inertizado de la botella vacía, control del llenado, y taponado, existiendo en el mercado diferentes soluciones y patentes en desarrollo continuo.

9.5.1.- Inertizado de las botellas

En el inertizado de las botellas se debe alcanzar la sustitución del aire contenido en el envase con un gas que desplace al oxígeno, de forma que al iniciarse la fase de llenado el vino no entre en contacto con este aire, siendo protegido por el gas. La tecnología actual se orienta en dos sistemas diferentes; el barrido con gas que desplace al oxígeno de forma directa de todo el volumen de la botella, y el uso de un sistema de vacío previo al inertizado, que reduce el contenido en aire de la botella, reduciendo también el consumo de gas.

El barrido de la botella con gas antes del llenado precisa de un volumen de este de 4 a 8 veces el de la botella, dependiendo de la tecnología empleada y la presión de suministro de N₂ y, según algunos au-

tores, en ocasiones no resulta eficiente ¹ debido a la turbulencia y la velocidad de insuflado del gas. La mayoría de los fabricantes disponen de equipos de llenado con sistemas de gas de inertizado previo al llenado de la botella (N₂, CO₂), de forma que realizan un barrido con el gas que teóricamente desplaza el aire, y por lo tanto el oxígeno.

La desaireación de la botella vacía reduce el consumo de gas, de 4 volúmenes de nitrógeno por volumen de aire a 1 volumen de nitrógeno por volumen de aire, con resultados similares en aporte de oxígeno ¹⁴, por lo que es una técnica muy recomendable por el ahorro en gas. La tecnología desarrollada por GAI emplea un sistema de dos electroválvulas independientes para la aspiración previa y la insuflación del gas, y consigue un consumo de N₂ inferior en un 75%.

9.5.2.- Llenado

Las empresas fabricantes de maquinaria han desarrollado diferentes sistemas para disminuir la incorporación de oxígeno en el vino durante el llenado de la botella. El diseño de los cabezales de llenado, junto con los inyectores de vino han evolucionado en patentes que aseguran el cierre sobre el gollete, al tiempo que evitan las turbulencias en la introducción del vino y posibilitan el uso de gases de inertización con diferentes sistemas de distribución.

Tanto las llenadoras de tubo o inyector largo, como las de tubo corto, permiten el uso de gas durante el llenado, existiendo diferentes diseños según lo fabricantes, realizando un llenado por gravedad o isobarométrico con ligera depresión en la mayoría de los casos.

La empresa fabricante GAI implementa en sus equipos un sistema mediante el cual se realiza previamente al llenado una aspiración del aire de la botella mediante bomba de vacío (-0,9 kg/cm²), sincronizado con la insuflación de gas, en el llenado, de forma isobarométrica por gravedad o ligera depresión, el vino se introduce tangencialmente al envase evitando turbulencias, permitiendo la salida del gas por el centro de la boquilla hacia el depósito, manteniendo este en atmósfera inerte. Este sistema realiza una inyección de gas previa a la operación de taponado, de forma que el espacio de cabeza queda libre de oxígeno, aplicando un vacío previo a la inserción del tapón. Los resultados obtenidos por este fabricante pueden observarse en la *Tabla 2*, en la que a los procesos habituales de enjuagado, llenado y taponado se complementan con el deaireado previo al llenado, la inyección de gas tras el llenado y la realización de vacío previa al taponado (*Figura 9.3*).

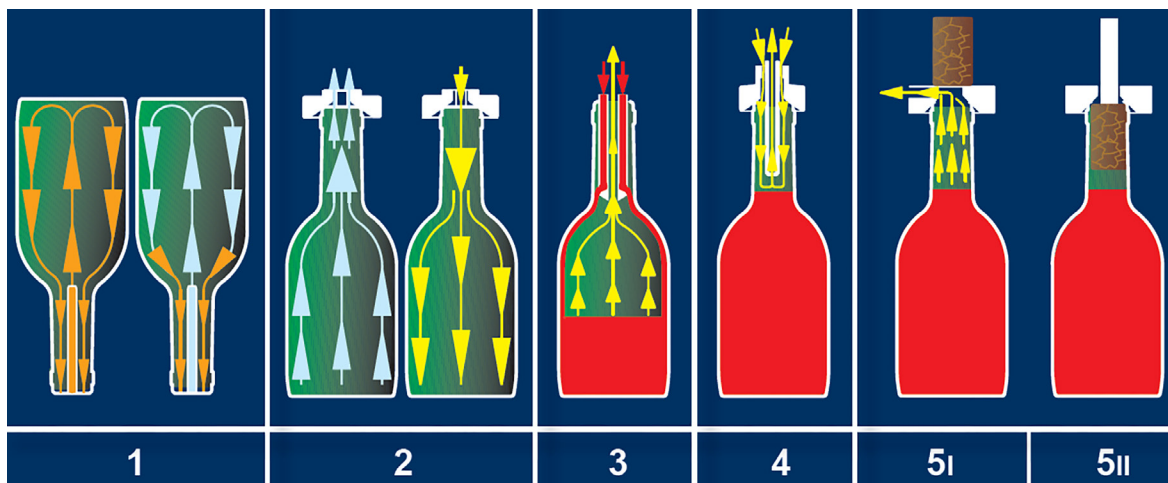


Fig. 9.3. Operaciones en las embotelladoras GAI (Gentileza de DIREMA). 1 Enjuagado y soplado. 2 Deaireado e inyección de gas de inertizado. 3 Llenado de la botella. 4 Inyección de gas de inertizado previa al taponado. 5I Realización de vacío. 5II Taponado

El llenado en las embotelladoras GAI se realiza de forma isobarométrica por gravedad o ligera depresión, mediante una válvula de llenado patentada que cierran tanto la salida del vino como la entrada de gas, y evita el contacto del vino con el aire (Figura 9.4).

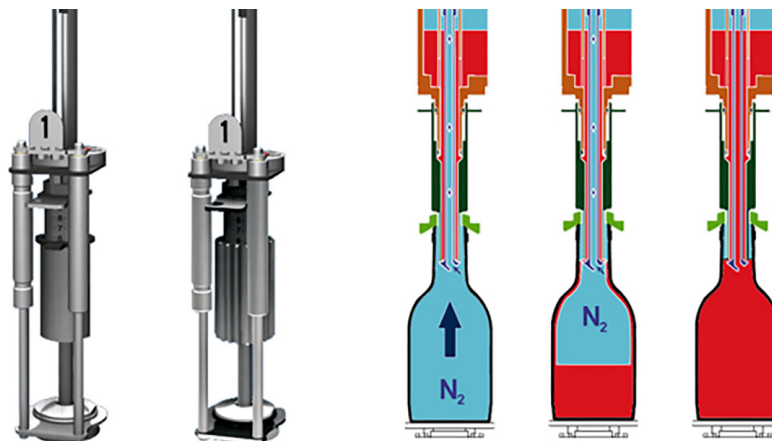


Fig. 9.4. Válvulas de llenado en atmósfera inerte GAI, con regulación de nivel individual (i) y centralizado (d). Inertizado de la botella y llenado en flujo laminar por las paredes de la botella en atmósfera inerte.

Tal como puede observarse en la Tabla 9.2, los sistemas combinados de vacío en la taponadora, con el uso de gas de inertizado pueden reducir de manera considerable el contenido total de oxígeno en botella o TPO, principalmente cuando se combina el llenado en atmósfera inerte con el mantenimiento de esa atmósfera en la operación de taponado.

Tabla 9.2. Oxígeno en el embotellado con diferentes combinaciones tecnológicas (Adaptado de GAI ¹⁴)

Soplado	Deaireado	Inyección de gas	Vacío taponadora	OD (mg/L)	HSO (mg/L)	TPO (mg/L)
				0,60	1,40	2,00
		X		0,60	0,25	0,85
		X	X	0,60	0,10	0,70
	X	X	X	0,09	0,08	0,17
X		X	X	0,07	0,07	0,14
X	X	X	X	0,06	0,06	0,12

Un sistema de embotellado desarrollado recientemente en Italia, con la financiación de la Unión Europea, denominado RICAMO Innovative oxygen-free wine bottling process ^{15,16}, ha desarrollado una nueva tecnología de embotellado basada en el uso de boquillas largas para el llenado, que depositan una burbuja de gas de inertización (CO₂, N₂) en el fondo de la botella, en la cual se incorpora el vino desplazándola hacia el gollete conforme se produce el llenado (Figura 9.5). Según el informe de resultados de la investigación ¹⁵ la reducción el oxígeno disuelto alcanzada es del 73,2 al 92,2%, con un consumo bajo de gas de inertización.

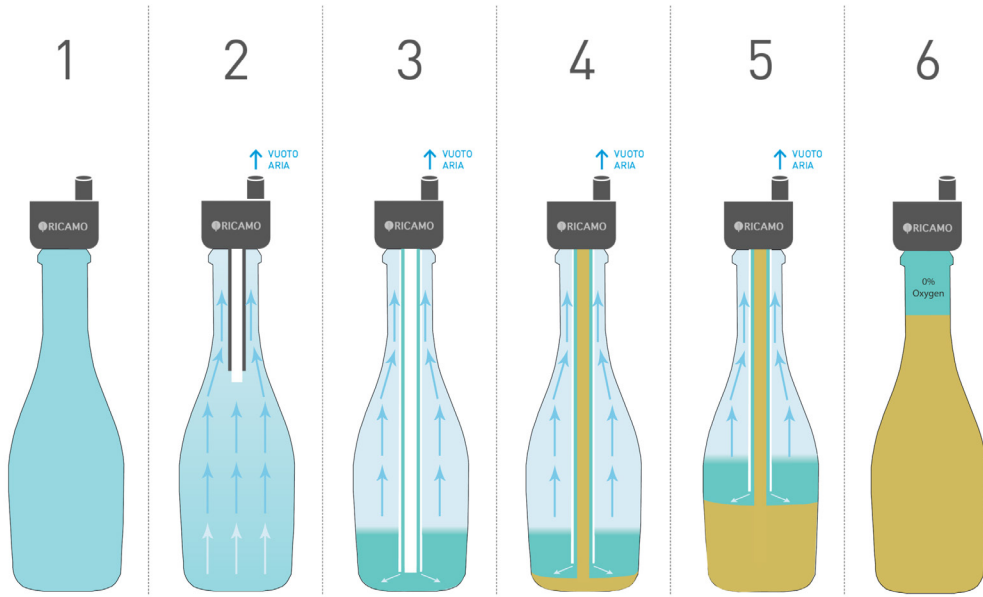


Fig. 9.5. Funcionamiento del sistema RICAMO (<https://www.ricamosystem.com/>).
 1 Botella en posición. 2 Realización vacío. 3 Inyección gas de inertización.
 4 Inicio llenado. 5 Llenado y salida gas. 6 Fin de llenado

Algunos fabricantes de embotelladoras, como FIMER¹⁹, disponen de cabezales acoplables al equipo de embotellado, de forma que previamente al llenado sustituye el aire del interior de la botella por un gas de inertización, el gas de inertización sobrante de la botella pasa a la cuba de llenando llegando a inertizar la misma (Figura 9.6).

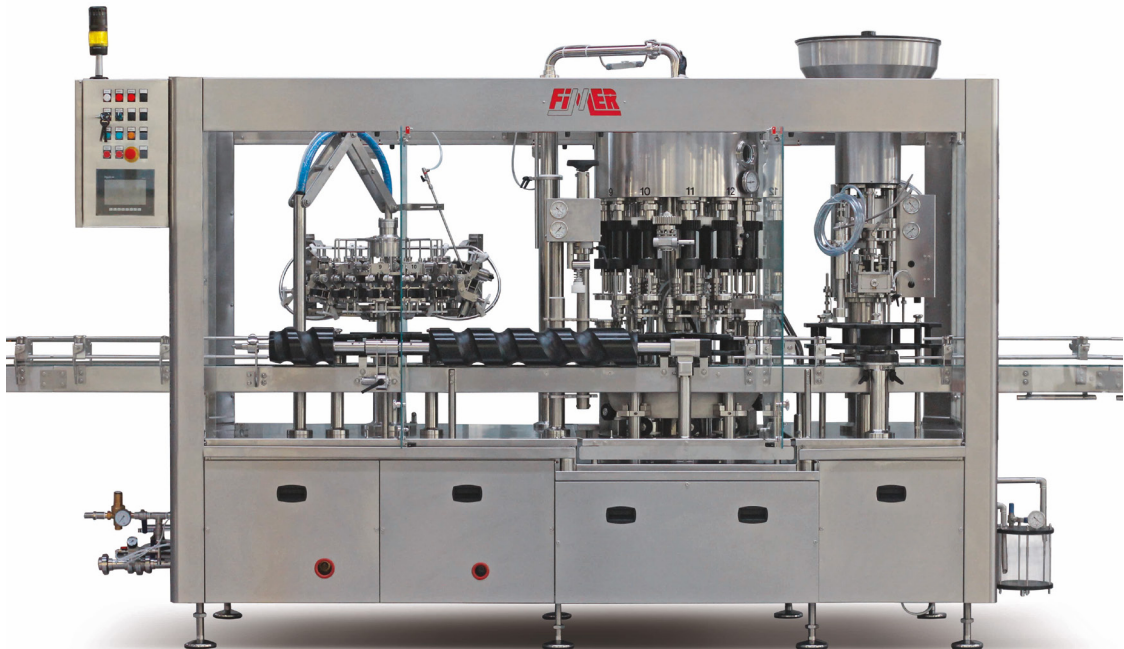


Fig. 9.6. Embotelladora FIMER con cabezal para inyección de gas de inertización
 (Intecpro Solutions – Soluciones en elaboración de Vinos y Espumosos¹⁹)

El sistema ANTIOX DEOX patentado por Alfatek ²⁰ realiza el llenado mediante un sistema hiperbárico con una ligera sobrepresión de gas de inertización (0,1 – 0,3 bar), según este fabricante la sobrepresión en el llenado contribuye a preservar los aromas del vino (*Figura 9.7*), estos equipos ofrecen la posibilidad de realización de vacío en la botella previo al llenado, tras el cual la conducción de la botella puede realizarse en un túnel con gas de inertizado para evitar el contacto con el oxígeno ²⁰.

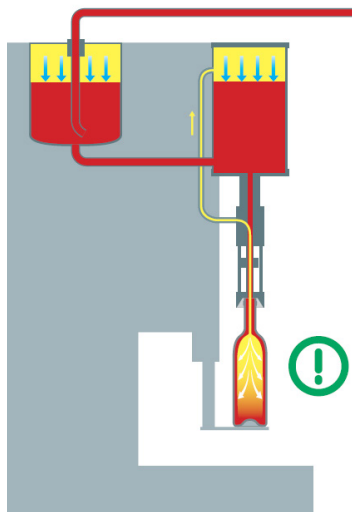


Fig. 9.7 Esquema del sistema hiperbárico de llenado Alfatek (Cortesía de ALFATEK BOTTLING PLANTS)

9.5.3.- Taponado

Dentro de la operación de taponado, tal como se ha comentado en el apartado anterior, la mayoría de los sistemas abogan por la inyección de gas de inertización inmediatamente antes del taponado, con el fin de conseguir la reducción del contenido en oxígeno del espacio de cabeza, bien por medio de un barrido de nitrógeno gas, bien por la deposición de una gota de nitrógeno líquido sobre el vino ^{3,18}, de esta forma el espacio de cabeza queda ocupado por un gas inerte que evita el contacto entre el oxígeno y el vino.

Resulta muy importante el ajuste del volumen de cabeza en función del sistema de taponado, ya que la introducción del tapón da como resultado una sobrepresión en el espacio de cabeza que terminará por equilibrarse entre el vino y el contenido gaseoso a lo largo del tiempo en función de la porosidad del tapón, de ahí los beneficios observados en la realización de vacío previo al taponado señalados en el apartado anterior.

La unión de ambas técnicas, vacío con gas de inertización en el taponado, supondría la mejor práctica posible para reducir el contenido en oxígeno del espacio de cabeza de la botella.

Es interesante considerar la posibilidad de mantener los cierres en atmósfera inerte antes de ser utilizados, sobre todo los más porosos, como los tapones de corcho o algunos sintéticos, pero tampoco es desdeñable para cierres roscados.

9.6.- Conclusiones

A modo de conclusiones en el aspecto de la maquinaria de embotellado y su incidencia en el contenido en oxígeno en la botella de vino, se pueden destacar los siguientes aspectos:

- En las embotelladoras sencillas, sin posibilidad de uso de gas de inertización, se debe realizar un mantenimiento cuidadoso del equipo, juntas, cabezales, posicionadores, etc. Resulta fundamental ajustar el espacio de cabeza y el funcionamiento adecuado de los inyectores del vino.
- Evaluar la posibilidad del acoplamiento de un sistema de inyección de gas de inertización, pero siempre con un ajuste técnico adecuado, ya que pueden no obtenerse los resultados deseados en la reducción del aporte de oxígeno en el embotellado.
- Realizar la adecuada inertización de las botellas previas al llenado, así como en la fase de llenado y el taponado.
- Ajustar el taponado para evitar sobrepresiones en el espacio de cabeza.
- La combinación de un inertizado previo, con una atmósfera inerte en la máquina de llenado y el taponado, será la opción que procura mayor protección al vino frente al oxígeno, siempre optimizando el uso del gas de inertización con una maquinaria en buenas condiciones.
- La realización de vacío previo al inertizado en la taponadora resulta una práctica también recomendable.

9.7.- Referencias

1. Letaief, H. Key Points of the Bottling Process. *Wines & Vines*. Mayo 2016, pp. 36-46.
2. Tarko, T.; Duda-Chodak, A.; Sroka, P.; Siuta, M. The impact of oxygen at various stages of vinification on the chemical composition and the antioxidant and sensory properties of white and red wines. *Int. J. Food Sci.*, 2020, 7902974. <https://doi.org/10.1155/2020/7902974>.
3. Strobl, M. Red Wine Bottling and Packaging. En *Red Wine Technology*. Elsevier, 2019, pp 323-339. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814399-5.00022-0>.
4. Westrick, M. Managing oxygen in White wine production. *Prac. Winery Vineyard*. 1996. May-June, pp 49-52.
5. Kontoudakis, P.; Biosca, R.; Canals, R.; Fort, F.; Canals, J.M.; Zamora, F. Impact of stopper type on oxygen ingress during wine bottling when using an inert gas cover. *Aust. J. Grape Wine Res.* 2008, 14, 116-122. <https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2008.00013.x>.
6. Zaldivar, E.; Rodríguez, F.; Carrillo, D.; Palacios, A. Proyecto VIN-O₂. Gestión del oxígeno, manual de buenas prácticas en bodega. <http://www.gruporioja.es/es/i-d-i/item/173-gestion-del-oxigeno-manual-de-buenas-practicas-en-bodega>.
7. Vidal, J.C.; Boulet, J.C.; Moutounet, M. Les apports d'oxygène au cours des traitements des vins. Bilan des observations sur site. 3ème partie. *Rev. Française Oenol.* 2004, 205, 25-33.
8. Karbowiak, T.; Gougeon, R.D.; Alinc, J.B.; Brachais, L.; Debeaufort, F.; Voilley, A.; Chassagne, D. Wine Oxidation and the role of cork. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 2010, 50: 20-52. <https://doi.org/10.1080/10408390802248585>
9. Blackford, M.; Koestel, C.; Beldame, G.; Amiet, L.; Bach, L.; Bourdin, G.; Rösti, J. Sulphite dioxide reduction in wine: Management and control of oxygen added during bottling. *BIO Web of Conferences*, 15, 0213. 2019. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20191502013>.
10. Catarino, A.; Alves, S.; Mira, H. Influence of Technological Operations in the Dissolved Oxygen Content of Wines. *J. Chem. Chem. Eng.* 2014, 8 (4). <https://doi.org/10.17265/1934-7375/2014.04.010>.

11. Valade, M., Tribaut-Sohier, I., Bunner, D.; Laurent, M., Moncomble, D. and Tusseau, D. Oxygen additions during vinification and the impact on wine, 2nd part. *Int. J. Vitic. Enol.*, 2007, 11.
12. Dulau, L.; O'Brien, V.; Dubrion, P.; Moutounet, M.; Vidal, S.; Aagaard, O. New insights into the relationship of wine, oxygen, and closures. *The Australian & New Zealand Grapegrower & Winemaker*. March 2007. Pp 68 – 71
13. Jackson, R. S. *Wine Science. Principles and applications*, 5th ed. Elsevier Academic Press 2020.
14. GAI. Oxidación de vinos de calidad durante la fase de embotellado. Documento técnico de la empresa fabricante.
15. CORDIS. Resultados de investigaciones de la UE. <https://cordis.europa.eu/project/id/726510/results/es>.
16. RICAMO <https://www.ricamosystem.com/en/>
17. Kulhankova, M.; Prusova, B.; Licek, J.; Kumsta, M.; Baron, M. Impact of technological operations on oxygen consumption during wine production. *Acta Alimentaria*. 2003. Vol. 52: 2.
18. Vidal, J.C.; Moutounet, M. Monitoring of oxygen in the gas and liquid phases of bottles of wine at bottling and during storage. *J. Int. Sci. Vigne Vin*. 2006, 40, n°1, 35-45.
19. INTECPRO SOLUTIONS. <https://www.intecpro.net/>
20. ALFATEK <http://www.alfatek.it/> A technical note on the enological advantages of Alfatek filling technology.



Capítulo 10

Contenido de oxígeno en el vino embotellado

María del Álamo Sanza e Ignacio Nevares Domínguez
Grupo UVaMOX- Universidad de Valladolid

10. 1. Introducción

10. 2. El oxígeno disuelto (OD) del vino embotellado

10. 3. El oxígeno en el espacio de cabeza (HSO)

10. 4. El oxígeno que entra por el tapón

10. 5. Medida del oxígeno en el vino embotellado

10.5.1 Medida del oxígeno disuelto en el vino

10.5.2 Medida en el espacio de cabeza

10. 6. Buenas prácticas en el embotellado

10. 7. Referencias

10.1.- Introducción

Como se ha mencionado en los capítulos anteriores, el oxígeno se incorpora al vino durante todo el proceso de vinificación, favoreciendo la actividad de las levaduras durante la fermentación, o en algunos casos provocando la oxidación prematura de los vinos o la modificación de las propiedades sensoriales, color, aroma...de los vinos durante todo el proceso incluida la estancia en botella. Después del embotellado el oxígeno también participa activamente en la conservación de los vinos interviniendo de forma decisiva en las reacciones que definen la evolución del vino en botella, ya que afecta a los niveles de anhídrido sulfuroso libre, además altos niveles de oxígeno provocan la oxidación y pérdida de aromas en los vinos, mientras que bajos niveles provocan la reducción de los vinos¹. Distintos autores recomiendan niveles totales de oxígeno en el embotellado inferiores a 1,25 mg/L en vinos tintos e inferiores a 0,6 mg/L en vinos blancos y rosados. En definitiva, la gestión del oxígeno durante el embotellado y la posterior estancia en botella es esencial para asegurar que el vino elaborado evolucione adecuadamente y llegue al consumidor en las condiciones idóneas. El objetivo debe ser mantener lo más baja posible

la incorporación de oxígeno y reducir su variabilidad entre botellas para asegurar la continuidad en la calidad del mismo tipo de vino al consumidor.

El oxígeno que recibe el vino de una botella recién embotellado está definido por el nivel de oxígeno disuelto del vino cuando se llena la botella y por el oxígeno en el espacio de cabeza cuando se pone el cierre, lo que se conoce como el oxígeno total del envase (Total Package Oxygen: TPO). Esta incorporación de oxígeno, si no está correctamente gestionada puede ser más significativa que el oxígeno que recibe el vino por el cierre durante su permanencia en botella, que incluye el oxígeno que proviene de la desgasificación del tapón y que se va liberando en las primeras semanas tras el embotellado y posteriormente el oxígeno que entra por el tapón (Tasa de Transmisión de oxígeno: TTO o la conocida Oxygen Transmisión Rate: OTR). En el caso de envases de diferente formato a la botella, como las bolsas en cajas (bag in box) o las latas de aluminio, el oxígeno total es similar al definido anteriormente. La *Figura 10.1* recoge un esquema de las fuentes que definen el oxígeno disponible para el vino embotellado.

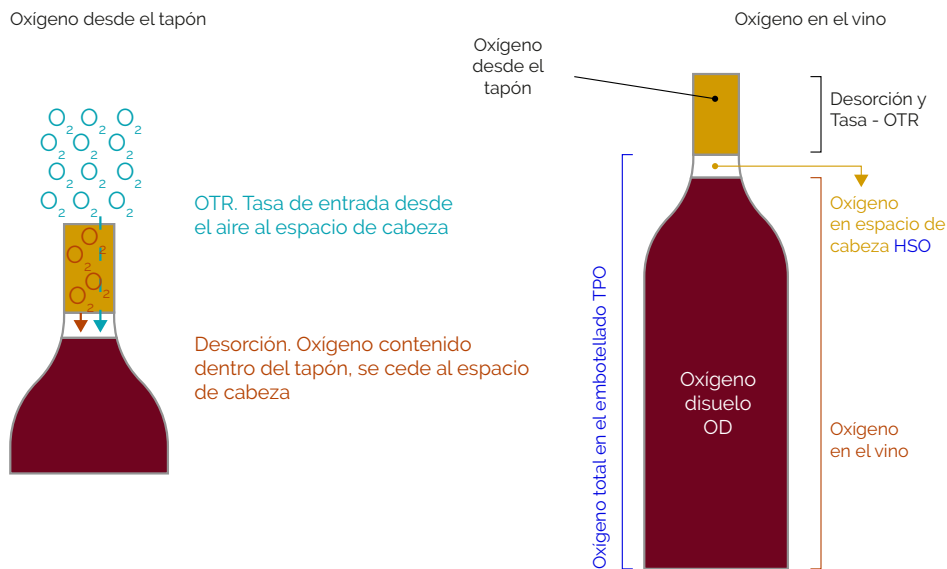


Fig. 10.1. Fuentes de incorporación de oxígeno en el vino embotellado

10.2.- El oxígeno disuelto (OD) del vino embotellado

El OD refleja el oxígeno que se ha ido incorporando en el vino desde el depósito origen hasta que está en la botella, y varía según las operaciones intermedias realizadas, la temperatura, las paradas... pudiendo alcanzar niveles próximos a saturación en algunos casos (8-9 mg/L) ^{2,3}.

Los **Capítulos 4 y 5** muestran información sobre el oxígeno que reciben los vinos debido a la realización de distintas operaciones y al uso de diferentes materiales antes o durante el embotellado.

Otro aspecto importante es **el tiempo dedicado al embotellado de un depósito**, ya que al inicio del embotellado el vino fluye por conducciones que si no se han inertizado están llenas de aire, cuyo oxígeno se incorpora al vino provocando altos niveles de oxígeno disuelto, que disminuyen cuando todas las conducciones ya están llenas de vino, pero que vuelven a aumentar cuando el depósito origen se va vaciando y entra aire en la aspiración, si no se ha realizado la cobertura con gas de inertizado (blanketing) correspondiente.

La **Figura 10.2** muestra un ejemplo de esta situación durante el embotellado de un depósito durante una semana. Se han realizado medidas del oxígeno disuelto OD en el vino de las botellas en 24 momentos diferentes del embotellado en 5 días. Se observa que de forma promediada el vino embotellado tiene 3 mg/L, de los que 0,9 mg/L ya se habían incorporado hasta llegar a la embotelladora y 2,1 mg/L se añaden en la embotelladora.

Destacan los elevados resultados obtenidos en las medidas al inicio de las jornadas de embotellado, seguramente sea debido a la ausencia de inertización de mangueras. El vino de las primeras botellas de cada día tienen un nivel de oxígeno significativamente superior, entre 4 y 5 mg/L, frente al vino de las botellas de las últimas horas del embotellado que se encuentra en valores por debajo de 3 mg/L.

Los datos publicados por distintos autores, así como los resultados obtenidos por el grupo de investigación UVaMOX indican que el nivel de oxígeno disuelto en los vinos embotellados en distintas bodegas puede variar entre 1-6 mg/L dependiendo del tipo de vino, embotelladora, movimientos realizados... así como las condiciones de temperatura y presión del embotellado. En el caso de la llenadora, cuando se emplean tubos de llenado largos se reduce la incorporación de oxígeno a niveles inferiores a 1 mg/L, debido a que se reducen las turbulencias y con ello el aporte del oxígeno del aire atmosférico. Además, el desplazamiento con CO₂, N₂, Ar del aire que contiene la botella vacía antes del llenado también reduce la incorporación de oxígeno al vino ⁴.

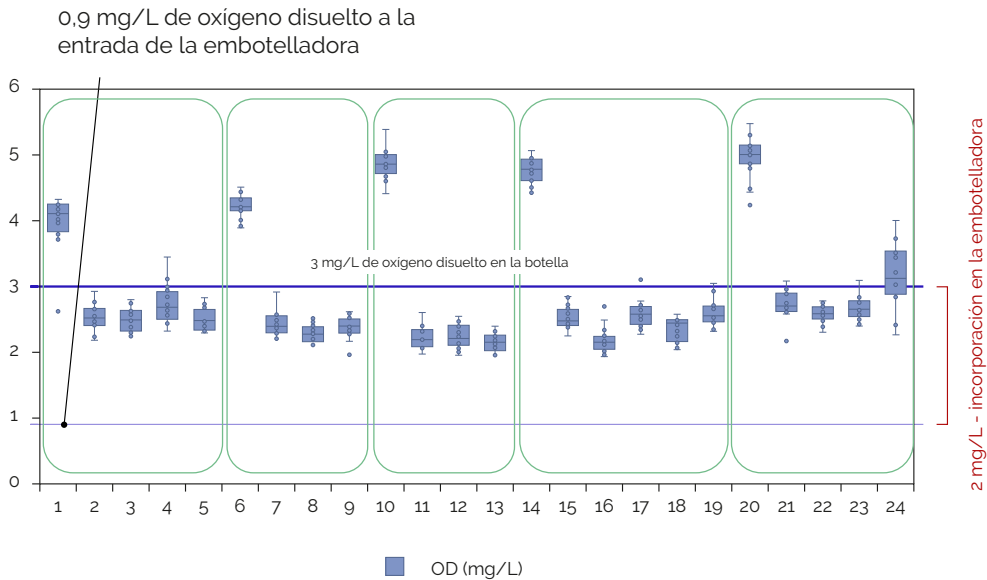


Fig. 10.2. Estudio en 24 momentos diferentes de la variación del contenido de OD en los vinos embotellados en una bodega de Castilla y León

10.3.- El oxígeno en el espacio de cabeza (HSO)

Cuando se realiza el embotellado es habitual dejar un volumen de gas entre la superficie del vino y el cierre, volumen llamado espacio de cabeza (Head Space:HS) que varía entre 3 y 15 mL según que el cierre elegido sea un tapón de corcho o sintético (2-7 mL) o de rosca (hasta 15 mL) ¹. Este volumen de gas, si no se ha inertizado adecuadamente, es aire con un 21% de oxígeno que puede contener entre 1-5 mg/L de oxígeno ³. Esta situación hace que el oxígeno del aire se transfiera al vino, ya que, como se ha explicado en el **Capítulo 1**, por la Ley de Henry, la solubilidad de un gas en un líquido es proporcional a la presión parcial de ese gas en la atmósfera gaseosa en contacto con dicho líquido. La *Tabla 10.1* recoge un cálculo de la incorporación de oxígeno al vino según el volumen del espacio de cabeza cuando no se ha inertizado y por tanto todo el volumen es aire con el 21% de oxígeno, se han considerado botellas de 750 mL con un diámetro promedio de 20 mm durante un embotellado a 10°C, 15°C o 20°C. Los tapones de rosca pueden introducir un volumen significativo de oxígeno en el espacio de cabeza, excepto si en el espacio inferior al tapón se ha dosificado un gas de inertizado, como nitrógeno, inmediatamente antes de su uso.

Tabla 10.1. Incorporación de oxígeno (mg/L equivalentes) debido al volumen de aire del espacio de cabeza no inertizado en el embotellado a distintas temperaturas a Patm en botellas de 750 mL

Temperatura de embotellado (°C)	Altura del espacio de cabeza (mm)	Volumen espacio de cabeza (mL)	Incorporación de oxígeno (mg/L)
10°	10	3,15	1,21
	15	4,73	1,82
	20	6,30	2,43
	25	7,88	3,03
	30	9,45	3,64
15°	10	3,15	1,19
	15	4,73	1,79
	20	6,30	2,38
	25	7,88	2,98
	30	9,45	3,58
20°	10	3,15	1,17
	15	4,73	1,76
	20	6,30	2,34
	25	7,88	2,93
	30	9,45	3,51

La Figura 10.3 presenta los resultados de las medidas HSO realizadas en las botellas descritas en el apartado anterior de una bodega de Castilla y León. En primer lugar, se observa que en este caso la incorporación de oxígeno por el espacio de cabeza es significativamente más bajo que el proveniente del desplazamiento del vino hasta la embotelladora, unos 1,7 mg/L de forma promediada. En relación con el oxígeno total, la mayor parte de las botellas se embotella con un nivel de oxígeno disuelto entre 2 y 3 mg/L.

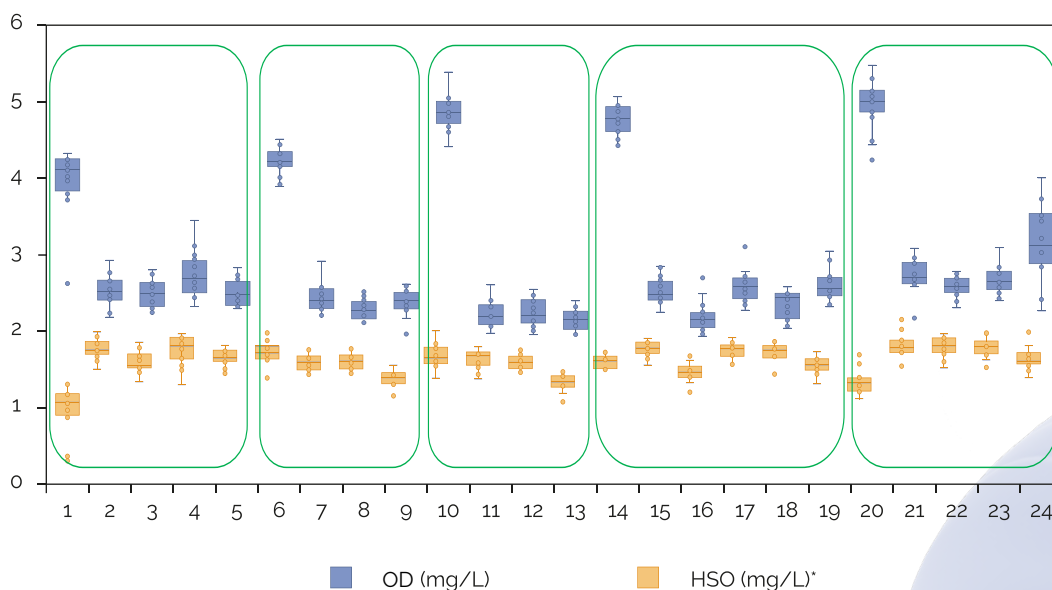


Fig. 10.3. Estudio en 24 momentos diferentes del embotellado de vino blanco en una bodega de Castilla y León, variación del contenido de oxígeno disuelto (mg/L) y del oxígeno en el espacio de cabeza (mg/L).
* mg/L equivalentes, suponiendo que todo el oxígeno se disuelva en el vino

El cálculo de la cantidad de oxígeno que hay en el volumen del espacio de cabeza entre el vino y el tapón, suponiendo que es aire y que está a 1 atm, se realiza atendiendo a la Ley de los Gases ideales descrita en el **Capítulo 1**.

En el caso del primer dato de la *Tabla 10.1*, la altura del espacio de cabeza es de 10 mm y el diámetro de la botella es de 20 mm, datos que permiten calcular el volumen de este espacio.

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

P= presión del oxígeno en el espacio de cabeza (atm).

En este caso el 21% del volumen de aire a 1 atm es oxígeno = 0,21 atm

V= volumen del espacio de cabeza (L)

Este volumen es el del cilindro que tiene una altura de 10mm y un radio de 10 mm = 0,0031 L

n= moles de oxígeno

Conocidos los moles de oxígeno que hay en el espacio de cabeza, se despejan los g sabiendo que 1 mol de oxígeno son 32 g

R = constante 0,0821 atm·L/mol·K

T= temperatura (K)

En este caso la temperatura de embotellado son 10°C = 283 °K

$$0,21 \text{ atm} \cdot 0,0031 \text{ L} = n \text{ (mol)} \cdot 0,0821 \frac{\text{atm} \cdot \text{L}}{\text{mol} \cdot \text{°K}} \cdot 283 \text{ °K}$$

Despejando n (mol):

$$n \text{ (mol)} = \frac{0,21 \text{ atm} \cdot 0,0031 \text{ L}}{0,0821 \frac{\text{atm} \cdot \text{L}}{\text{mol} \cdot \text{°K}} \cdot 283 \text{ °K}} = 0,0284 \cdot 10^{-3} \text{ moles} = 0,0284 \text{ mmoles}$$

Los miligramos de oxígeno en ese volumen del espacio de cabeza son:

$$[\text{O}_2] = 0,0284 \text{ mmoles} \cdot 32 = 0,9097 \text{ mg}$$

Estos miligramos de oxígeno que hay en el espacio de cabeza se transferirán al vino que está en equilibrio con este volumen de gas, ya que el vino consumirá el oxígeno disponible facilitando esta cesión hasta su consumo. Si la botella contiene 750 mL de vino, los 0,9097 mg se transferirán a los 750 mL de vino que contiene la botella, lo que expresado en mg/L serán:

$$\frac{0,9097 \text{ mg}}{0,750 \text{ L}} = 1,213 \text{ mg/L}$$

Además, el nivel de oxígeno en el espacio de cabeza también está determinado principalmente por la eficacia del inertizado (si se realiza) de las botellas vacías antes del llenado o por la adición de gas de inertizado antes del taponado. Todo este oxígeno se transferirá al vino, ya que cuando el oxígeno entra en contacto con el vino se mueve en ambas direcciones hasta que su presión parcial en ambas fases se iguala.

Esto significa que el oxígeno del espacio de cabeza (HSO) se disolverá lentamente en el vino aumentando el oxígeno disuelto (OD). Hay que tener en cuenta que es habitual emplear vacío para evitar la sobrepresión que se produce al taponar, sin embargo, en algunos casos se produce una cierta sobrepresión que provocaría un error en la medida del nivel de oxígeno en el espacio de cabeza. Distintos autores han encontrado una sobrepresión entre 17 y 140 kPa (0,17 – 1,4 bar)¹³ que podría suponer una incorporación de 3,3 mg/L de oxígeno al vino de una botella de 750 mL.

También es importante garantizar el buen mantenimiento de la línea de embotellado, en concreto las

juntas de los cabezales de llenado, que las bombas y conexiones funcionen correctamente y no permitan la entrada de aire. El empleo de gases de inertizado para sustituir el aire del espacio de cabeza permite reducir considerablemente el nivel de oxígeno disuelto hasta valores de 0,2% O₂ o 0,08 mg/L¹, pero esta práctica es válida siempre que la inertización sea correcta.

La mayoría de las líneas de embotellado son capaces de desplazar aproximadamente el 60-80% del oxígeno del espacio de cabeza, hasta niveles de 0,8-1,5 mg/L. La evaluación del oxígeno en el espacio de cabeza en botellas procedentes de distintos embotellados se representa en la *Figura 10.4*, cada columna refleja el valor promedio de oxígeno en el espacio de cabeza de ese momento de embotellado, y la desviación estándar nos indica la variabilidad debida al uso de los distintos caños de la embotelladora. Se observa que la incorporación de oxígeno por esta vía varía según el proceso de embotellado, mostrando en la mayoría de los casos menos de 2 mg/L equivalentes, excepto en dos casos con valores superiores a 2,5 mg/L.

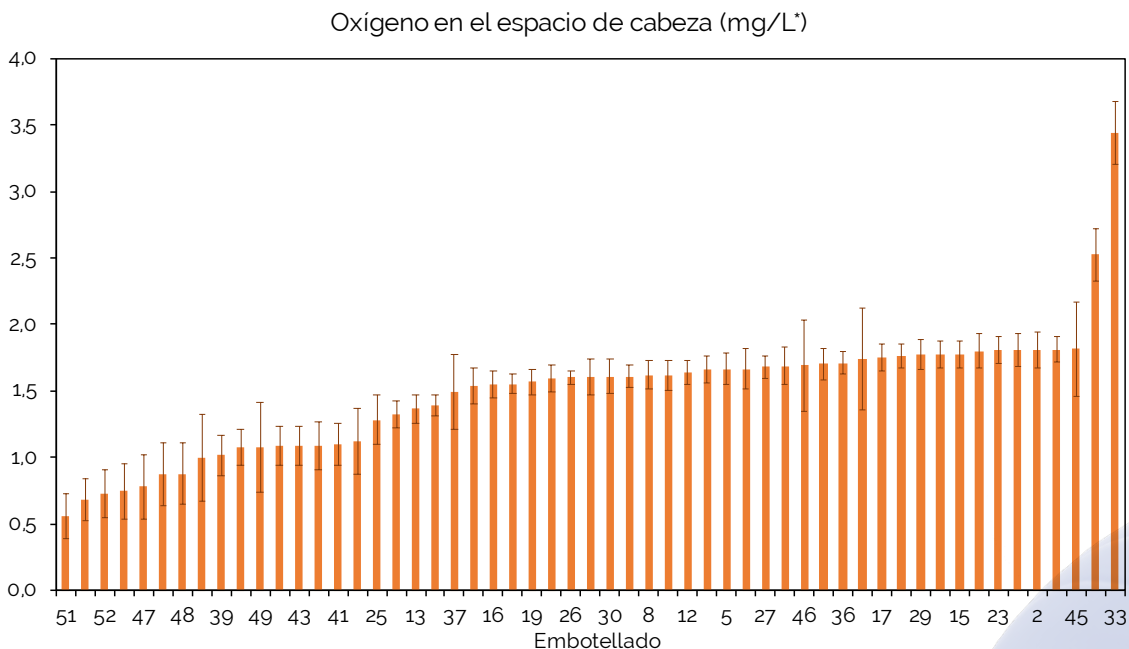


Fig. 10.4. Nivel de oxígeno en el espacio de cabeza de botellas en distintos embotellados, * mg/L equivalentes, suponiendo que todo el oxígeno se disuelva en el vino

El resultado de la suma del oxígeno disuelto y del oxígeno del espacio de cabeza nos indica el oxígeno total disponible en la botella para el vino recién embotellado TPO.

Los resultados de las medidas tomadas en distintos embotellados realizados en bodegas de Castilla y León frente a bodegas de toda Europa ⁵ y Estados Unidos ⁶ se presentan en la *Figura 10.5*.

Se observa que el promedio de oxígeno total (TPO) disponible en la botella para el vino recién embotellado está en 4 mg/L y que la mayor parte proviene del oxígeno disuelto en el vino, que supone de media 2.4 mg/L y representa el 60% del total.

Se han encontrado niveles de 2,5 – 3,0 mg/L en el 65% de los embotellados, por encima de 3 mg/L en el 12% de los casos y por debajo de 1 mg/L en el 23% de los embotellados, lo que refleja la importancia del control de las incorporaciones de oxígeno en las operaciones previas al embotellado.

El oxígeno en el espacio de cabeza supone un 40% del oxígeno total con un valor medio de 1,6 mg/L, que en algunos casos alcanza valores superiores a 3 mg/L, pero que generalmente varía entre 1-2 mg/L (*Figura 10.5a*). Respecto a la situación en Europa (*Figura 10.5b*) o USA (*Figura 10.5c*), en las bodegas de Castilla y León los valores son más elevados y en todos los casos el mayor aporte de oxígeno proviene del oxígeno disuelto que alcanza el vino durante el embotellado.

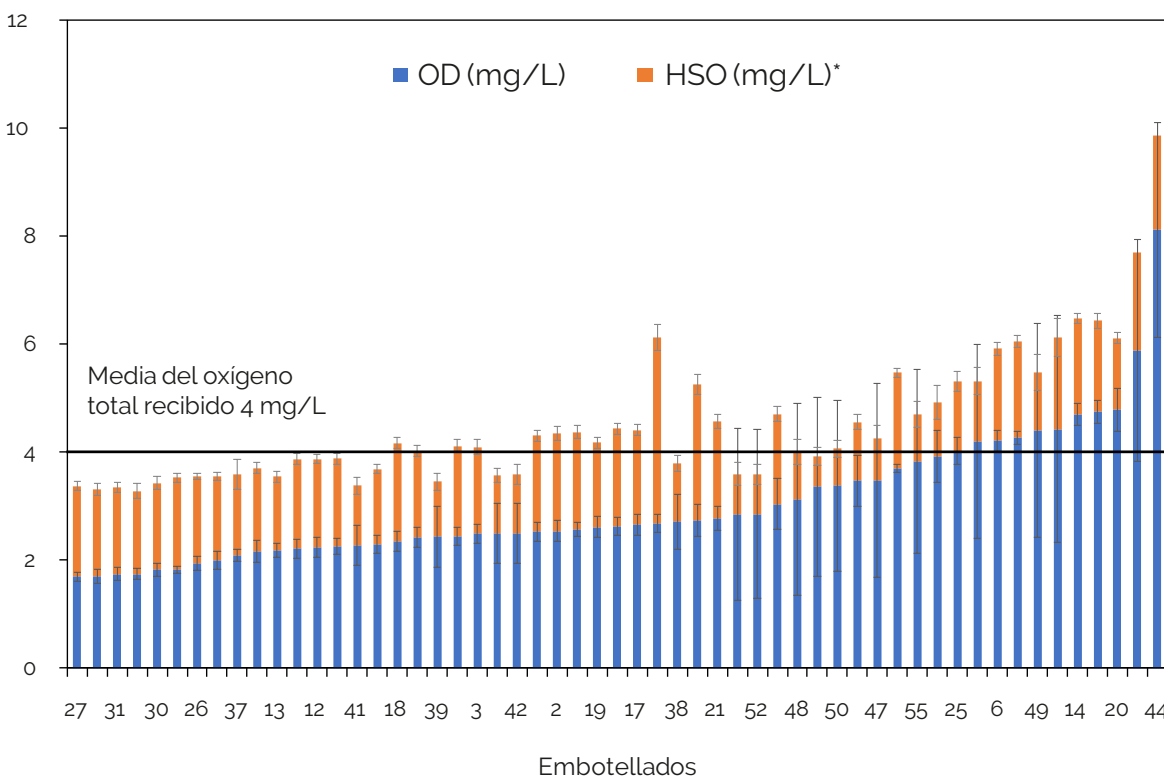


Fig. 10.5a. Nivel de oxígeno recibido por el vino embotellado en bodegas de Castilla y León

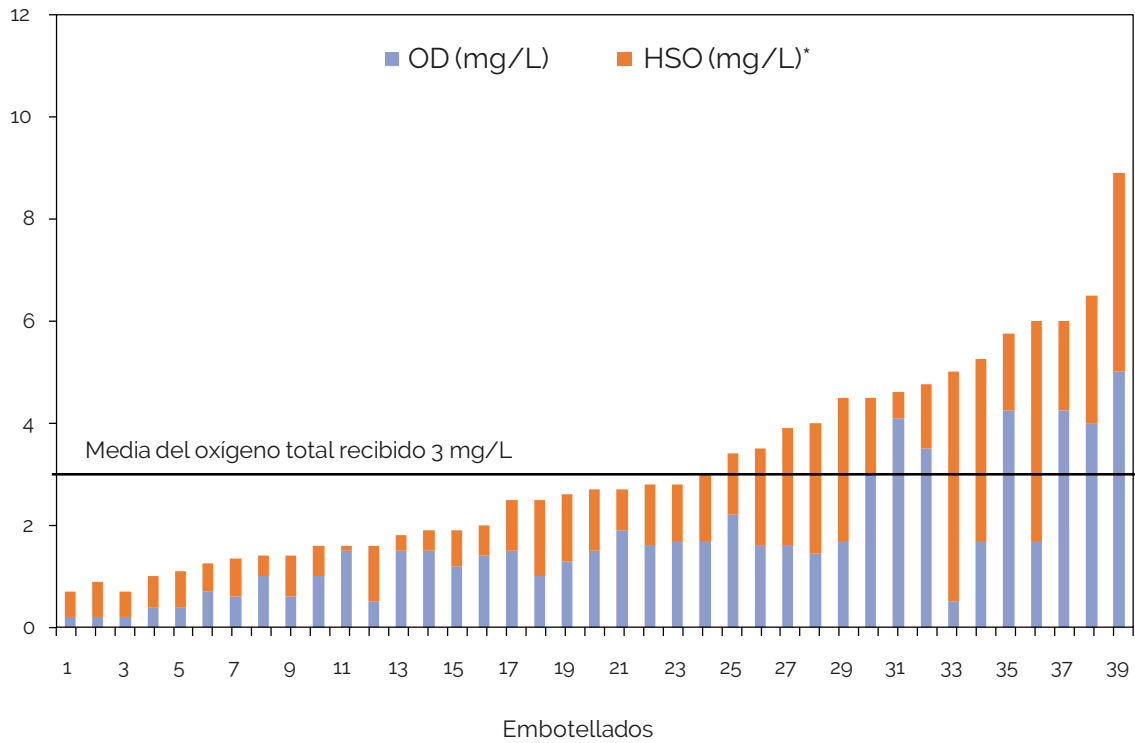


Fig. 10.5b. Nivel de oxígeno recibido por el vino embotellado en bodegas de Europa (modificado de Vinventions ⁵⁾)

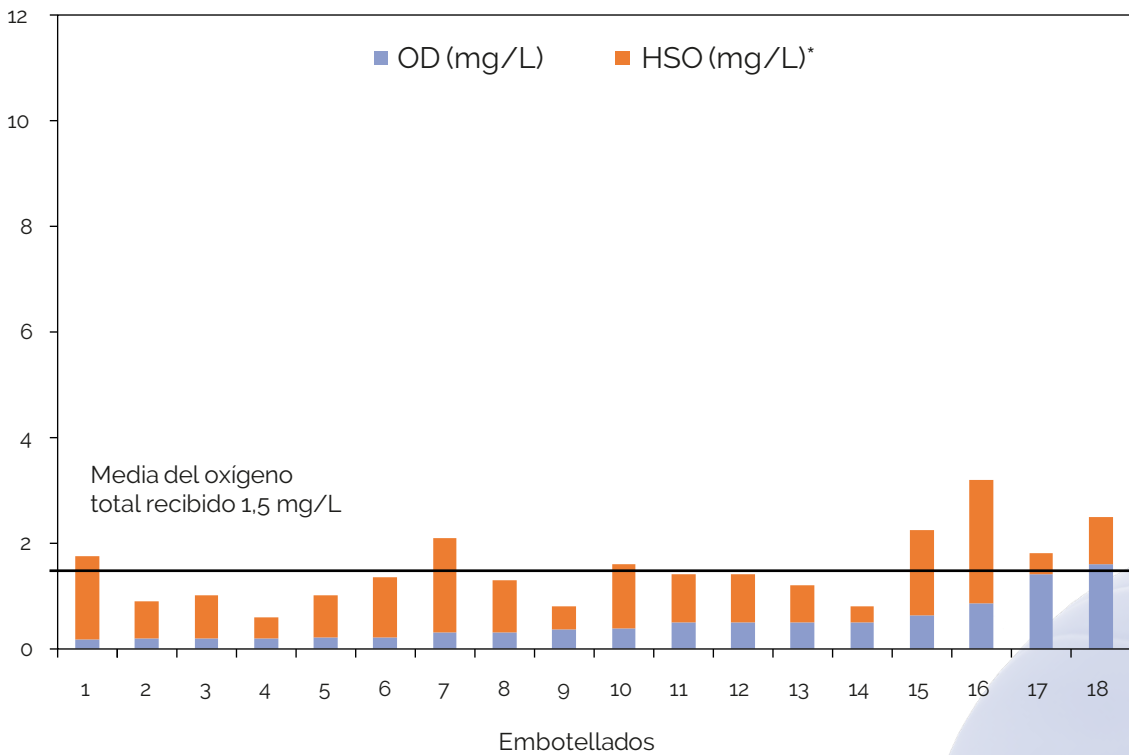


Fig. 10.5c. Nivel de oxígeno recibido por el vino embotellado en bodegas de USA (modificado de Vinventions ⁵⁾)

10.4.- El oxígeno que entra por el tapón

Cuando se embotella, además del oxígeno que lleva el vino y el que se incorpora en el llenado (OD) y el que hay en el volumen del espacio de cabeza (HSO), también se debe tener en cuenta el oxígeno que tiene el tapón en su estructura. Este oxígeno atrapado en las lenticelas del corcho de los tapones o en la estructura de tapones de otros materiales difunde, en las primeras semanas tras el embotellado hacia el espacio de cabeza, si la botella está en posición vertical, o hacia el vino si la botella está en posición horizontal. Los mecanismos que regulan esta difusión no están claros, pero lo que sí es conocido es que esta difusión se debe al gradiente de presión parcial de oxígeno a ambos lados del tapón ^{7,8}.

Inicialmente, cuando se emplea un tapón de corcho o sintético, el aporte fundamental será el que proviene de la desgasificación del tapón y no a través del tapón. Posteriormente, debido a la diferencia de concentración a ambos lados del tapón, el oxígeno seguirá difundándose por el tapón hacia el espacio de cabeza (botellas en posición vertical)

debido a que el oxígeno en HSO está en continua disolución y consumo por parte del vino, alcanzándose así una situación de estado estacionario que define la tasa de entrada de oxígeno por el tapón. Esta cantidad de oxígeno depende de la OTR del tapón, es decir la cantidad de oxígeno del aire que por unidad de tiempo atraviesa el tapón para llegar a incorporarse al vino, y se expresa en mg/L.año, mL/L.año, cm³/L.año...⁹. La suma de este aporte de oxígeno durante un determinado tiempo a los aportes descritos anteriormente será la cantidad de oxígeno a la que ha sido expuesto el vino en ese tiempo y determinará las reacciones que definan las características del vino en el tiempo.

La suma de todos estos aportes da lugar al oxígeno total que recibe el vino embotellado durante su permanencia en botella, y sigue una tendencia como la que se indica en la *Figura 10.6*, definida por Skouroumounis y Waters ¹⁰ por tres etapas que reflejan las diferentes fases de entrada de oxígeno a través y desde el tapón, así como la contribución del HSO (*Figura 10.6*).

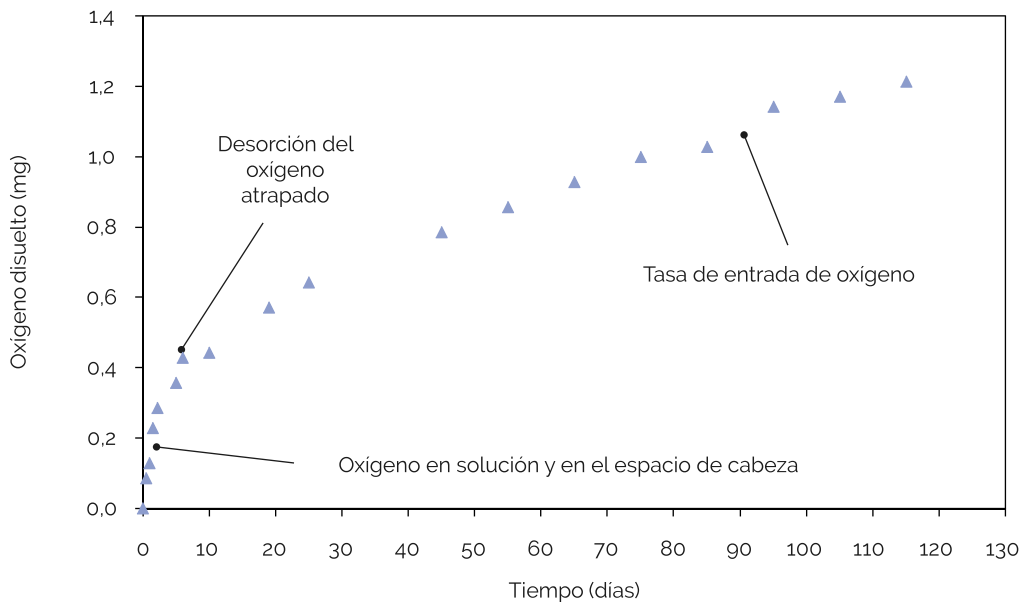


Fig. 10.6. Entrada de oxígeno en una botella de vino de 375 mL sellada con un tapón sintético durante su almacenamiento a 18°C (Modificado de Skouroumounis ¹⁰)

La tasa de entrada de oxígeno por el cierre hacia el vino (OTR) es un aspecto de gran interés, sin embargo, la mayoría de los fabricantes de cierres no incluyen esta información y la documentación existente no es comparable, ya que además de usar diferentes unidades para expresar el OTR de los cierres, los sistemas y procedimien-

tos de medida empleados también son distintos, lo que impide la comparativa entre los datos publicados.

Cuando la botella se guarda en posición vertical el oxígeno del aire atraviesa el tapón llegando al espacio de cabeza y posteriormente se disuelve en el vino, mientras que si la botella está en posición horizontal el oxígeno que atraviesa el tapón se encuentra directamente con el vino. Por lo tanto, es importante indicar que el oxígeno que llega al vino varía

según esté la botella almacenada, horizontal o verticalmente, ya que, si el vino inunda unos milímetros de tapón, se reducirá significativamente la difusión del oxígeno del aire. La difusividad del oxígeno en el aire es cuatro órdenes de magnitud superior que en el agua, explicándose así la reducción de la tasa de entrada de oxígeno en los tapones de corcho cuando se mantienen las botellas en posición horizontal¹¹, reducción que según los casos alcanza el 20% en corcho natural y casi del 100% en tapón técnico.

10.5.- Medida del oxígeno en el vino embotellado

La medida del oxígeno que tiene disponible el vino en la botella es la suma del oxígeno que tiene disuelto (OD) y el oxígeno que hay en el espacio de cabeza (HSO) y que pasará al vino. Como se ha mencionado en el **Capítulo 1** hay diferentes métodos para medir el oxígeno, siendo el método luminiscente el más recomendado para medir la evolución del oxígeno en el vino embotellado, ya que permite realizar las medidas sin alterar el vino ni abrir la botella.

Existen en el mercado diferentes soluciones para medir el oxígeno tanto en el espacio de cabeza como en el seno del vino, para ello es necesario

haber colocado los sensores correspondientes en el interior de la botella antes de llenarla de vino¹²⁻¹⁴. Estos sistemas de medida fotoluminiscentes aprovechan el principio de "apagado" de la luminiscencia de algunos materiales en presencia de oxígeno. Dependiendo del material luminóforo se empleará un haz de luz determinado que al incidir sobre el sensor provocará una respuesta, y en presencia de oxígeno esta respuesta se verá reducida y retardada. Cada fabricante ofrece distintos sensores para medir oxígeno en distintos rangos de concentración. La *Figura 10.7* muestra un esquema de la disposición de sensores para la medida del oxígeno disuelto y del espacio de cabeza.

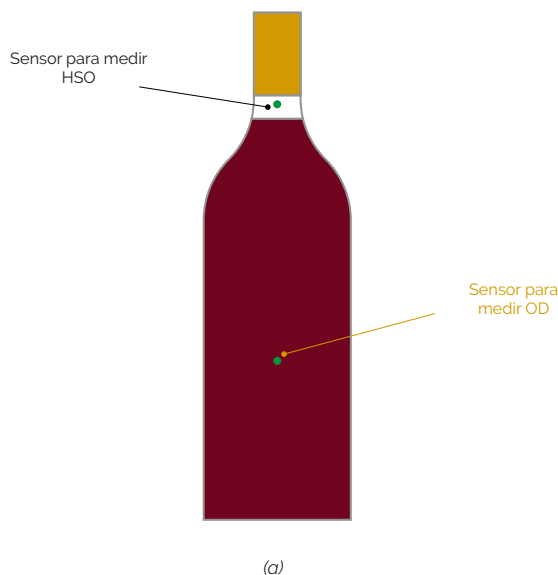


Fig. 10.7. Detalle de la posición de dos sensores para medir el oxígeno disuelto en espacio de cabeza y en el vino de la botella (a) y detalle de la medida del oxígeno disuelto en el vino (b)

10.5.1.- Medida del oxígeno disuelto en el vino

El oxígeno disuelto que tiene el vino en la botella se mide directamente, ya que los equipos disponibles permiten obtener la medida en mg/L. Sin embargo, es muy importante recordar que la medida directa es en presión parcial de oxígeno (hPa) y que cada equipo lo transforma en mg/L teniendo en cuenta la temperatura y la presión atmosférica, y admitiendo que la solubilidad del oxígeno en el vino es la misma que en el agua, algo que tal y como se ha descrito en el [Capítulo 1](#) se sabe que no es correcto. Además, algunos equipos tienen en cuenta la presencia de interferencias como el contenido en fenoles, alcohol, azúcares... para realizar la corrección necesaria y ofrecer directamente la medida de oxígeno disuelto en mg/L (más información en el [Capítulo 1](#)).

10.5.2.- Medida en el espacio de cabeza

La medida del oxígeno que hay en el espacio de cabeza se corresponde con la de la presión parcial (hPa) del oxígeno en ese volumen a una determinada temperatura y presión. La transformación de esa medida a mg/L se realiza teniendo en cuenta que el oxígeno se comporta como un gas ideal y que el oxígeno del espacio de cabeza se disolverá completamente en un volumen de vino (botella de 750 mL por ejemplo), incorporando una cantidad de oxígeno expresada en mg/L.¹⁰

Ley de los gases ideales $PV = n \cdot R \cdot T$, permite conocer los mg que hay en el espacio de cabeza:

P = presión parcial de oxígeno en el espacio de cabeza en atm

V = volumen del espacio de cabeza en dm³ o litros

n = cantidad de oxígeno en mol (1 mol de oxígeno son 32 g)

R = constante del gas 0,0821 atm.L / mol.K

T = temperatura absoluta en K (°C + 273,15)

Por ejemplo, en la *Tabla 10.2* se muestran algunos datos de un embotellado a distintas temperaturas en botellas de 750 mL con diámetro de 20 mm, con diferentes espacios de cabeza, indicándose las medidas de presión parcial obtenidas considerando que las botellas no están presurizadas (por encima de la presión atmosférica). La última columna indica el resultado en mg/L teniendo en cuenta todos los factores y realizando el cálculo descrito en la *Tabla 10.1*.

Tabla 10.2. Cálculo de la incorporación de oxígeno (mg/L) en el espacio de cabeza

N° botella	Diámetro del cuello de la botella (mm)	Altura del espacio de cabeza (mm)	Volumen del espacio de cabeza (L)	Tª embotellado (°C)	Volumen de vino en la botella (L)	Medida de oxígeno en el espacio de cabeza (hPa)	Oxígeno en el espacio de cabeza que pasará al vino (mg/L)
1	20	20	0,00628	16	0,75	15	0,168
2	20	30	0,00942	16	0,75	15	0,251
3	20	40	0,01257	16	0,75	15	0,335



10.6.- Buenas prácticas en el embotellado

El movimiento del vino desde el depósito origen hasta el depósito de la embotelladora debe realizarse tomando las siguientes precauciones:

- Inertizar el depósito destino y acompañar al vino del depósito que se vacía con una capa de gas de inertizado (ver [Capítulo 6](#))
- Reducir el número de conexiones en el recorrido del vino hacia la embotelladora
- Reducir turbulencias y uso de bombas centrífugas
- Uso de mangueras y juntas en buen estado
- Control y apriete adecuados de las conexiones de los racores para eliminar las fugas, sobre todo en el lado de aspiración, donde el vino no saldrá, pero sí entrará aire.

Para reducir el aumento del oxígeno disuelto del vino en la embotelladora

- Revisar todas las juntas de la línea de embotellado
- Mantener una velocidad suficiente en la línea de embotellado evitando parones

- Poner una capa de gas de inertizado sobre el vino del depósito de la llenadora
- Inertizar la línea de embotellado
- Usar vacío
- Inertizar las botellas
- Llenar las botellas con vino a flujo rápido, pero no turbulento

Para reducir la incorporación de oxígeno en el espacio de cabeza de la botella

- Optimizar las condiciones de cierre, botella, velocidad, altura de llenado, vacío e inertización
- Ajustar correctamente el tapón
- Inyectar gas de inertizado en el espacio de cabeza evitando turbulencia
- Aplicar vacío en el taponado
- Evitar una presión elevada bajo el tapón ajustando la temperatura y el nivel de llenado
- Aplicar gas de inertizado al tapón de rosca antes de usarlo
- Permitir la evaporación completa del nitrógeno líquido antes de poner el tapón de rosca

10.7.- Referencias

1. Reeves, M. J. Food Packaging and Shelf: Life A Practical Guide, 1st Editio.; Gordon L. Robertson, Ed.; 2009.
2. O'Brien, V.; Nygaard, M. Managing Oxygen Ingress at Bottling. *Pract. Winer. Vineyard* 2009, No. July/August, 23–28.
3. Kontoudakis, N.; Biosca, P.; Canals, R.; Fort, F.; Canals, J. M.; Zamora, F. Impact of Stopper Type on Oxygen Ingress during Wine Bottling When Using an Inert Gas Cover. *Aust. J. Grape Wine Res.* 2008, 14 (2), 116–122.
4. Levreau, R.; Lefebvre, A.; Serrano, M.; Ribéreau-Gayon, P. Etude Du Bouchage Liège. 1. Rôle Des Surpressions Dans l'apparition Des « bouteilles Couleuses ». *Bouchage Sous Gaz Carbonique* . *OENO One* 1977, 11 (4), 351. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.1977.11.4.1453>.
5. Vinventions. Average Bottling Performance in Europe. <https://view.publitas.com/vinventions/book-de-presentation>.
6. Hend Letaief. Key Points of the Bottling Process. *Wines&Vines* 2016, No. May.
7. Gordon, J. New Study Measures the Dramatic Release of O₂ from Stoppers Post-Bottling. *Wine Bus. Mon.* 2019, No. May, 42–46.
8. Lagorce-Tachon, A.; Karbowiak, T.; Simon, J.-M.; Gougeon, R.; Bellat, J.-P. Diffusion of Oxygen through Cork Stopper: Is It a Knudsen or a Fickian Mechanism? *J. Agric. Food Chem.* 2014, 62 (37), 9180–9185. <https://doi.org/10.1021/jf501918n>.
9. Crouvisier-Urien, K.; Bellat, J. P.; Gougeon, R. D.; Karbowiak, T. Gas Transfer through Wine Closures: A Critical Review. *Trends Food Sci. Technol.* 2018, 78 (March), 255–269. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.05.021>.
10. Skouroumounis, G.; Waters, E. Oxygen Ingress into Bottled Wine. *Pract. Winer. Vineyard* 2008, No. July/August, 1–4.
11. Lopes, P.; Saucier, C.; Glories, Y. Nondestructive Colorimetric Method To Determine the Oxygen Diffusion Rate through Closures Used in Winemaking. *J. Agric. Food Chem.* 2005, 53 (18), 6967–6973. <https://doi.org/10.1021/jf0404849>.
12. Pyroscience. Laboratory oxygen meters. <https://www.pyroscience.com/en/>.
13. Presens. Oxygen meter <https://www.presens.de/>.
14. Vinventions. Wine quality solutions <https://www.winequalitysolutions.com/es-es/analyzeurs>.



Capítulo 11

Diagnósticos en bodegas de Castilla y León

María Asensio Cuadrado, María del Álamo Sanza,
Rubén del Barrio Galán e Ignacio Nevares Domínguez
Grupo UVaMOX- Universidad de Valladolid



Introducción

Casos prácticos: A- TRASIEGOS

A.1 - Incorporación de oxígeno durante el trasiego largo de vino Verdejo

A.2 - Incorporación de oxígeno durante el trasiego de vino Verdejo a 7 depósitos con diferentes niveles de llenado

A.3 - Incorporación de oxígeno durante un trasiego y filtración con nitrógeno

A.4 - Incorporación de oxígeno durante el trasiego de vino Tempranillo con diferentes gases de inertizado

A.5 - Incorporación de oxígeno durante un trasiego con inertización completa

A.6 - Incorporación de oxígeno durante el vaciado de barricas con y sin inertizado

A.7 - Incorporación de oxígeno durante un trasiego con diferentes modos y gases de inertizado

A.8 - Comparación del nivel de inertizado durante un trasiego de vino Tinta de Toro

A.9 - Incorporación de oxígeno durante un trasiego con transporte en cisterna entre bodegas

Casos prácticos: B- EMBOTELLADO

B.1 - Incorporación de oxígeno en un vino Verdejo durante el trasiego y embotellado con inyección de CO₂

B.2 - Incorporación de oxígeno durante el trasiego con inyección de N₂ y filtración a vacío en el embotellado de vino Verdejo I

B.3 - Incorporación de oxígeno durante el trasiego con inyección de N₂ y filtración a vacío en el embotellado de vino Verdejo II

B.4 - Incorporación de oxígeno durante el trasiego con cobertura de N₂ y embotellado con vacío e inyección de N₂ de vino Verdejo

B.5 - Incorporación de oxígeno durante el trasiego y embotellado con inyección de CO₂ de vino Verdejo

B.6 - Incorporación de oxígeno durante el trasiego con cobertura de N₂ con bomba y gravedad para el embotellado con inyección de N₂ de vino Tinta de Toro

B.7 - Incorporación de oxígeno durante el trasiego inertizado y embotellado de vino tinto Tempranillo

B.8 - Incorporación de oxígeno durante el trasiego sin inertización y embotellado de vino tinto Tempranillo

B.9 - Incorporación de oxígeno durante el trasiego y embotellado con inyección de N₂ de vino tinto Tempranillo

Casos prácticos: C- OTROS ENSAYOS

C.1 - Inertizado y caracterización del OTR de un depósito de acero inoxidable

Introducción

Este capítulo recoge los resultados obtenidos de las medidas realizadas en bodegas de Castilla y León durante el desarrollo de diferentes operaciones de movimiento de vinos y/o embotellado.

El seguimiento de la variación de los niveles de oxígeno disuelto o la eficacia de diferentes tratamientos con gases de inertizado se ha realizado mediante los sistemas de flotador descritos en el **Capítulo 6** y que se resumen en la *Figura 11.1*. Estos sistemas se han empleado para el seguimiento de los trasiegos entre depósitos o del movimiento del vino hasta la embotelladora (**apartado A**), con el fin de conocer los aportes de oxígeno provenientes del empleo de distinto equipamiento o de la realización de diferentes operaciones.

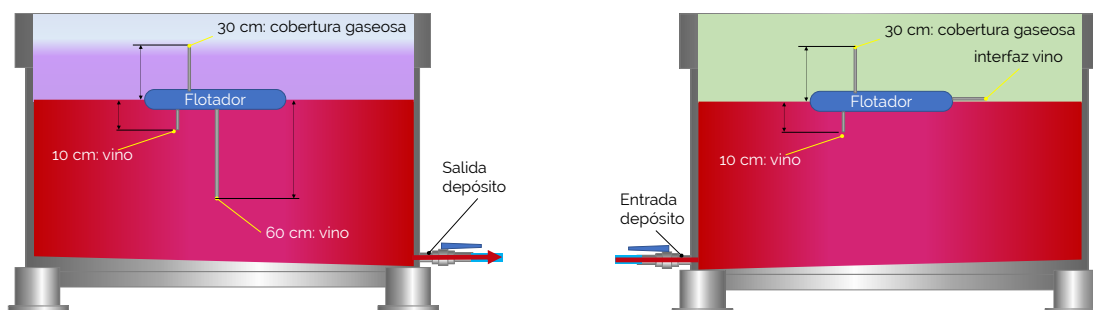


Fig. 11.1: Detalle de los flotadores utilizados, así como los puntos de medida tanto en el vino como en la capa gaseosa por encima del vino

En todos los casos de diagnósticos de embotellado se presentan los datos del oxígeno que reciben los vinos en las distintas situaciones de embotellado (**apartado B**). Para ello, se ha contado con botellas de las mismas características que las habitualmente empleadas en cada bodega en estudio, pero transparentes y provistas de sensores para la medida del oxígeno. Se midió la presión parcial de oxígeno (hPa) tanto en el vino (oxígeno disuelto, OD) como en el espacio de cabeza (HSO). Teniendo en cuenta las condiciones de presión, temperatura y suponiendo la solubilidad del oxígeno en el agua, los datos se transformaron en mg/L de oxígeno disuelto en el vino (OD) y en **mg/L* del HSO, que indican el contenido en oxígeno que pasaría al vino si se disolviese todo el oxígeno del espacio de cabeza en el vino**. La suma del contenido en oxígeno de ambas partes indica el oxígeno total recibido por el vino en el embotellado (TPO) (ver **Capítulos 1 y 9**).

El estudio de cada embotellado se ha realizado incluyendo un número de botellas igual o superior al número de caños de la embotelladora con el fin de evaluar la variabilidad en la incorporación de oxígeno

no disuelto al vino debido al caño empleado. Además, en el caso de disponer de distintos puntos de taponado, se ha realizado la evaluación de la misma forma para conocer la variabilidad del nivel del oxígeno disuelto en el espacio de cabeza debido al empleo de los distintos puntos de taponado. Con el fin de evaluar el efecto del vaciado del depósito origen en la mayor o menor incorporación de oxígeno en el vino, se han realizado medidas durante todos los días de embotellado y en distintos momentos de cada jornada de embotellado.

Finalmente, con los datos de las botellas por hora y el conocimiento de las incorporaciones de oxígeno en los distintos momentos, se ha estimado el promedio del oxígeno total recibido por el vino embotellado en cada caso.

En la parte final del capítulo (**apartado C**) se recoge la inertización de un depósito de acero inoxidable y la caracterización de la entrada de oxígeno. En ese caso se utilizaron 8 sondas colocadas en posiciones fijas y permitió ver las entradas de oxígeno atmosférico.

Casos prácticos: A- TRASIEGOS

A.1. - Incorporación de oxígeno durante el trasiego largo de vino Verdejo

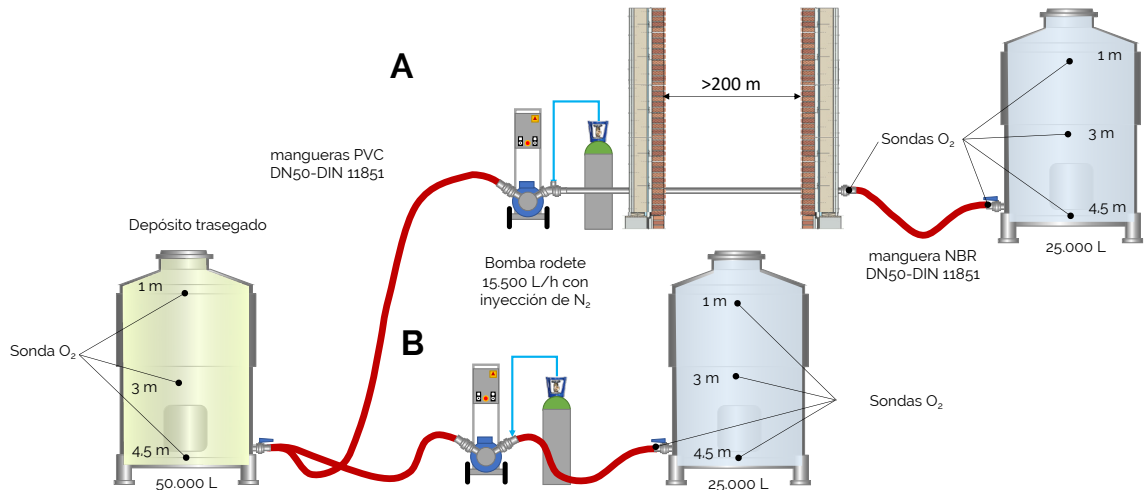


Fig. A.11: Esquema de la situación inicial del trasiego de 50.000 litros de un vino de la variedad Verdejo a dos depósitos diferentes en situaciones y condiciones distintas. Este trasiego duró 1 día, con unas condiciones de trabajo de 15,2 °C y 926 mbar de presión atmosférica

Se monitorizó el trasiego de 50.000 litros de vino de la variedad Verdejo a dos depósitos de 25.000 litros. El primer trasiego se hizo a un depósito situado en la sala de embotellado situada en un edificio diferente, ya que a medida que se trasegaba se iba embotellando (Figura A.11.A). El segundo trasiego se realizó a un depósito situado en la misma sala de depósitos que el trasegado (Figura A.11.B). Las sondas de oxígeno estaban situadas a diferentes alturas fijas en los depósitos.

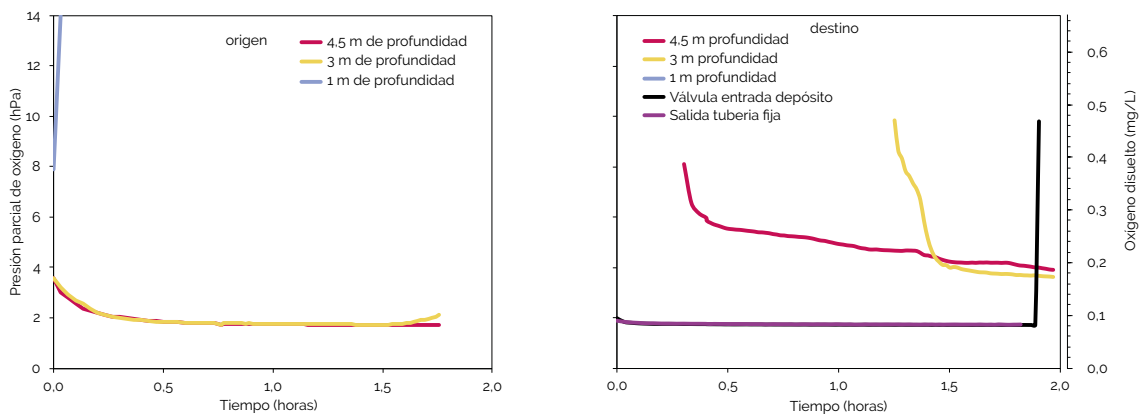


Fig. A.12: Evolución del oxígeno disuelto en diferentes puntos de los depósitos origen y destino durante el primer trasiego (Fig. A.11.A)

En el primer trasiego, el oxígeno disuelto promedio en el depósito origen de 50.000 litros fue de 0,1 mg/L, alcanzando unos valores medios un poco más altos para el segundo trasiego realizado, debido a que el vino estuvo en contacto más tiempo con el aire atmosférico del espacio gaseoso por encima del vino. Se observa como a medida que desciende el nivel de vino la sonda a 1 m se queda fuera del vino (Figura A.12). El vino trasegado llega a la sala por la tubería fija y entra en el depósito destino sin incorporar una cantidad de oxígeno

destacable. Se aprecia como la sonda en el fondo del depósito destino (4,5 m) entra en contacto con el vino tras 0,3 h con valores de hasta 0,3 mg/L. Este incremento se debe a la incorporación del oxígeno del aire que llena el depósito vacío y que con el uso de un gas de inertización se habría minimizado. A lo largo del trasiego este nivel de oxígeno del vino trasegado baja hasta 0,2 mg/L, nivel en el que se mantiene hasta el final (Figura A.1.2).

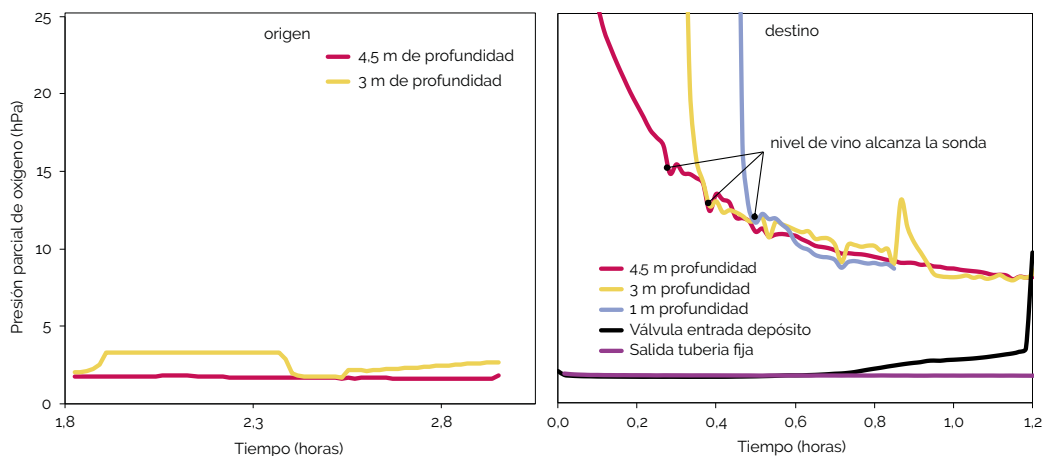


Fig. A.1.3: Evolución del oxígeno disuelto en diferentes puntos de los depósitos origen y destino durante el segundo trasiego (Fig. A.11B)

En el trasiego de los últimos 25.000 litros de vino se observa que, en la válvula de entrada al depósito, el OD es de 0,1 mg/L (Figura A.1.3), sin embargo, el OD promedio dentro del depósito origen alcanzó unos valores desde 0,6 hasta 0,4 mg/L. Por lo tanto, el incremento de oxígeno disuelto de forma promediada fue de 0,4 mg/L, algo más del doble que en el primer trasiego. Los niveles de incorporación de oxígeno del segundo trasiego se explican en parte por una mayor incorporación de oxígeno en el depósito origen, debido a una mayor permanencia con una capa de aire por encima del vino.

A.2. - Incorporación de oxígeno durante el trasiego de vino Verdejo a 7 depósitos con diferentes niveles de llenado

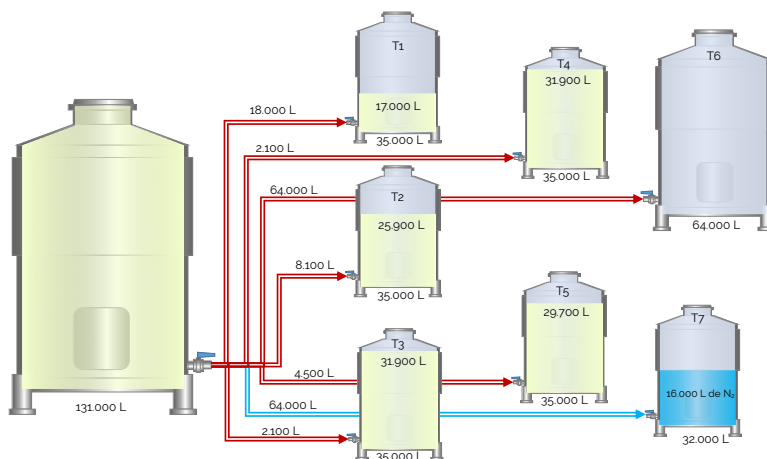


Fig. A.2.1: Esquema de la situación inicial del trasiego de 131.000 litros de un vino de la variedad Verdejo a siete depósitos diferentes en situaciones distintas. Este trasiego duró 2 días, con unas condiciones de trabajo de 18,5 °C y 931 mbar de presión atmosférica

La *Figura A.2.1* detalla las condiciones de llenado de los diferentes depósitos destino. Los 5 primeros movimientos de vino (T1 a T5) se realizaron a depósitos de 35.000 litros que ya contenían vino con diferentes niveles de llenado. Los trasiegos T6 y T7 se realizaron a depósitos vacíos de 64.000 y 32.000 litros respectivamente, en el T6 el depósito destino no se inertizó, mientras que para el T7 se inyectó la mitad del volumen del depósito de nitrógeno por su parte inferior para su inertización por cobertura (*Capítulo 6*).

En el depósito origen y destino de cada trasiego, mediante los dispositivos flotantes con sondas descritos en la introducción de este capítulo, se registraron los niveles de oxígeno disuelto (OD) en distintos puntos del vino y en el espacio gaseoso por encima de la superficie del vino, aire en este caso.

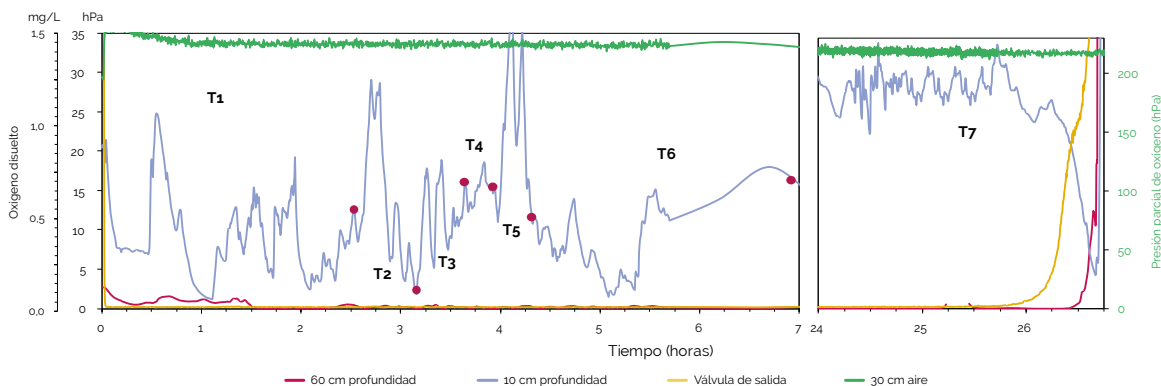


Fig. A.2.2. Evolución del oxígeno medido en el vino de la variedad Verdejo del depósito de origen de 131.000 litros (cada punto rojo indica la finalización del trasiego correspondiente y en la escala del eje derecho refleja hPa a 30 cm de la superficie del vino)

En la *Figura A.2.2*, se observa cómo, a medida que avanza el trasiego a los diferentes depósitos, la sonda a 10 cm por debajo de la superficie del vino muestra un incremento de entre 0,05 y 2 mg/L de oxígeno disuelto. Esto es debido a que a medida que el depósito se va vaciando, el espacio de cabeza con aire atmosférico va aumentando.

Cuando la bomba arranca al comienzo del siguiente trasiego se produce la incorporación de aire en el vino; algo que se minimizaría mediante una cobertura de un gas de inertizado que acompañe al vino durante todo el trasiego (*Capítulo 6*). Durante el periodo sin actividad entre ambas jornadas de trabajo en el vino del depósito origen, con un espacio de cabeza de aire, se produce una lenta incorporación de oxígeno atmosférico que se refleja en la sonda sumergida 10 cm en el vino.

La *Figura A.2.3* presenta la evolución del oxígeno disuelto en los diferentes depósitos destino de 35.000 litros parcialmente llenos. Los niveles de oxígeno en el vino medidos en la válvula de entrada, de cada depósito en cada trasiego, muestra niveles muy bajos de OD, es decir el vino llega a cada depósito con poco oxígeno, menos de 3 hPa.

Sin embargo, el oxígeno indicado por la sonda situada justo bajo la superficie del vino muestra valores de hasta 25 hPa, lo que refleja la incorporación del oxígeno durante el llenado de todos depósitos destino. Se observa que, en el T1, al ser el depósito con menos vino inicial, el vino registró unos valores promedio de 0,5 mg/L. En cambio, en el trasiego 4, el vino obtuvo los valores más bajos de oxígeno disuelto, siendo estos de 0,2 mg/L.

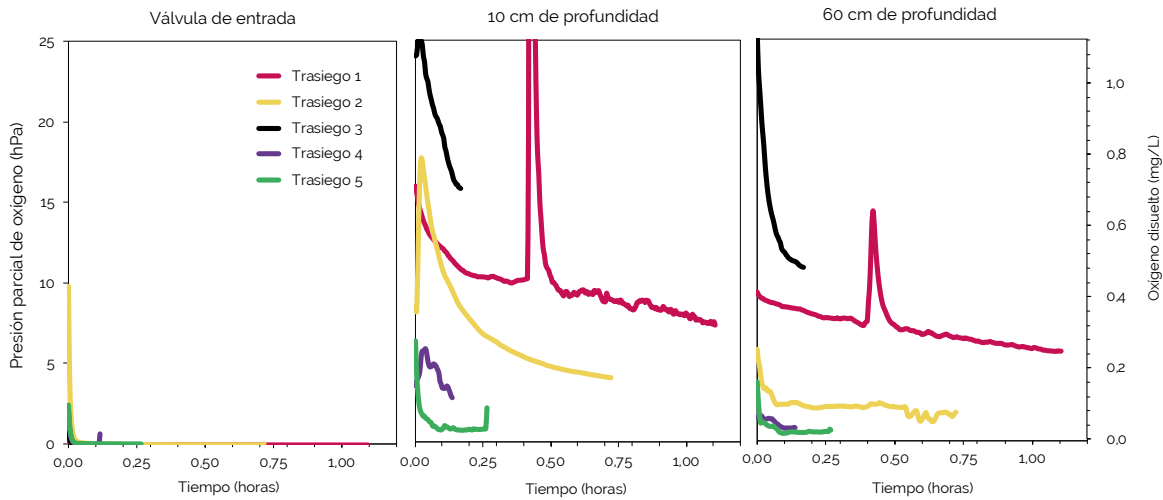


Fig. A.2.3. Evolución del oxígeno medido en el vino a distintas profundidades en los depósitos destino de 35.000 litros con diferentes niveles de llenado

La Figura A.2.4 representa la evolución del OD en los depósitos destino que estaban vacíos inicialmente. Se observa la diferencia que supone inertizar el depósito destino (T7) frente a mantenerlo con aire (T6). Los valores de oxígeno disuelto en el vino en el depósito sin inertizar alcanzaron hasta casi 1 mg/L durante el trasiego, aproximadamente entre el doble y el triple que en el T7, donde apenas superaron 0,3 mg/L.

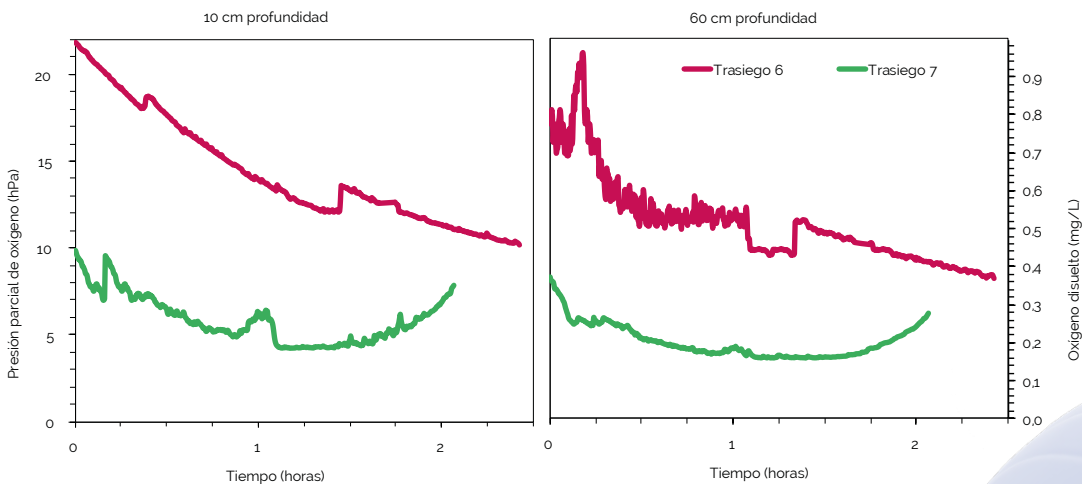


Fig. A.2.4. Evolución del oxígeno medido en el vino a distintas profundidades en los depósitos destino de 64.000 litros vacíos con diferentes niveles de llenado

A.3 - Incorporación de oxígeno durante un trasiego y filtración con nitrógeno

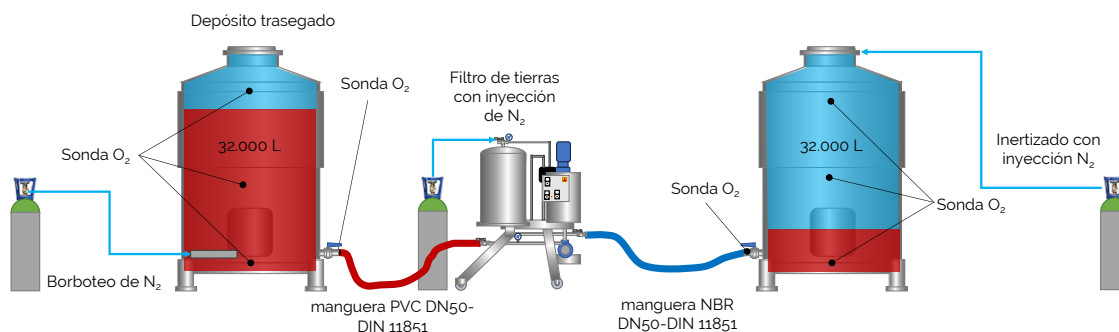


Fig. A.3.1. Esquema general de los cuatro trasiegos realizados con filtrado y nitrógeno

La *Figura A.3.1* muestra la disposición de los diferentes elementos con los que se realizaron los cuatro trasiegos llevados a cabo en un vino de la variedad *Tempranillo* entre depósitos de 32.000 litros. Los dos primeros movimientos de vino (T1 y T2) se llevaron a cabo sin realizar ningún tipo de inertización. El trasiego T3 se realizó inyectando N_2 al depósito destino antes de su llenado durante 10 minutos, por la tapa superior y sin controlar el caudal y la presión. En el trasiego T4 se borboteó N_2 en el vino del depósito origen, y el depósito destino se inertizó con N_2 durante 20 minutos inyectado por la parte inferior del depósito a un caudal de 4 m^3/h y a una presión de 2,7 bar, lo que supuso la incorporación de 3.600 litros de N_2 para el inertizado del depósito destino. En todos los trasiegos se realizó un filtrado del vino entre el depósito origen y el destino. Durante el filtrado, el sistema de filtración incorporaba N_2 de manera discontinua. Las condiciones de presión y temperatura de trabajo en cada trasiego se detallan en la *Tabla A.3.1*.

Tabla A.3.1. Condiciones ambientales de trabajo en cada uno de los trasiegos realizados

Trasiego	Presión atmosférica (mbar)	Tª vino (°C)
1	926	13,8
2	926	15,0
3	923	14,0
4	926	14,0

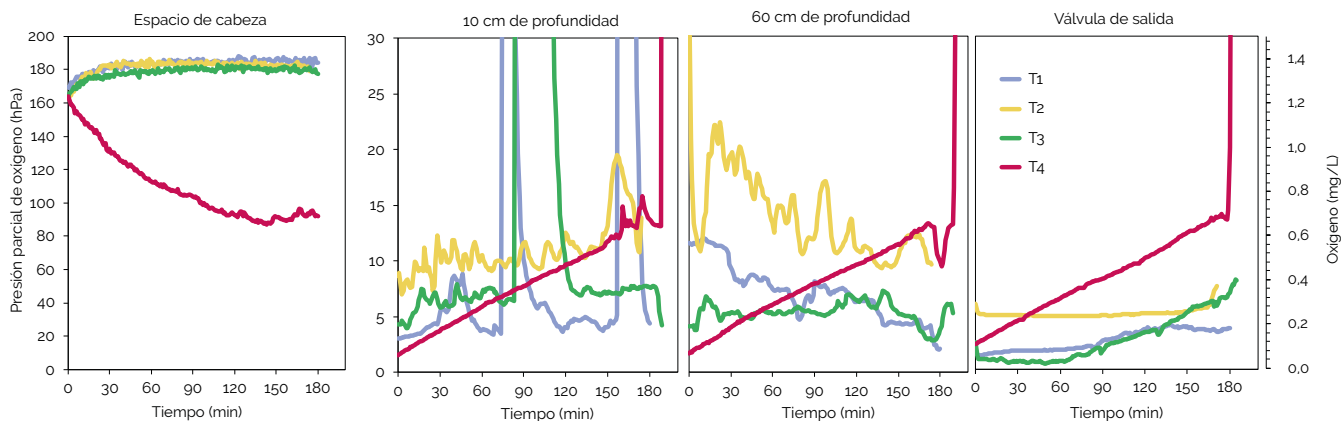


Fig. A.3.2. Evolución del oxígeno medido en el vino de la variedad Tempranillo en cada depósito origen de 32.000 litros en los diferentes trasiegos

En la *Figura A.3.2*, se observa la comparativa del contenido en oxígeno en el espacio de cabeza y en el vino, en los diferentes trasiegos, tanto dentro del depósito (a 10 y 60 cm de profundidad) como en la válvula de salida de cada depósito origen. En los trasiegos T1, T2 y T3 los valores en el espacio de cabeza fueron muy similares debido a que no se realizó ningún tipo de inertización, siendo estos valores los encontrados en el aire.

Sin embargo, el borboteo de N_2 realizado al vino durante el T4 permitió reducir el contenido en oxígeno del espacio de cabeza hasta valores por debajo de los 100 hPa (50% aire sat.). El uso de N_2 borboteado en el vino permitió disminuir el oxígeno en dicho espacio de cabeza, aunque no se consiguió generar una cobertura completamente inerte por encima del vino al actuar este gas por dilución y no desplazar el aire.

Los valores de OD en el vino a 10 y 60 cm de profundidad fueron muy similares en todos los trasiegos. Cabe destacar que en los trasiegos T1 y T3 se observaron unos incrementos significativos a 10 cm de profundidad en diferentes momentos del trasiego. Esto se debió a que el flotador, donde estaban colocadas las sondas de medición de oxígeno, se quedó enganchado en una parte del depósito dejando la sonda que mide el oxígeno a 10 cm de profundidad fuera del vino.

En el trasiego T4, todas las sondas que monitorizaban el OD (10 y 60 cm de profundidad y válvula de salida) mostraron un incremento paulatino del OD a medida que transcurría el trasiego. Esto pudo deberse a que el N_2 que se estaba borboteando (procedente de un generador) no tenía la pureza suficiente, provocando una incorporación de oxígeno al vino de hasta 7 veces más respecto al valor inicial (*Tabla A.3.2*).

Por este motivo, cuando se realiza esta práctica es importante comprobar que la pureza del N_2 incorporado sea cercana al 100%. No es lo mismo emplear N_2 para desplazar el 21% de oxígeno del aire, que borbotearlo en un vino con niveles muy bajos de OD.

Tabla A.3.2. Tabla comparativa de OD inicial y final en el vino contenido en el depósito origen de cada trasiego.

Trasiego	OD Inicial (mg/L)	OD Final (mg/L)	OD Promedio (mg/L)
T1	0,02	0,2	0,13
T2	0,29	0,37	0,25
T3	0,05	0,4	0,13
T4	0,1	0,7	0,42

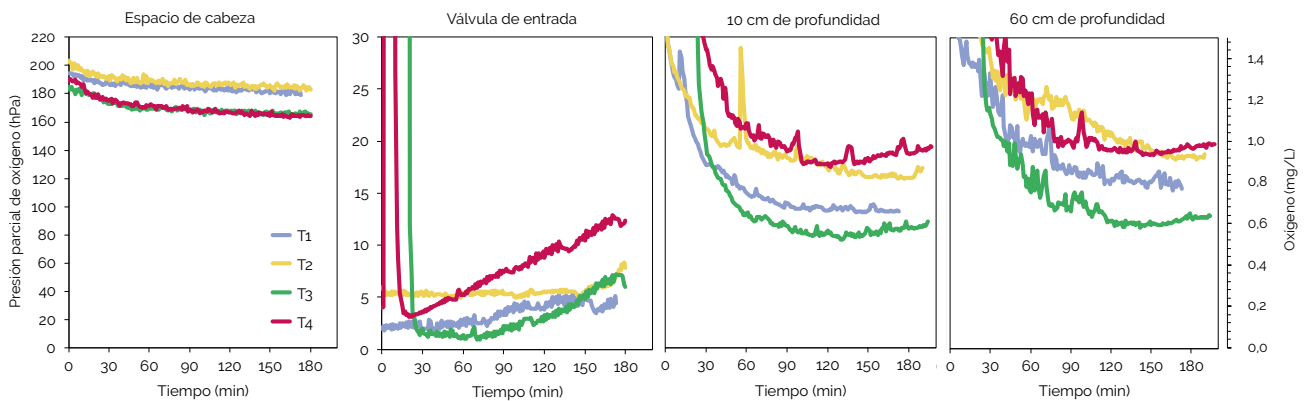


Fig. A.3.3. Evolución del oxígeno medido en el vino de la variedad Tempranillo en cada depósito de destino de 32.000 litros en los diferentes trasiegos

La Figura A.3.3. muestra los valores de oxígeno en el espacio de cabeza y en el vino en los depósitos destino de cada uno de los trasiegos monitorizados. En el espacio de cabeza de los trasiegos T1 y T2, al no realizarse ningún proceso de inertizado, los valores de oxígeno encontrados fueron los habituales en el aire. En cambio, en los trasiegos T3 y T4 los valores fueron ligeramente más bajos debido a la influencia de la incorporación de N_2 , aunque las diferencias fueron muy pequeñas. Por tanto, la cantidad de N_2 utilizada en ambos trasiegos no permitió formar una cobertura de gas que mantuviera libre de oxígeno el espacio de cabeza. Hay que incidir en que el N_2 actúa, durante el inertizado, por dilución del oxígeno mezclándose con el aire en lugar de desplazarlo como ocurre con los otros gases utilizados para desplazar el oxígeno (Capítulo 6).

La evolución del OD en el depósito destino fue muy parecida en los 4 trasiegos. El contenido en OD del vino a su llegada a la válvula de entrada del depósito destino muestra en los primeros minutos de los trasiegos T3 y sobre todo T4, la incorporación del oxígeno de las mangueras y posiblemente del filtro. Las sondas sumergibles situadas a 10 y 60 cm en el vino fueron las que registraron los valores más altos durante el trasiego. Muestran el efecto de la enorme incorporación del oxígeno del aire de los depósitos vacíos. En el caso del trasiego T4, el inertizado parcial con N_2 no produjo ningún efecto protector del vino. Por tanto, el llenado del depósito destino fue el punto más crítico a la hora de incorporar oxígeno al vino, obteniéndose valores promedio entre 0,6 y 1,19 mg/L dependiendo del trasiego (Tabla A.3.3).

Tabla A.3.3. Comparativa de OD inicial y final en el depósito destino de cada trasiego.

Trasiego	OD inicial (mg/L)	OD final (mg/L)	Promedio de OD (mg/L)	Ganancia de OD (mg/L)
1	0,1	0,24	0,76	0,22
2	0,29	0,41	0,92	0,12
3	0,05	0,53	0,6	0,48
4	0,2	1	1,19	0,9

La ganancia de OD total que tuvo el vino en cada trasiego se representa en la *Tabla A.3.3*. Se calcula como la diferencia de OD final depósito destino y el OD inicial depósito origen. Estos datos ponen de manifiesto, nuevamente, que el borboteo del vino con N₂ llevado a cabo en el trasiego T4 fue perjudicial provocando un aumento progresivo del contenido en OD, en comparación a los demás trasiegos.

A.4 - Incorporación de oxígeno durante el trasiego de vino Tempranillo con diferentes gases de inertizado

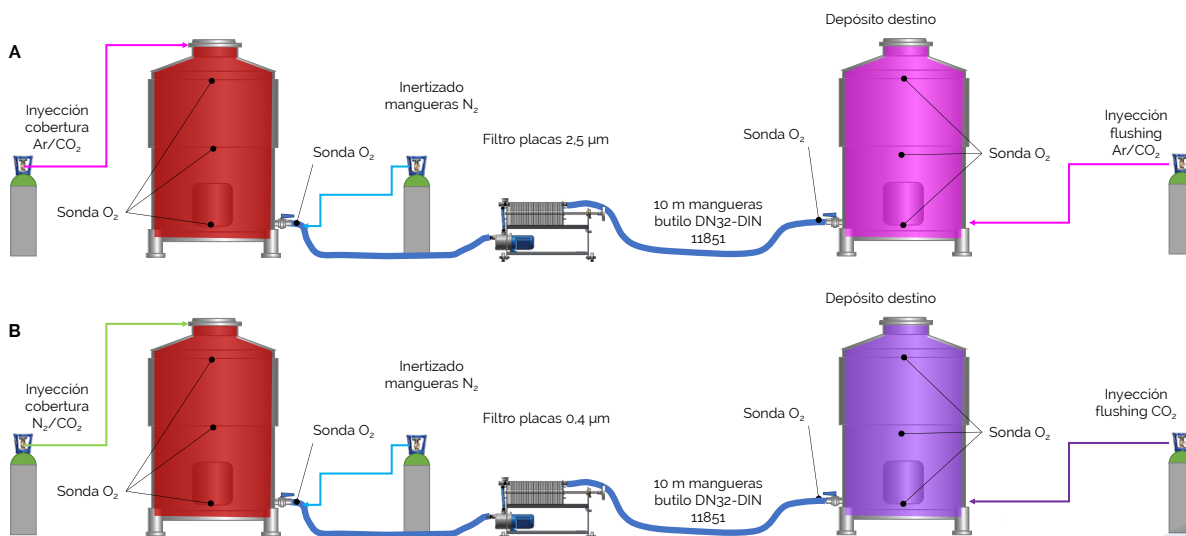


Fig. A.4.1: Esquema de la situación inicial de los trasiegos con filtración de 1800 litros de un vino de la variedad Tempranillo con diferentes gases de inertizado. Este trasiego duró 1 día, con unas condiciones de trabajo de 11,3°C y 940 mbar de presión atmosférica

Se han realizado dos trasiegos para el filtrado del mismo vino, utilizando dos filtros de placas con diferente tamaño de poro. El objetivo es poder ver cómo afecta cada tipo de filtrado al vino, cuando se utilizan medidas correctoras para evitar la incorporación de oxígeno al vino.

Las mangueras, en ambos trasiegos, se inertizaron con N_2 , durante 3 minutos con un caudal de 10 L/min. y a presión atmosférica. En el primer trasiego se realizó una cobertura gaseosa (blanketing) por la parte superior del depósito con $Ar:CO_2$ durante todo el trasiego, con el mismo caudal que el bombeado, es decir se gastaron 1.800 litros. Previamente se inertizó el depósito destino por su válvula inferior siguiendo las recomendaciones de la *Figura 6.4* del **Capítulo 6** para la determinación del volumen de gas necesario para una inertización completa. En este caso y para $Ar:CO_2$, para calcular el V_{gas} de inertizado necesario se multiplicó 0,9 por el $V_{depósito}$, inyectándose 1.620 litros de $Ar:CO_2$. En el segundo trasiego, se introdujo $N_2:CO_2$ en el depósito a trasegar durante todo el trasiego, y se inertizó el depósito destino con CO_2 . Para calcular el V_{gas} de inertizado necesario se multiplicó 1,3 por el $V_{depósito}$, inyectándose 2.340 litros de CO_2 .

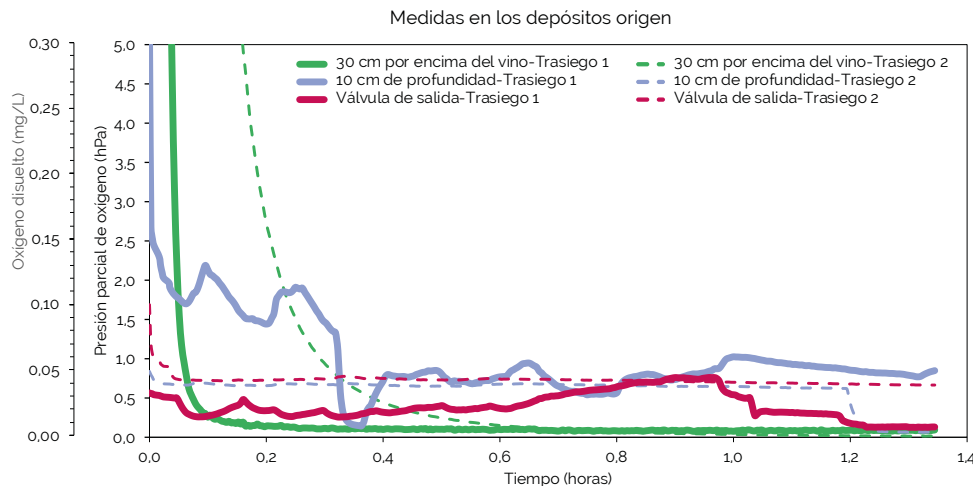


Fig. A.4.2: Medidas de oxígeno en los depósitos trasegados

La sonda situada a 30 cm por encima del vino, monitoriza el estado de la cobertura gaseosa en el depósito que se está trasegando (*Figura A.4.2*). Se observa como la cobertura realizada con $Ar:CO_2$ desplaza el oxígeno de manera más rápida, pero cuando se usa $N_2:CO_2$ se puede mantener con niveles más bajos de oxígeno. Los niveles de oxígeno disuelto registrados con la sonda situada a 10 cm de profundidad son de 0,04 mg/L para el trasiego 1, y de 0,025 mg/L para el segundo trasiego.

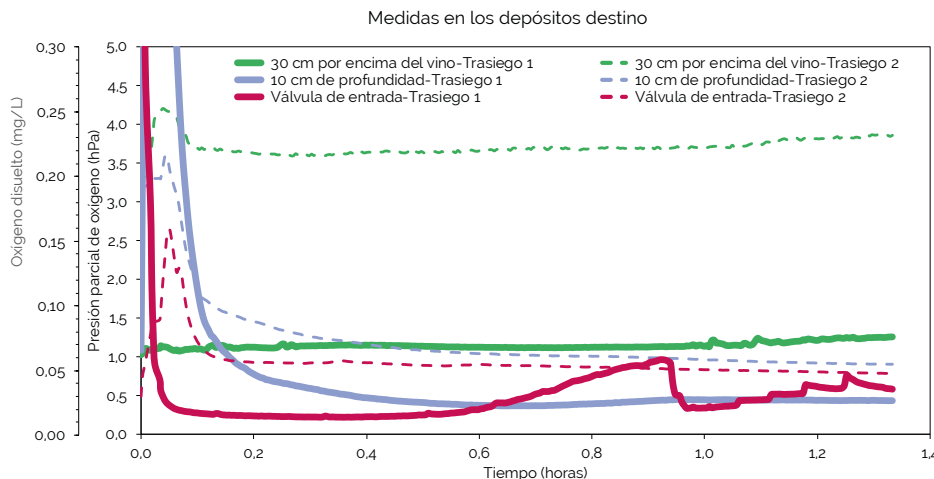


Fig. A.4.3: Medidas de oxígeno en los depósitos destino

En el depósito inertizado destino, las sondas posicionadas a 30 cm por encima del vino, muestran como el inertizado realizado con Ar:CO₂ es más efectivo que el CO₂ a la hora de desplazar el oxígeno del depósito y persistir en niveles de oxígeno más bajos durante todo el trasiego.

En el caso de los depósitos destino, se observa que este vino que fue filtrado por un tamaño de poro de 2,5 μm alcanzando los 0,03 mg/L, correspondientes al primer trasiego de 0,4 μm, en el segundo trasiego alcanza unos valores de oxígeno de 0,06 mg/L.

Se puede ver que, al hacer pasar al vino por un tamaño de poro menor, se produce una mayor incorporación de oxígeno debido al mayor tiempo de residencia del vino en el filtro y el esfuerzo de la bomba para hacer pasar el mismo volumen de vino por un poro menor. También hay que destacar que en el trasiego 1, el inertizado con Ar:CO₂ del depósito destino fue más eficiente que en el inertizado con CO₂ del trasiego 2, lo que igualmente se puede comprobar en la sonda a 10 cm de la *Figura A.4.3*.

A.5. - Incorporación de oxígeno durante un trasiego con inertización completa

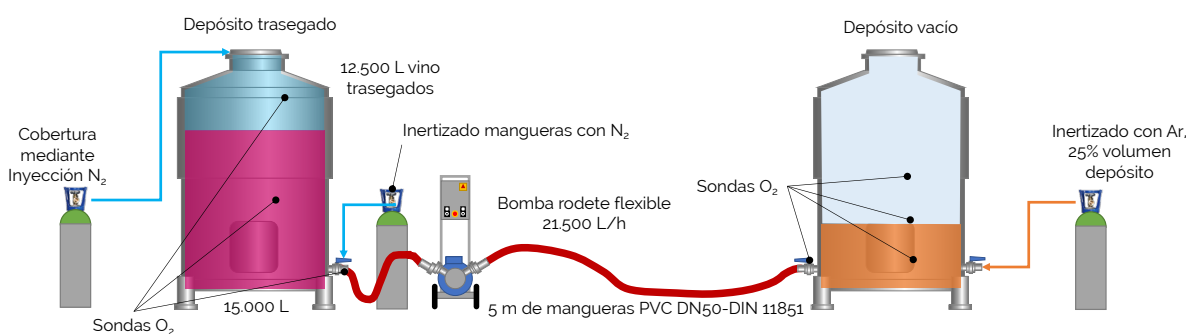


Fig. A.5.1 Esquema general del trasiego realizado con blanketing de N₂ en el depósito origen y purging de Ar en el depósito destino

La *Figura A.5.1* muestra las condiciones en las que se realizó este trasiego, que consistió en trasvasar 12.500 litros de vino tinto de la variedad *Tempranillo* contenidos en un depósito de 15.000 litros a otro depósito de 15.000 litros de capacidad. Se trabajó a una temperatura de 20,6°C y a una presión atmosférica de 926 mbar. Se utilizó una bomba de rodete flexible a un caudal 21.500 L/h y 5 m de mangueras de PVC de tipo espiroflex y diámetro 50 mm.

El depósito destino, previo a su llenado, se inertizó con Argón (Ar) inyectando el gas por la parte baja del depósito. Se inyectó un volumen de Ar equivalente al 25% de la capacidad del depósito (3.750 litros) siguiendo las recomendaciones establecidas en el [Capítulo 6](#). Esta cantidad de Ar asegura la inertización completa del depósito destino para la realización del trasiego sin que se produzcan grandes incorporaciones de oxígeno disuelto al vino. Los 5 m de manguera se inertizaron con N₂ al igual que la bomba, durante 5 minutos hasta bajar la presión parcial de oxígeno (p_{O_2}) por debajo de los 10 hPa. En el depósito origen, se inyectó N₂ por la parte superior del depósito a una presión absoluta de 1.100 mbar durante toda la duración del trasiego. El registro del contenido de oxígeno se realizó de manera muy similar a los casos anteriores, pero con algunas modificaciones ya que no se empleó la sonda situada a 60 cm de profundidad en el vino del depósito destino, que se substituyó por una sonda situada en la interfase entre el vino y la parte gaseosa.

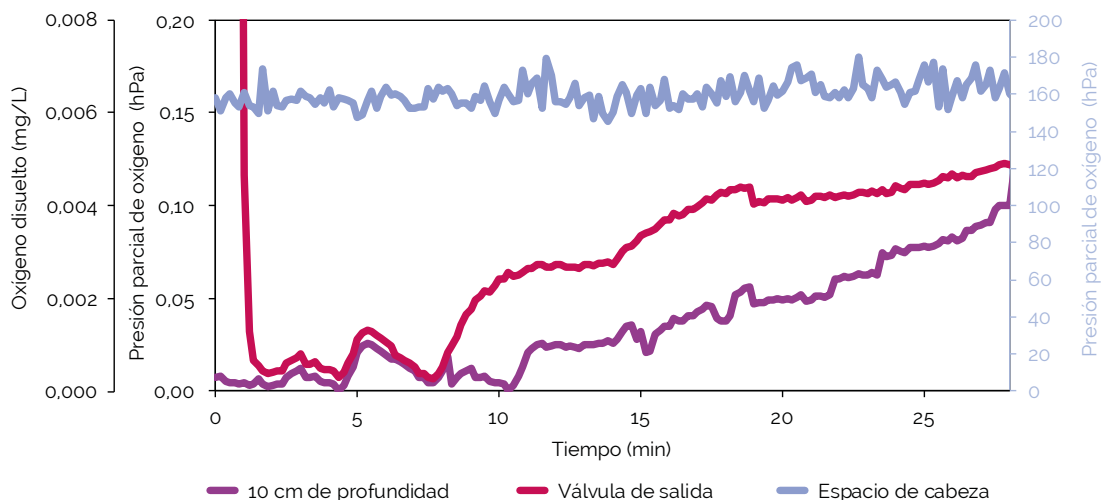


Fig. A.5.2. Evolución del contenido de OD y del espacio de cabeza en el depósito origen (en eje Y derecho los hPa de oxígeno en el espacio de cabeza)

La Figura A.5.2. muestra el contenido de oxígeno en los diferentes puntos monitorizados en el depósito origen. Se puede observar que la inyección de N_2 por la parte superior del depósito mientras se vacía de vino, no resultó ser muy efectiva ya que no consiguió bajar la p_{O_2} de los 160 hPa (valores cercanos a la saturación de oxígeno en el aire) durante todo el trasiego, según se puede observar en la sonda que monitorizaba el contenido de oxígeno en el espacio de cabeza. Como se puede observar, el valor de OD del vino dentro del depósito y en la válvula de salida fue similar al inicio del trasiego (0,001 mg/L). En cambio, a medida que se fue vaciando el depósito el contenido en OD en ambos puntos se fue incrementado, probablemente debido al mayor volumen de aire que entra en el depósito a medida que se vacía. Así, al finalizar el trasiego el vino salía hacia el depósito destino con un OD de 0,12 mg/L.

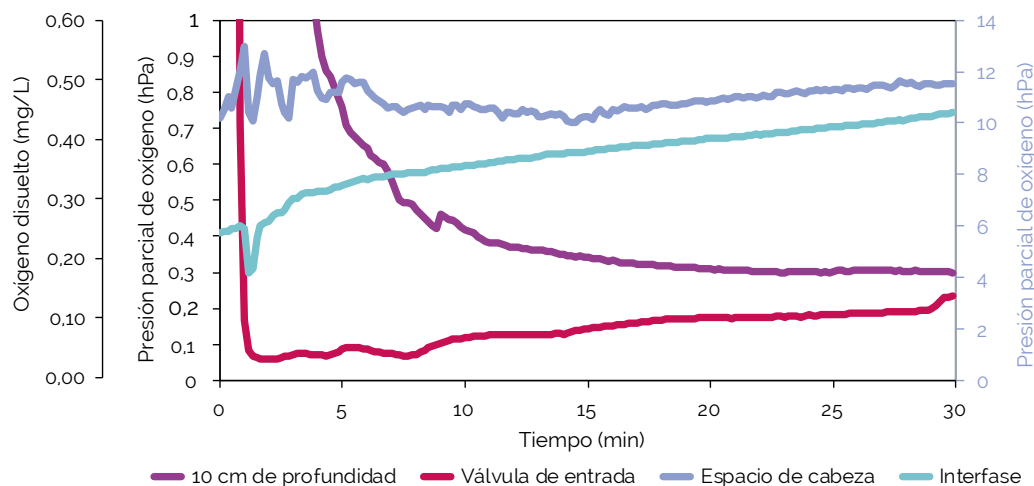


Fig. A.5.3. Evolución del contenido de OD y del espacio de cabeza en el depósito destino. El eje de la izquierda representa el contenido en oxígeno a 10 cm de profundidad del vino y de la válvula de salida. El eje derecho representa el contenido en oxígeno de la interfase y el espacio de cabeza

La *Figura A.5.3.* muestra el contenido de oxígeno en el depósito de destino donde fue trasegado el vino. Se observa que el inertizado con Ar previo al llenado permitió bajar los valores en el espacio de cabeza hasta los 12 hPa, y entre 7 y 10 hPa en la interfase. Esto permitió generar una cobertura protectora para el vino a medida que entraba en el depósito. Así, se vio que el OD en el vino durante los primeros 10 minutos de trasego fue más alto, debido a la formación de turbulencias dentro del depósito. En cambio, desde mitad de trasego y hasta su final el valor de OD fue de 0,3 mg/L. Por tanto, en general se puede decir que durante este trasego el vino tuvo un ligero incremento de OD de 0,18 mg/L.

A.6. - Incorporación de oxígeno durante el vaciado de barricas con y sin inertizado

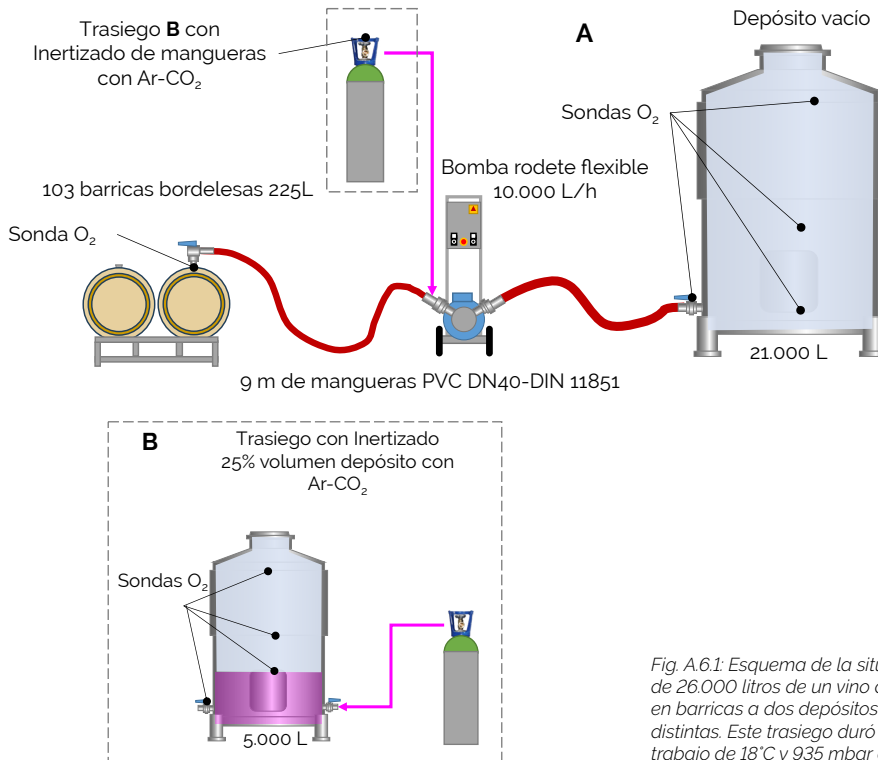


Fig. A.6.1: Esquema de la situación inicial del trasego de 26.000 litros de un vino de la variedad Tinta de Toro en barricas a dos depósitos diferentes en situaciones distintas. Este trasego duró 1 día, con unas condiciones de trabajo de 18°C y 935 mbar de presión atmosférica

En este caso práctico se estudió el trasego de un vino de la variedad Tinta de Toro desde 103 barricas bordelesas de 225L a dos depósitos diferentes. En el primer movimiento, se trasegaron 21.000 litros a un depósito sin el uso de gases de inertizado. En el segundo trasego, se movieron 5.000 litros de vino a un depósito inertizando los 9 metros de manguera y la bomba con N₂ y también se inertizó el depósito vacío destino mediante una cobertura de un 25% del volumen del depósito con Ar:CO₂ (*Figura A.6.1*), de acuerdo con lo explicado en el [Capítulo 6](#).

Se midió el nivel del oxígeno disuelto del vino dentro de las barricas con una sonda sumergible conectada a un medidor de oxígeno portátil. El siguiente punto de control de oxígeno disuelto (OD), tanto para el trasego 1 como para el trasego 2, se realizó de la forma habitual detallada previamente. Se puede observar, en la *Figura A.6.2* y en la *Figura A.6.3*, como entra aire al depósito por la válvula de entrada cada vez que se termina el vino de una barrica y se va a comenzar a trasegar la siguiente, a pesar de parar la bomba cuando no queda vino. El oxígeno disuelto del vino inicialmente comienza en valores de saturación debido a la incorporación del aire del bastón, mangueras, bomba de rodete y depósito. Finalmente consigue estabilizarse en valores de 1,7 mg/L a pesar de que el OD del vino medido en las barricas fue de muy pocos hPa.

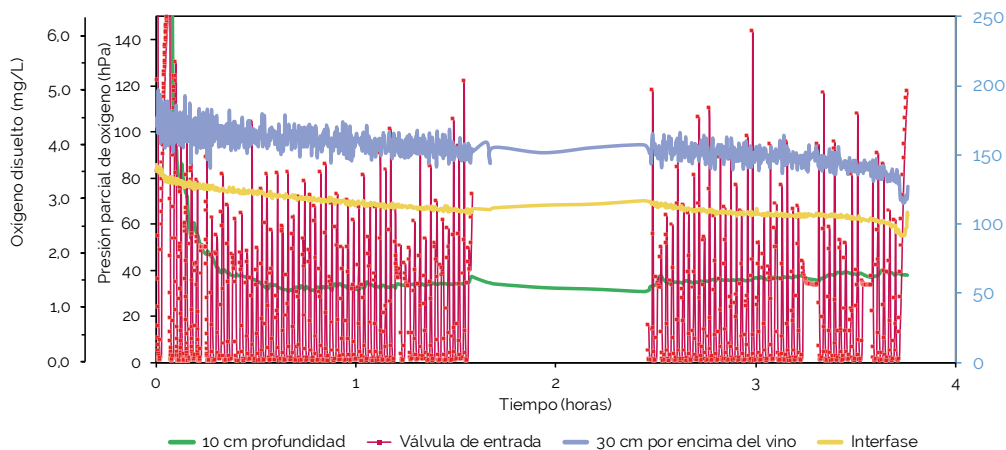


Fig. A.6.2: Evolución de los niveles de oxígeno en depósito destino durante el primer trasiego sin el uso de gases de inertizado

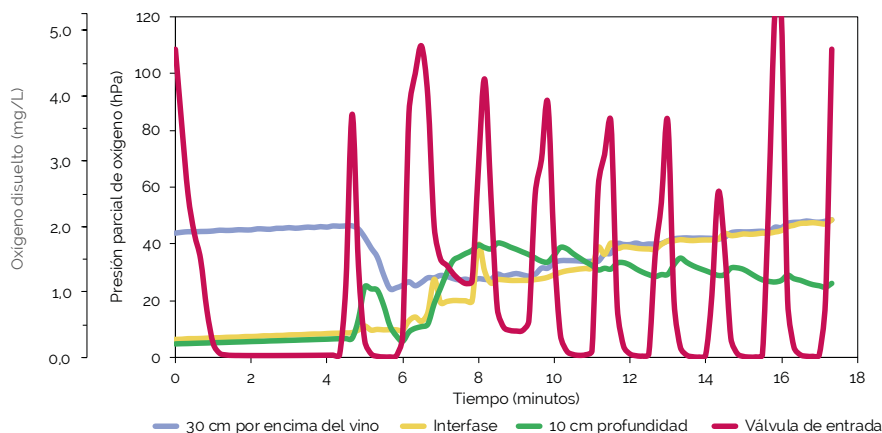


Fig. A.6.3: Evolución de los niveles de oxígeno en depósito destino durante el segundo trasiego con el uso de Ar:CO₂

En la *Figura A.6.3* se muestran los valores de los mismos puntos de medida cuando en el trasiego 2 se inertizaron tanto las mangueras, como la bomba, y además se aplicó una inertización con Ar:CO₂ por cobertura con una capa de un 25% del volumen del depósito vacío. Se puede observar cómo los niveles iniciales de oxígeno disuelto en el vino son de 0,3 mg/L. A lo largo del vaciado de las barricas los niveles de oxígeno del espacio gaseoso por encima del vino se mantienen mucho más bajos que en el caso anterior, observando cómo se mantiene la cobertura a pesar de las inyecciones de aire por la parada y arranque de la bomba con el cambio de una barrica a otra. Gracias a la inertización inicial y a la cobertura el nivel de OD en el vino (a 10 cm) al principio se mantiene muy bajo hasta el primer cambio de barrica, momento en el que produce una incorporación de aire en la parada/arranque de la bomba. En la válvula de entrada del depósito se aprecian niveles de OD muy elevados, aunque sin llegar a saturación como en el primer trasiego.

En la *Figura A.6.4* se puede ver una comparativa del oxígeno disuelto inicial, que tiene un promedio de 0,1 mg/L en las barricas medidas. Cuando se trasiega, en el depósito sin inertizar (*Figura A.6.1.A*) los niveles finales de OD son = 1,7 mg/L, y cuando se aplican la inertización inicial (*Figura A.6.1.B*), se observa cómo la evolución del OD en el vino del depósito tiene la misma tendencia, pero en torno a 1 mg/L inferior. A pesar de los frecuentes cambios entre barricas y la aspiración de aire, con un inertizado inicial se reduce considerablemente la incorporación de oxígeno atmosférico que llega a ser de 1,1 mg/L, muy inferior a la situación sin inertizar.

Comparativa OD trasiegos

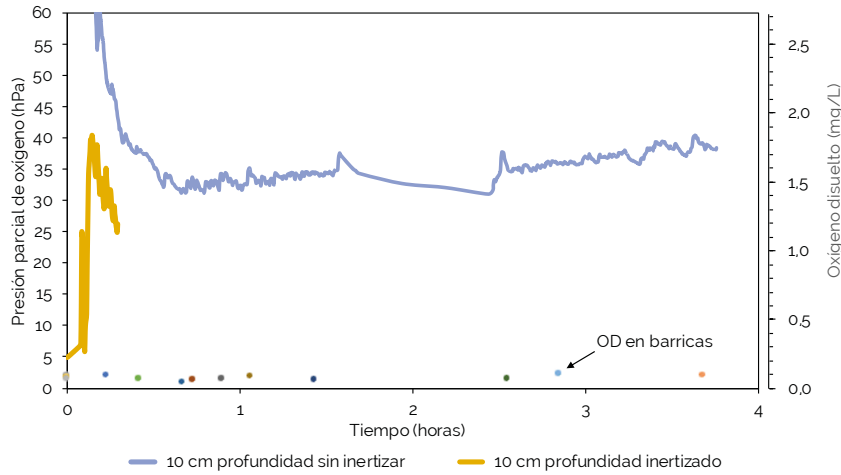


Fig. A.64: Comparación de los niveles de oxígeno a la entrada en el depósito sin y con inertización con Ar:CO₂

A.7. - Incorporación de oxígeno durante un trasiego con diferente modos y gases de inertizado

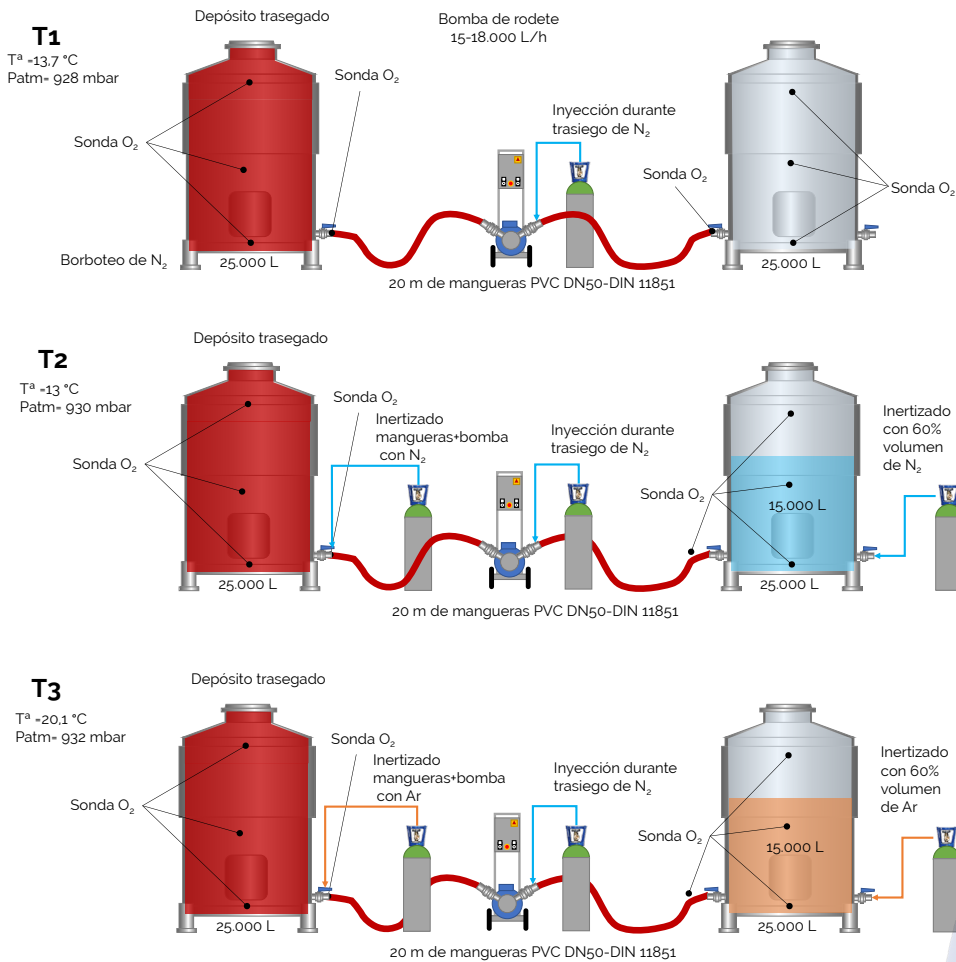


Fig. A.71. Esquema de los tres trasiegos de 25.000 litros de un vino de la variedad Verdejo en 3 días diferentes, en todos los casos con una bomba de rodete flexible y un caudal de trabajo que varió entre 15.000 y 18.000 L/h

La *Figura A.72A* muestra la evolución del contenido de oxígeno a medida que las mangueras fueron inertizadas con N_2 o Ar durante el tiempo necesario hasta que la medición de oxígeno se mantuvo estable. La *Figura A.72B* muestra el contenido de oxígeno en el depósito destino vacío durante la incorporación de N_2 y Ar para los trasiegos T2 y T3 respectivamente (*Figura A.71*). Al inertizar las mangueras, el N_2 fue casi tan efectivo como el Ar. Esto se debió a que la relación longitud/diámetro era muy alta, lo que permitió que el aire fuera desplazado de las mangueras hacia el exterior por un tapón gaseoso de nitrógeno, en lugar de diluirse (*Capítulo 5*). En cambio, para la inertización del depósito de destino el Ar fue claramente más efectivo que el N_2 , debido a que la relación altura/diámetro fue menor ya que el N_2 actuó por dilución, mientras que el Ar actuó por desplazamiento. El Ar, al ser un gas más denso y pesado, puede desplazar más eficazmente el oxígeno en el depósito de destino, ya que no se mezcla, mientras que el N_2 actúa por dilución, mezclándose con el aire y disminuyendo la concentración de oxígeno.

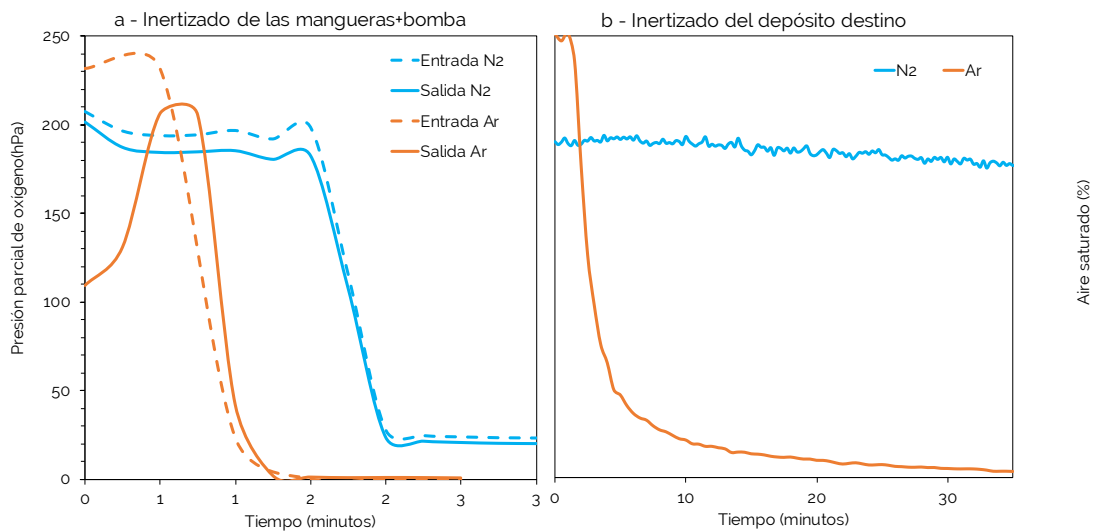


Fig. A.72. Evolución del contenido en oxígeno durante (a) el inertizado de mangueras-bomba y (b) depósito destino en los trasiegos T2 y T3 (Fig. A.71)

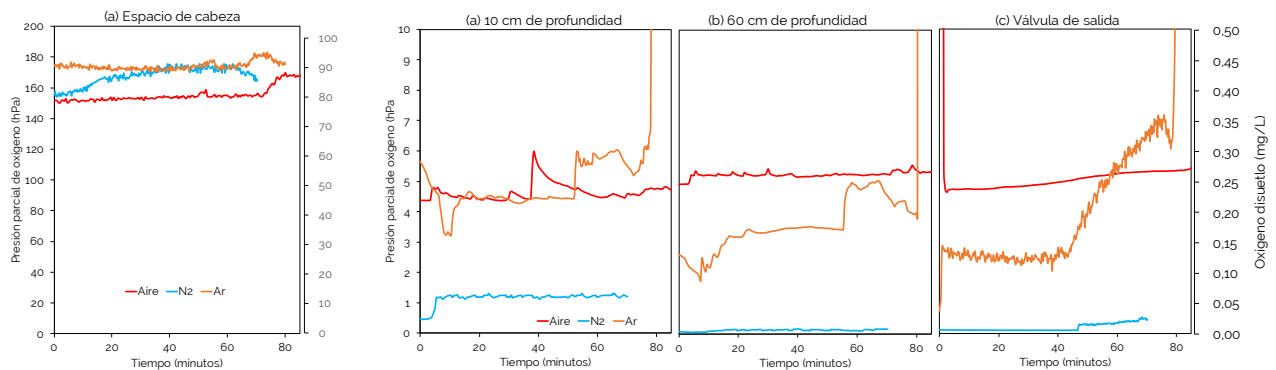


Fig. A.73. Evolución del contenido en oxígeno en el vino (a) y (b) en la válvula de salida (c) del depósito origen en los trasiegos T1, T2 y T3 (Fig. A.71)

La Figura A.7.3 muestra el contenido de oxígeno disuelto en el vino (OD) del depósito origen, al cual no se aplicó gas de cobertura mientras el vino se trasvasaba al depósito de destino durante los tres trasiegos. Al inicio del trasiego, la sonda sumergida a 10 cm en el vino variaba entre 1 hPa (0,05 mg/L) en el depósito del T1 y 5 hPa (0,22 mg/L) en los depósitos de los T2 y T3 (Figura A.7.3a). La sumergida a 60 cm indicaba que el vino tenía entre 0,5 y 5 hPa (0,026 y 0,20 mg/L) (Figura A.7.3b). Mientras el vino era trasegado hacia el depósito destino, el nivel de oxígeno disuelto varió entre 0,05 y 5 hPa (Figura A.7.3c). Estas diferencias se han de considerar en la comparación del uso o no de gases de inertizado ya que los vinos de los distintos trasiegos no eran exactamente iguales y estaban a diferente temperatura. En la Figura A.7.4 se muestra las medidas realizadas en el depósito destino para cada uno de los tres trasiegos y diferentes condiciones de inertización. En la válvula de entrada (Figura A.7.4.a) se mantienen los niveles de oxígeno con los que salía el vino de los depósi-

tos ya que en todos los casos se inyectaba N_2 tras la bomba, y las mangueras fueron inertizadas en los trasiegos T2 y T3.

Las diferencias en la inertización del depósito destino vacío se aprecian muy bien en las sondas a 10 y 60 cm (Figura A.7.4.b-c) que muestran como el desplazamiento del oxígeno con Ar ha sido la más efectiva ya que el vino a pesar de tener una p_{O_2} inicial algo mayor que el T2, se mantiene muy baja durante todo el movimiento del vino. En el caso de T1 (aire) y T2 (N_2) en los primeros minutos se produce una incorporación del O_2 del aire que llena el depósito que alcanza 5 mg/L y desciende hasta valores que en cualquier caso duplican o triplican la incorporación si no se inertiza el depósito o se hace con N_2 . La Figura A.7.4.d muestra el estado del espacio gaseoso por encima del vino y se aprecia como el N_2 apenas tiene efecto, mientras que el uso de Ar tiene un claro efecto protector frente a la incorporación de oxígeno del aire, principalmente por su densidad.

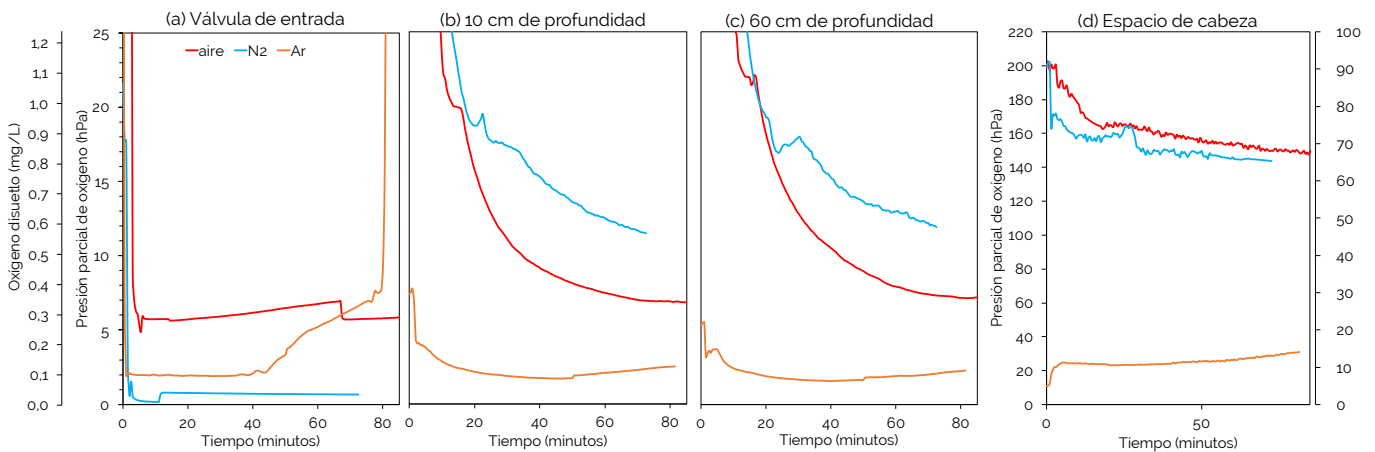


Fig. A.7.4. Evolución del contenido en OD y en el espacio de cabeza en el depósito destino de los 3 casos estudiados



A.8. – Comparación del nivel de inertizado durante un trasiego de vino Tinta de Toro

Esquema de ensayos de las diferentes condiciones

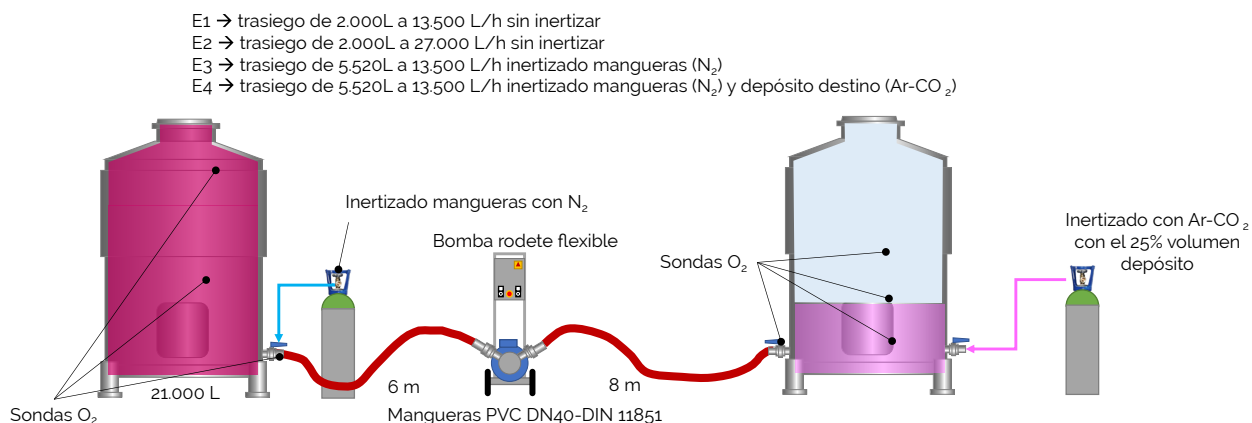


Fig. A.8.1: Esquema de la situación inicial del trasiego de 14.500 L de un vino de la variedad Tinta de Toro a 4 depósitos diferentes en condiciones distintas. Este trasiego duró 1 día, con unas condiciones de trabajo de 18,5 °C y 939 mbar de presión atmosférica

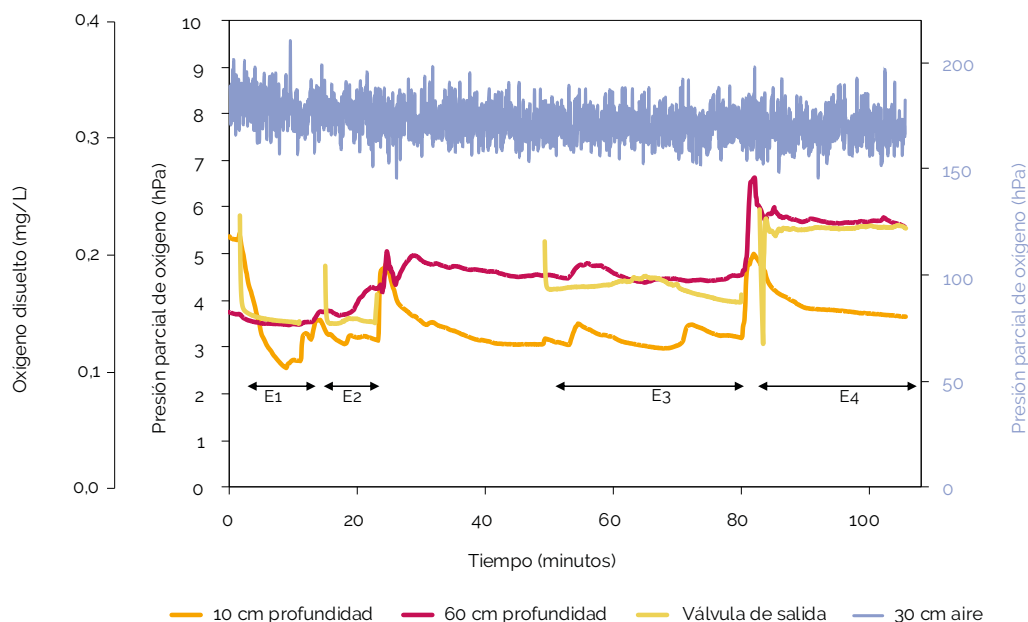


Fig. A.8.2: Medidas de oxígeno en el depósito trasogado

La Figura A.8.2, detalla el estado de los niveles de oxígeno en los diferentes puntos de medida durante todo el trasiego, correspondiendo los primeros 23 minutos al ensayo E1 y E2.

Se observa un aumento progresivo del oxígeno disuelto del vino en el depósito de origen a medida que el depósito se va vaciando, este va aumentando, teniendo una variabilidad de entre 0,1 a 0,3 mg/L.

El aumento de caudal al doble con la velocidad 2 de la bomba afecta en el nivel de oxígeno disuelto del vino, terminando con el doble de oxígeno que a velocidad 1. Inicialmente en el depósito origen el contenido de oxígeno pasa de 0,1 mg/L a 1,0 mg/L, y a velocidad 2 se ve incrementado hasta 2,0 mg/L (Figura A.8.3). Se comprueba así en bodega las condiciones de los trabajos con vino modelo desarrollados en el **Capítulo 6**.

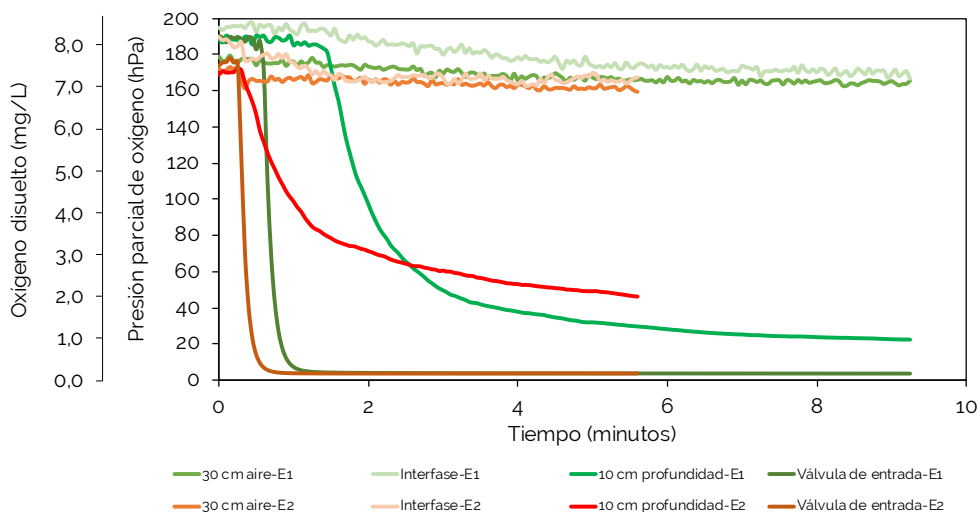


Fig. A.8.3: Comparativa velocidad 1 y 2 en el depósito destino

Tras comprobar que la elección de un caudal bajo es más recomendable para realizar un trasiego, se procedió a trasegar 5.250 litros de vino a un depósito desplazando el oxígeno atmosférico de las mangueras y bomba de rodete.

A continuación se repitió el ensayo trasegando la misma cantidad de vino y además se desplazó el oxígeno de la parte inferior del depósito de destino inyectando 1.000 litros de Ar:CO₂ por la válvula inferior del depósito.

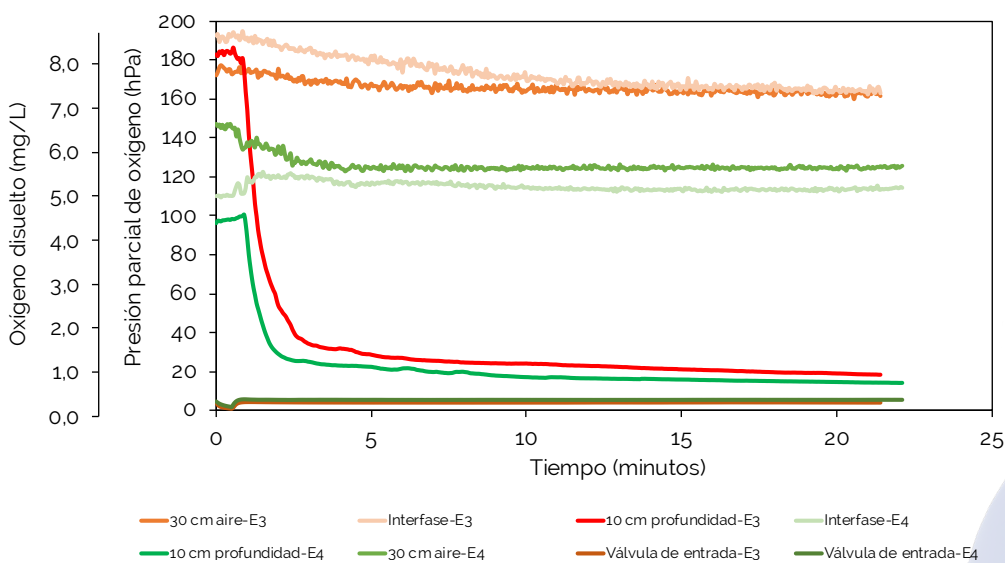


Fig. A.8.4: Comparativa inertizar depósito destino y mangueras o mangueras

En la *Figura A.8.4*, se puede observar la comparación de la evolución de los niveles de oxígeno en el depósito de destino de los ensayos E3 y E4.

Los niveles de oxígeno que alcanza el vino en el depósito destino (10 cm profundidad) son claramente más bajos nada más entrar en el depósito E4 ya que la capa de gas permite evitar la incorporación de oxígeno del aire.

Por contra, en el E3, el vino con un contenido en oxígeno muy bajo en la válvula de entrada, se satura al inicio en la entrada en el depósito lleno de aire.

Se puede concluir que **es recomendable utilizar la velocidad más baja de la bomba evitando altos caudales del vino, al igual que inertizar mangueras y bomba con nitrógeno, e inyectar un 25% del volumen del depósito por su válvula inferior, de un gas que permita formar una capa libre de oxígeno**. Las diferencias entre la situación sin el uso de gases y utilizando gases y baja velocidad es en este caso hasta de 1,4 mg/L.

A.9.- Incorporación de oxígeno durante un trasiego con transporte en cisterna entre bodegas

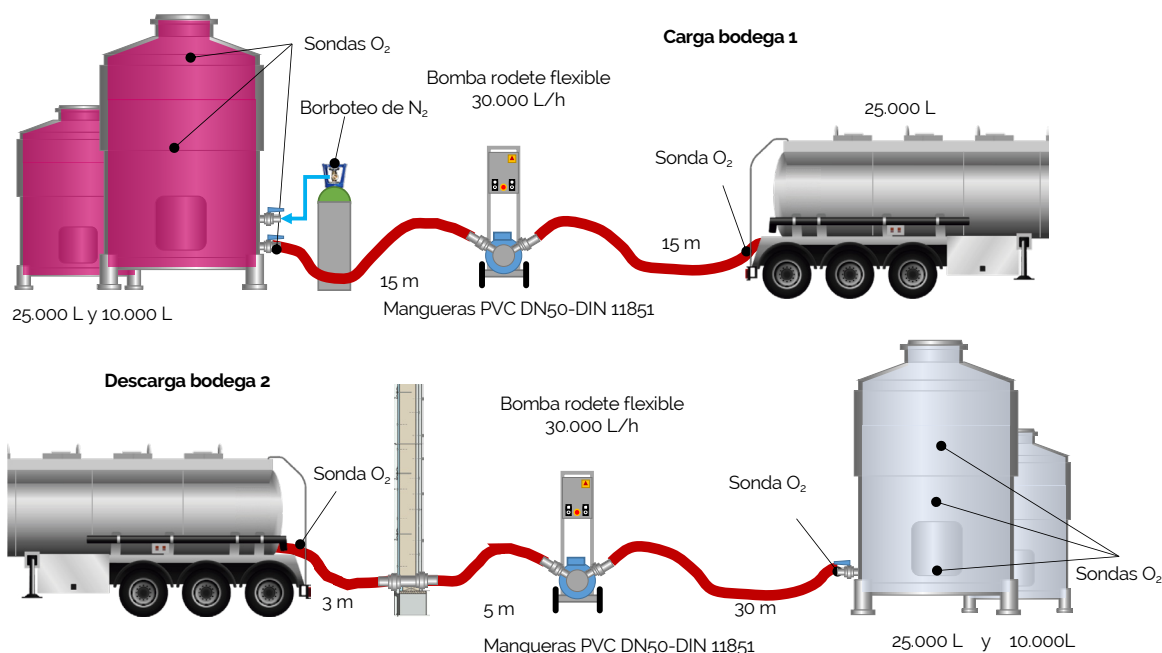


Fig. A.9.1. Esquema de la situación inicial de los trasiegos de 25.000 litros (T1) y 10.000 litros (T2) de un vino de la variedad Tempranillo con traslado en cisterna entre 2 bodegas. Con unas condiciones de trabajo de 20 °C y 927 mbar de presión atmosférica, para el primer trasiego, y de 21,5 °C y 930 mbar de presión atmosférica para el segundo trasiego

La *Figura A.9.1* detalla las condiciones en que se realizaron 2 trasiegos con transporte entre bodegas (B1 y B2) de vino tinto de la variedad Tempranillo mediante una cisterna compartimentada de 25.000 litros de capacidad. En un primer transporte se trasegó un depósito de 25.000 litros con la cisterna llena y un segundo transporte de 10.000 litros de un segundo depósito en la bodega B1 con la cisterna parcialmente llena. En los dos depósitos origen de los dos trasiegos se borboteó N₂ durante todo el proceso.

En los depósitos de destino no se aplicó ninguna cobertura de gas para desplazar el oxígeno ni tampoco se desplazó el aire de las mangueras utilizadas.

En el depósito origen y destino de cada trasiego, se registraron los niveles de oxígeno disuelto (OD) en distintos puntos del vino y en el espacio de cabeza con aire atmosférico por encima de la superficie del vino, tal como se ha mencionado en los casos prácticos anteriores (Figura A.9.1).

Además, se colocó una sonda para el registro del contenido de oxígeno a la entrada y salida de la cisterna. Se utilizó una bomba de rodete con caudal 30.000-32.000 L/h y las mangueras utilizadas eran de PVC tipo Espiroflex DN50 con conectores DIN 11851.

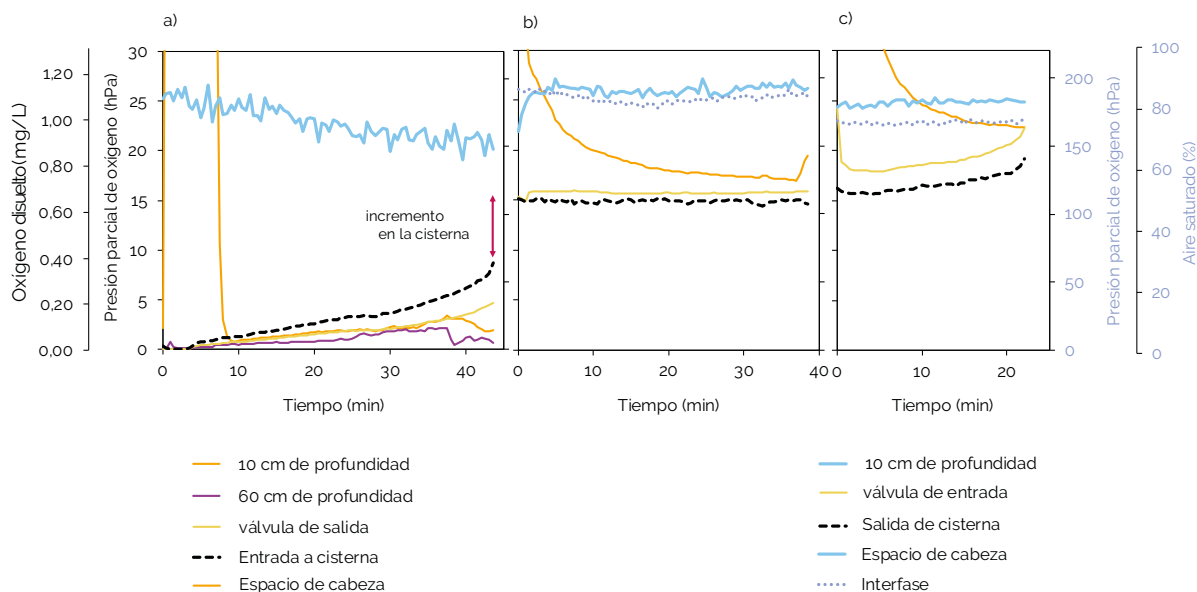


Fig. A.9.2. Evolución del contenido en oxígeno durante el primer trasiego y transporte de 25.000 litros en cisterna entre las bodegas B1 y B2. a) depósito trasegado y entrada de la cisterna, b) salida de la cisterna y depósito vacío de 15.000 litros y c) salida de la cisterna y depósito 10.000 litros

En la Figura A.9.2, se detalla el contenido de oxígeno durante el trasiego del vino desde el depósito origen de 25.000 litros hasta la cisterna en la bodega B1 (Figura A.9.2.a), y el trasiego de este vino desde la salida de la cisterna hasta el depósito destino en la bodega B2 (Figuras A.9.2.b y c). Como se puede observar, el borboteo de N_2 en el vino del depósito origen permitió disminuir ligeramente el contenido de oxígeno en el espacio de cabeza mientras se vaciaba el depósito.

Dicho espacio de cabeza se mantuvo con valores entre 180 y 150 hPa, que supone una ligera bajada del nivel de oxígeno desde un 95% al 80% de aire saturado. Por tanto, el N_2 borbotado permitió diluir ligeramente el oxígeno que había en el espacio de cabeza.

A media que el depósito se fue vaciando, y a pesar del borboteo de N_2 , el vino salía hacia la cisterna con un mayor contenido de oxígeno, debido al mayor volumen del espacio gaseoso que había en el depósito según se vaciaba, ya que este espacio de cabeza no estaba completamente libre de oxígeno.

Como era de esperar, el recorrido del vino desde la válvula de salida del depósito origen hasta la entrada de la cisterna supuso un incremento del OD.

A la entrada de la cisterna el vino iba incrementando su contenido en oxígeno, incremento que se produjo en el sistema de bombeo (conectores + mangueras + bomba). Este incremento se mantuvo durante todo el trasiego, lo que descarta un aporte puntual.

El primer transporte del vino en la cisterna desde la bodega B1 hasta la bodega B2 supuso un incremento considerable en el contenido de oxígeno del vino de 0,34 mg/L a 0,66 mg/L, duplicándose durante el transporte del vino en la cisterna (*Figura A.8.2*).

Esto pudo deberse a que, al no aplicarse ningún gas para desplazar el oxígeno, durante la entrada del vino en la cisterna llena de aire se produjo la incorporación de oxígeno del aire que llenaba la cisterna.

En cuanto la cisterna en el primer viaje llegó a la bodega B2, se procedió a realizar el trasiego del vino desde la cisterna hasta los 2 depósitos destino, uno de 15.000 litros y otro de 10.000 litros. La incorporación de oxígeno desde la salida de la cisterna hasta la entrada del depósito destino de 15.000 litros fue mínima (*Figura A.9.2.b*).

Como ya se ha visto en otros casos, la entrada del vino al depósito fue el proceso que mayor incremento en oxígeno supuso para el vino, sobre todo durante los primeros 10 minutos de trasiego debido a la formación de turbulencias, que hacen que haya más oxígeno del aire en contacto con el vino (*Figura A.9.2.b*).

Resultados similares se encontraron en el trasiego desde la cisterna hasta el depósito de 10.000 litros (*Figura A.9.2.c*) pero, en este caso, la incorporación de oxígeno al vino desde la cisterna hasta la entrada del depósito y una vez dentro del depósito fue mayor. Esto fue debido a que, como ocurrió durante el vaciado del depósito origen, al existir un mayor espacio de cabeza saturado de aire entre el vino y la parte superior de la cisterna se produce una mayor incorporación de oxígeno al vino.

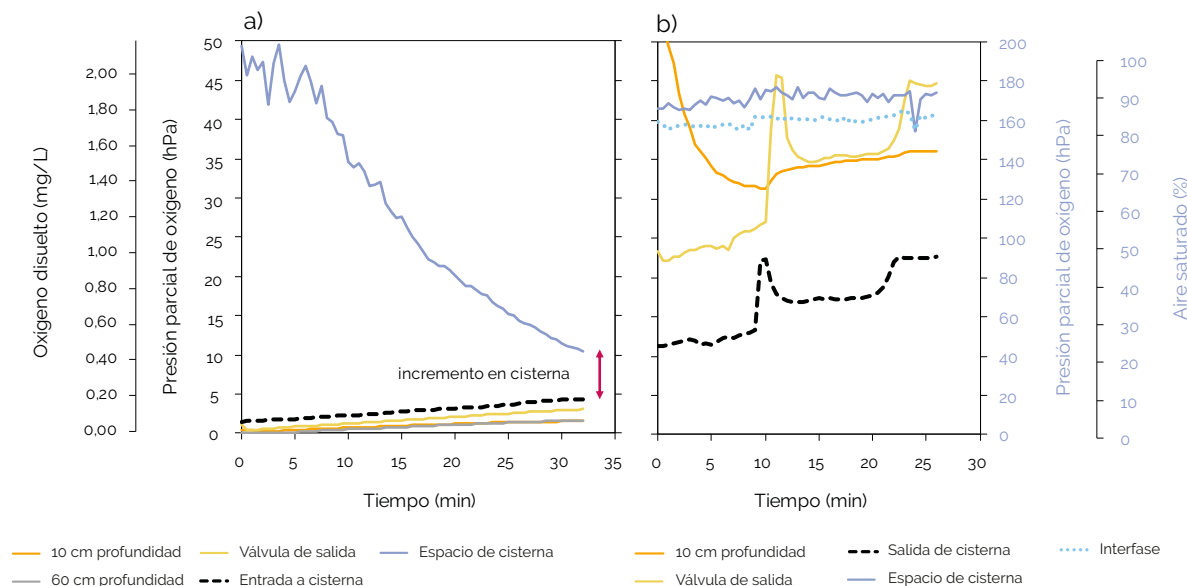


Fig. A.9.3. Evolución del contenido en oxígeno durante el segundo trasiego y transporte de 10.000L en cisterna entre las bodegas B1 y B2. a) depósito trasegado y entrada cisterna, b) salida cisterna y depósito vacío de 10.000L.

En la *Figura A.9.3*, se muestra la evolución del contenido en oxígeno durante el segundo trasiego y transporte de 10.000 litros de vino entre las 2 bodegas. Los resultados obtenidos fueron muy similares a los del primer trasiego. Sin embargo, en este caso el borboteo de N_2 tuvo un mayor efecto protector del espacio de cabeza del depósito origen (*Figura A.9.3a*). El transporte del vino entre bodegas supuso un mayor incremento del contenido en OD ya que el vino comenzó el transporte desde la bodega B1 con un contenido de 0,19 mg/L y llegó a la bodega B2 con 0,49 mg/L (*Figura A.9.3b*). Esto se debió a que, en este caso, la cisterna no iba completamente llena de vino ya que se transportaron 10.000 litros y la capacidad de la cisterna era de 25.000 litros.

Casos prácticos: B- EMBOTELLADOS

B.1.- Incorporación de oxígeno en un vino Verdejo durante el trasiego y embotellado con inyección de CO₂

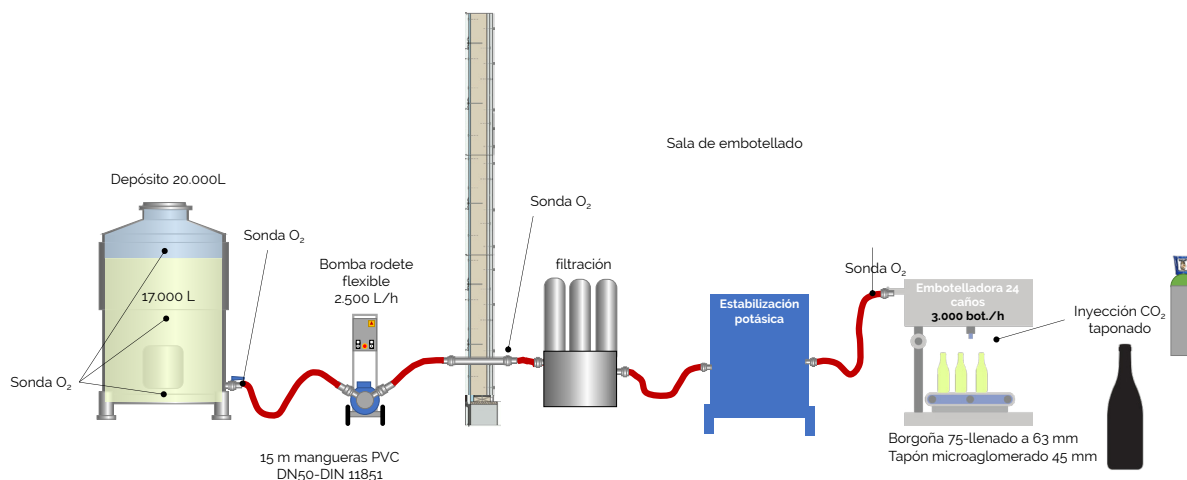


Fig. B.1.1. Esquema de la situación inicial del trasiego y embotellado de un vino variedad Verdejo, Tª ambiente= 15,1°C; Patm.=921 mbar; duración 2 días

La medida de la incorporación de oxígeno en el vino durante el movimiento de 17.000 litros de vino Verdejo, desde el depósito origen hasta la embotelladora, se ha realizado en distintos puntos del recorrido. En la *Figura B.1.2*, se indican los resultados de las medidas de oxígeno en el vino del depósito de 20.000 litros mientras se va vaciando. Se puede ver que el vino a 60 cm de profundidad mantenía unos valores medios de oxígeno disuelto de 0,1 mg/L, pero a las 6h de la primera jornada de embotellado se añadió vino sobrante de otro depósito que incrementó el nivel de oxígeno hasta 0,8 mg/L. Estos mismos valores se ven reflejados en el vino a la salida del depósito (sonda válvula de salida).

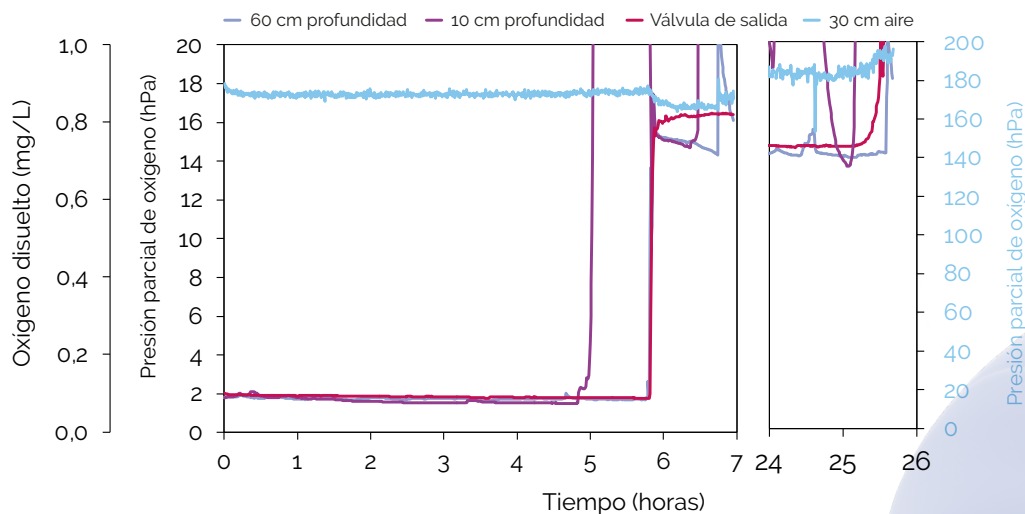


Fig. B.1.2: Medidas de oxígeno en el depósito trasegado

La sonda sumergida a 10 cm en el vino indica que el OD el primer día se mantuvo en 0,1 mg/L. Sin embargo, alcanza 1 mg/L el segundo día debido a que el espacio que quedaba libre en el depósito se llenaba de aire cuyo oxígeno se disolvía en el vino durante la noche. El vino sale del depósito con una media de 0,16 mg/L.

También se observa un incremento de 0,7 mg/L de oxígeno debido a la incorporación de vino de otro depósito a las 6 h.

En el recorrido del vino hacia la embotelladora, se ha monitorizado el nivel de oxígeno disuelto a la salida de la tubería fija, a la entrada del filtro y a la entrada de la embotelladora.

En la *Figura B.13* se observa que a medida que el vino avanza, incrementa el nivel de OD desde 0,1 mg/L en las primeras horas hasta 2 mg/L al comienzo de la segunda jornada (t=24 h) debido a lo comentado anteriormente.

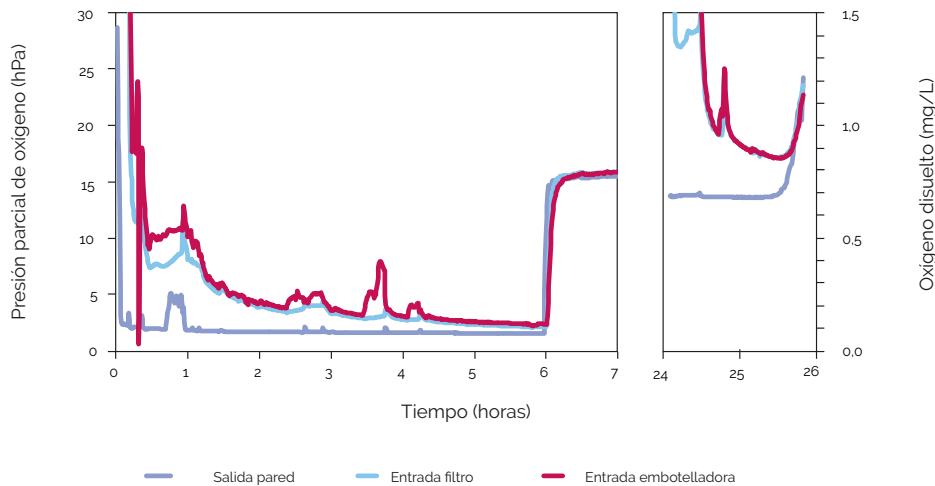


Fig. B.13: Medidas de oxígeno en el depósito destino

Las medidas realizadas en la embotelladora se presentan en la *Figura B.14*, para ello, se introducen 24 botellas equipadas con sensores en 6 momentos diferentes durante el embotellado, lo que ha permitido realizar 144 medidas recogiendo botellas procedentes de cada caño.

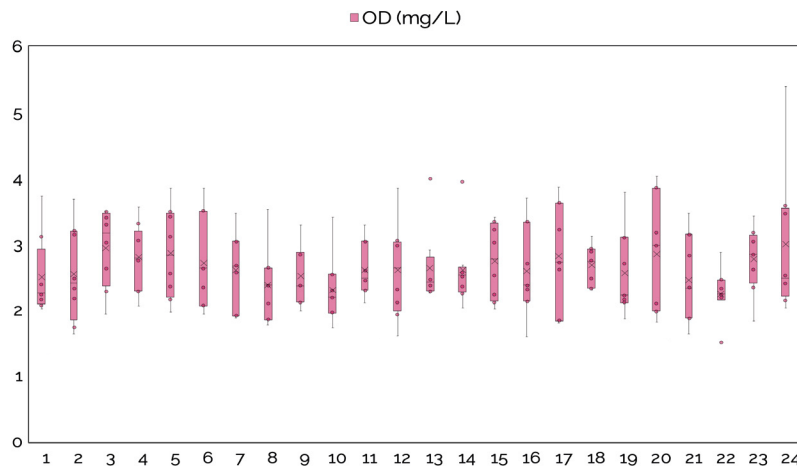


Fig. B.14a: Medidas del oxígeno disuelto (mg/L) en las botellas de cada uno de los 24 caños durante todo el embotellado

El OD refleja la incorporación de oxígeno en el vino desde el depósito trasegado hasta la llenadora, y varía entre 1,5 mg/L y 5,4 mg/L (Figura B.14a).

Se observa que la menor variabilidad la presentaron las botellas procedentes de los caños 14 y 22, mientras que las mayores diferencias se mostraron en el vino de las botellas procedentes de los caños 17 y 20

Analizando el efecto en los distintos momentos del embotellado (Figura B.14b), se observa un aumento del OD en las botellas del final del embotellado, debido a la incorporación de aire al terminarse el vino del depósito que se estaba embotellando.

El vaciado del depósito va acompañado de la entrada de aire, cuyo oxígeno se incorpora al vino. El oxígeno del espacio de cabeza medido muestra variabilidad entre las distintas botellas, con niveles que oscilan entre 0,8 mg/L y 1,6 mg/L a lo largo de todo el proceso de embotellado, mostrando un nivel promedio próximo a 1 mg/L.

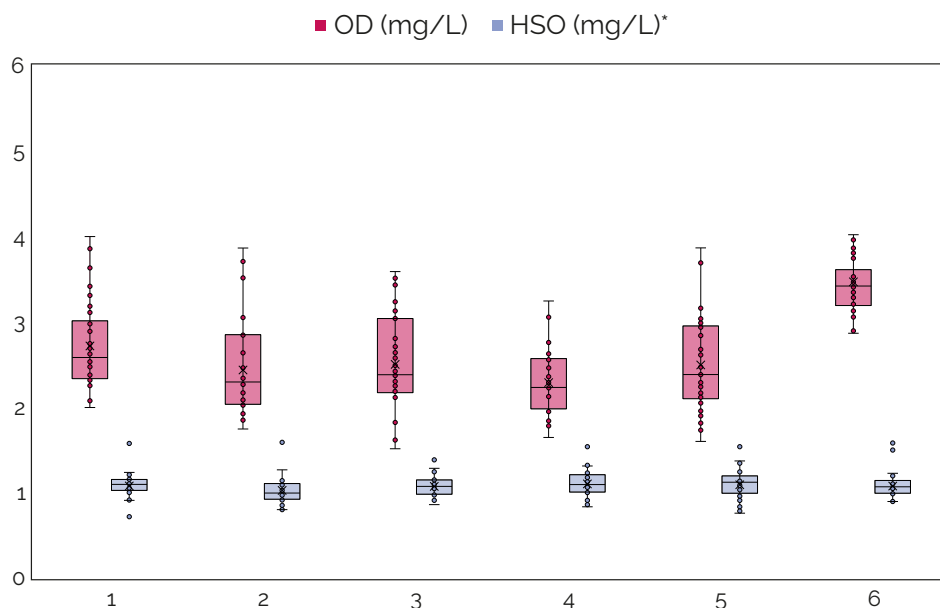


Fig. B.14b: Medidas de las botellas de todos los caños en 6 momentos diferentes

Se encontraron diferencias en las botellas embotelladas en las dos jornadas de trabajo, ya que teniendo en cuenta las botellas por hora y las medidas realizadas durante el embotellado, se encontró que en el primer día se embotelló el 64% del vino del depósito, con unos niveles entre 2,3 y 2,7 mg/L de oxígeno disuelto, y de 1 a 1,1 mg/L de HSO.

Sin embargo, el segundo día se observó un incremento significativo, hasta 3,5 mg/L de oxígeno disuelto y 1,1 mg/L en HSO.

Estos resultados se reflejaron en la tasa total de oxígeno recibido en el embotellado, así el primer día se encontró que en el 27% de las botellas el vino se embotelló con una TPO entre 3,4 y 3,5 mg/L, y en un 37% de botellas con niveles entre 3,6 y 3,8 mg/L; mientras que el segundo día los niveles se incrementaron y en el 36% de las botellas el vino se embotelló con 4,6 mg/L.

B.2.- Incorporación de oxígeno durante el trasiego con inyección de N_2 y filtración a vacío en el embotellado de vino Verdejo I

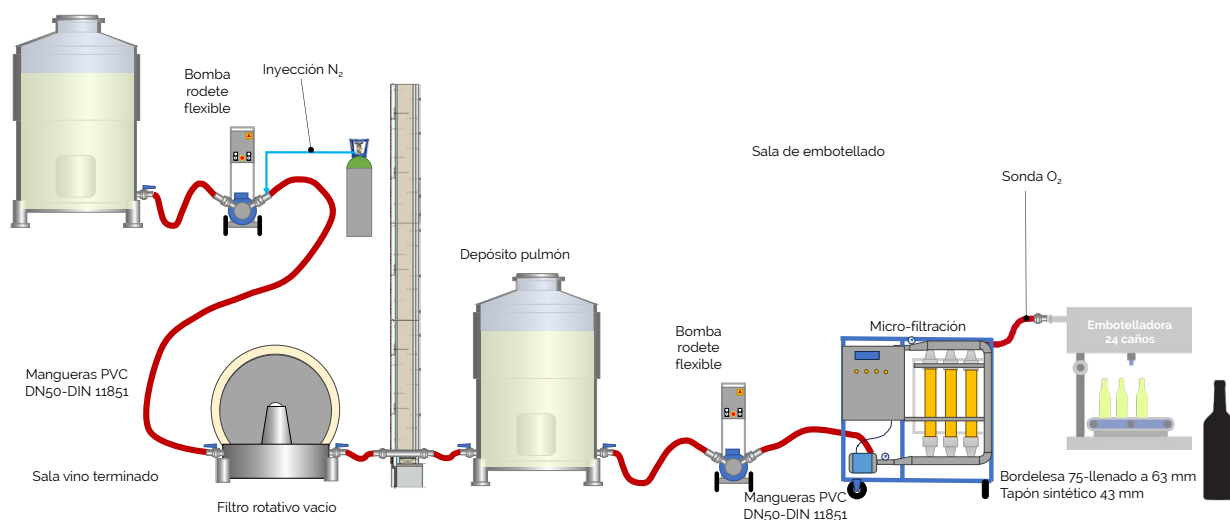


Fig. B.2.1. Esquema de la situación inicial del trasiego y embotellado de un vino variedad Verdejo. T° ambiente= 14,1°C; $Patm.$ = 932 mbar, duración 1 día

El seguimiento del oxígeno disuelto durante el movimiento del vino desde el depósito origen hasta la botella define el oxígeno disuelto que tiene el vino recién embotellado (Figura B.2.1). En la Figura B.2.2 se indica el oxígeno disuelto que tiene el vino que va entrando en la embotelladora durante una jornada de embotellado, al inicio del día los niveles son elevados debido al arrastre del aire contenido en las mangueras y se observa que en unos minutos el vino entra en la embotelladora con unos 8 hPa (0,4 mg/L).

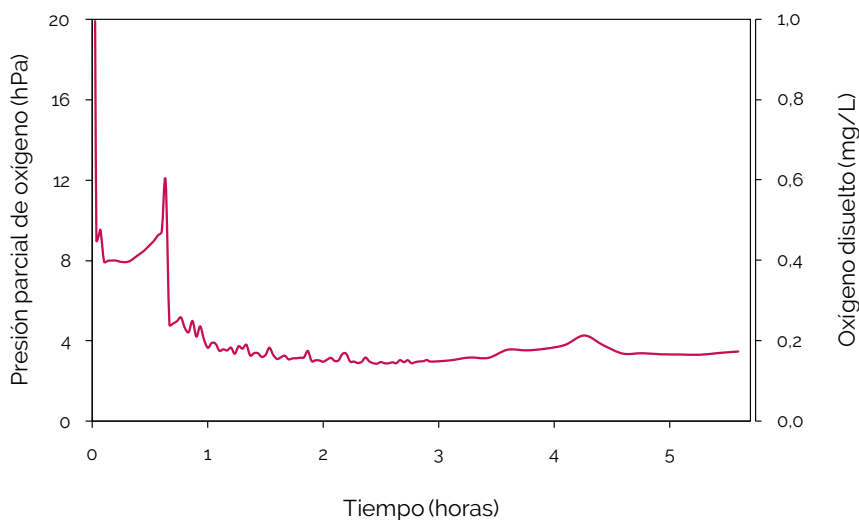


Fig. B.2.2: Medidas del oxígeno disuelto del vino cuando entra a la embotelladora

Durante la jornada de embotellado el vino entra en la embotelladora con una media de 4 hPa (0,2 mg/L) de oxígeno disuelto.

Junto a las botellas empleadas en la bodega se han colocado botellas transparentes equipadas con sensores que permiten la evaluación del oxígeno disuelto en el vino, lo que indica el oxígeno que se incorpora al vino en la embotelladora y también el oxígeno en el espacio de cabeza.

Se han realizado medidas a lo largo de la jornada de embotellado para evaluar el efecto del uso de los distintos caños de la embotelladora, que en este caso cuenta con 24 caños y 6 puntos de taponado. Para ello, se han incorporado 30 botellas equipadas

con sensores en 2 momentos diferentes, lo que ha permitido realizar medidas a botellas procedentes de cada caño.

La *Figura B.2.3a* recoge los resultados obtenidos de las medidas de oxígeno disuelto en el vino y en el espacio de cabeza de las botellas procedentes de cada uno de los caños.

Se observa que en algunos caños la variabilidad es muy elevada (caños 16, 17 y 22), frente a los caños 11, 15, 19 y 20 que muestran la menor variabilidad. Estas situaciones hacen que en el embotellado de este depósito haya botellas con 4 mg/L de oxígeno disuelto y otras con 1,3 mg/L.

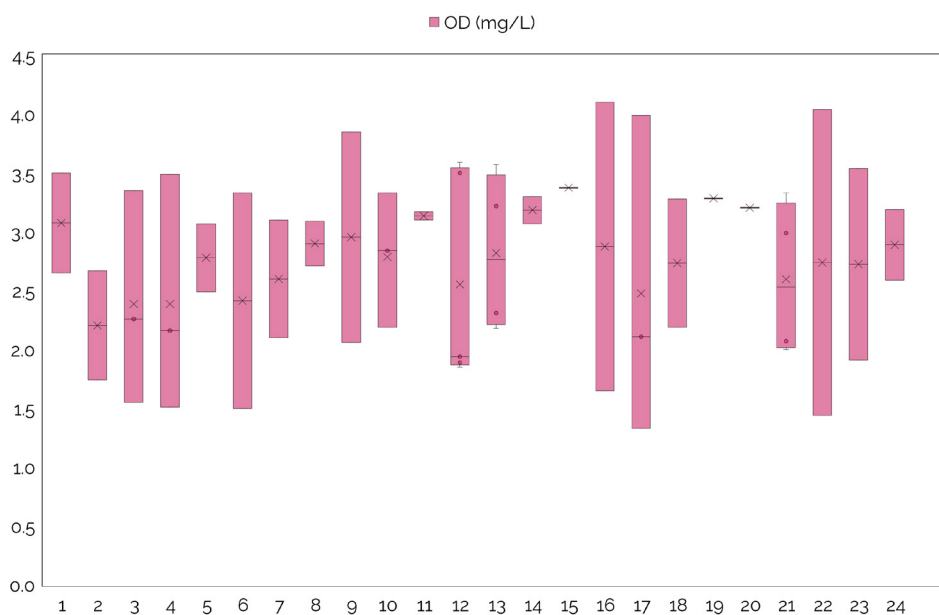


Fig. B.2.3a: Medidas en las botellas de los diferentes caños durante todo el embotellado

Se ha encontrado que el vino embotellado a primera hora tiene un mayor nivel de oxígeno disuelto debido a que cuando comienza a moverse el vino hacia la embotelladora, arrastra el aire contenido en las mangueras y el oxígeno del aire se incorpora al vino (*Figura B.2.3b*).

Cuando el circuito está lleno de vino se observa una reducción significativa del oxígeno disuelto en el vino embotellado, mostrando diferencias superiores a 1 mg/L en el vino de los dos momentos analizados.

La embotelladora empleada cuenta con 6 puntos de taponado, el análisis del efecto de emplear uno u otro punto indica que hay diferencias estadísticamente significativas (*Figura B.2.3c*).

Así, el punto 6 aporta niveles de oxígeno en el espacio de cabeza significativamente más elevados que otros puntos de taponado.

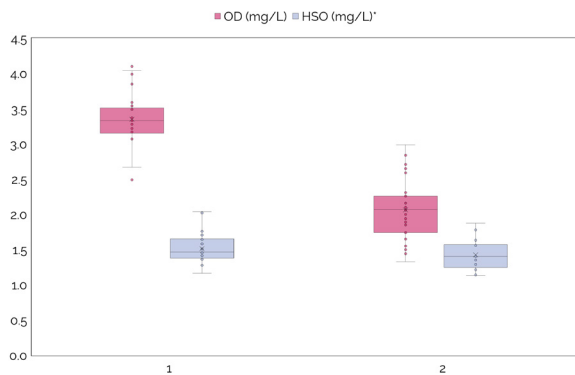


Fig. B.2.3b: Medidas de las botellas de todos los caños en **2 momentos diferentes**

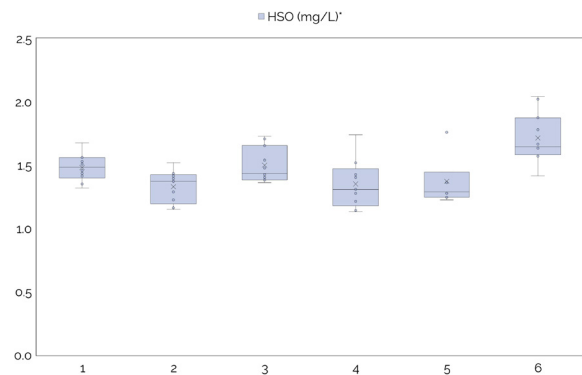


Fig. B.2.3c: Medidas en el espacio de cabeza en botellas procedentes de distintos **puntos de taponado**

De forma general se ha encontrado que el oxígeno total que presentan los vinos recién embotellados es de 4,2 mg/L, correspondiendo el 65% al oxígeno disuelto adquirido en el proceso de movimiento del vino hasta la botella (2,7 mg/L) frente a 1,5 mg/L (35%) presente en el espacio de cabeza.

B.3.- Incorporación de oxígeno durante el trasiego con inyección de N_2 y filtración a vacío en el embotellado de vino Verdejo II

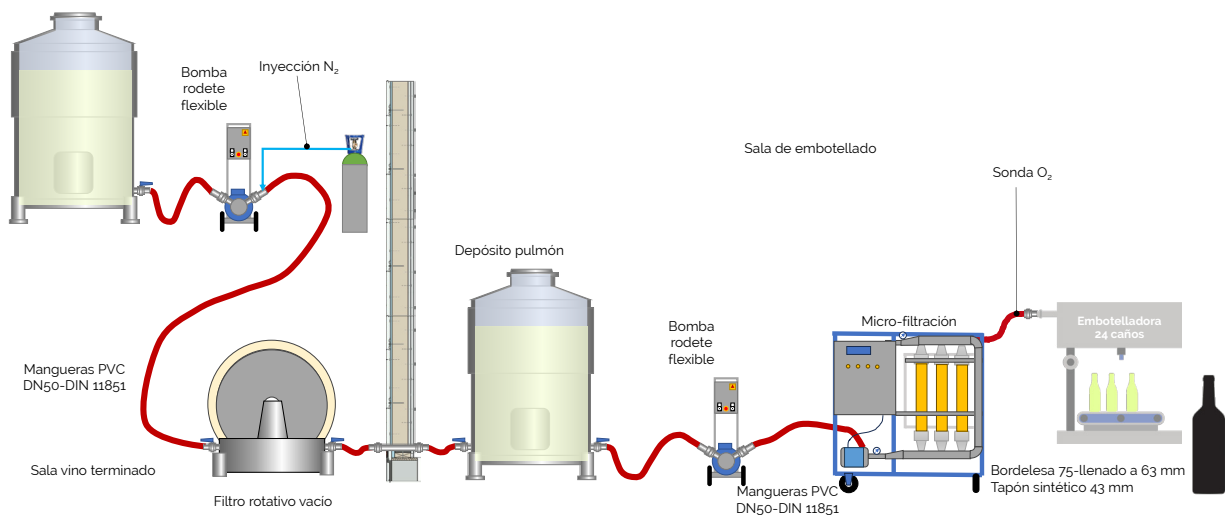


Fig. B.3.1: Esquema de la situación inicial del trasiego y embotellado de un vino variedad Verdejo, T^a ambiente-17°C; Patm.- 938 mbar; duración 1 día

Se realizó el estudio de la incorporación de oxígeno en el vino blanco a embotellar, la medida del oxígeno disuelto a la entrada del equipo de microfiltración se representa en la *Figura B.3.2*.

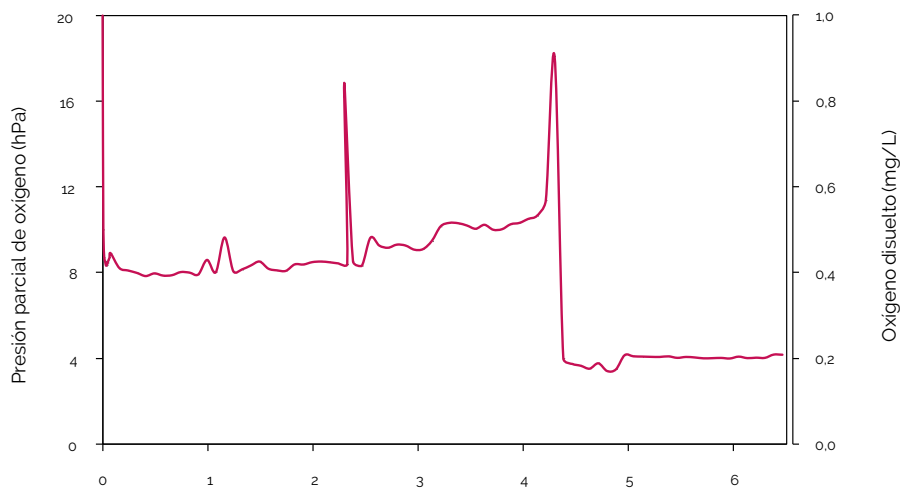


Fig. B.3.2: Medidas de oxígeno en el vino a la entrada del equipo de microfiltración

La sonda de medida de oxígeno que se encontraba colocada a la entrada del equipo de microfiltración registró unos valores promedios de 0,5 mg/L de oxígeno durante todo el embotellado (*Figura B.3.2*), siendo estos valores más bajos al final de la jornada de embotellado, pues el equipo ya estaba en régimen de trabajo, alcanzándose valores de 0,2 mg/L.

Se observan valores puntualmente elevados posiblemente debidos a paradas en el sistema. Tras 4 horas de filtración se produjo una bajada significativa del nivel de oxígeno disuelto, desde 0,5 a 0,2 mg/L, posiblemente debido a la inyección de nitrógeno.

El seguimiento del oxígeno que se incorpora en el vino embotellado se realizó midiendo el oxígeno en el espacio de cabeza y en el seno del vino de diferentes botellas colocadas en la línea de embotellado. La *Figura B.3.3a* muestra los datos obtenidos en las botellas procedentes de los distintos caños. Se realizaron medidas incorporando 24 botellas en 3 momentos distintos de la jornada, de tal forma que las 24 botellas se llenaban con cada uno de los 24 caños.

Los resultados permitieron evaluar el nivel de oxígeno en las botellas al inicio de la jornada (pasada 1), cuando la embotelladora estaba a régimen (pasada 2), y al final de la jornada de embotellado (pasada 3). Estas medidas se realizaron en presión parcial de oxígeno (hPa), que posteriormente se transformaron en mg/L en el caso del OD y para el caso del HSO se expresaron en mg/L, si todo se disolviese en el vino.

Los niveles de oxígeno disuelto manifiestan el oxígeno incorporado en el movimiento y embotellado del vino, se ha encontrado que oscilan entre 1,6 y 3,9 mg/L con diferencias significativas en el oxígeno disuelto en el vino de botellas procedentes de los diferentes caños, así en algunos casos hay una gran variabilidad (caño 7, 8, 17) y otros en los que la variabilidad es menor (caños 4, 9 y 15).

El oxígeno incorporado en el espacio de cabeza varía entre 0,9 y 2,4 mg/L reflejando las variaciones en el taponado.

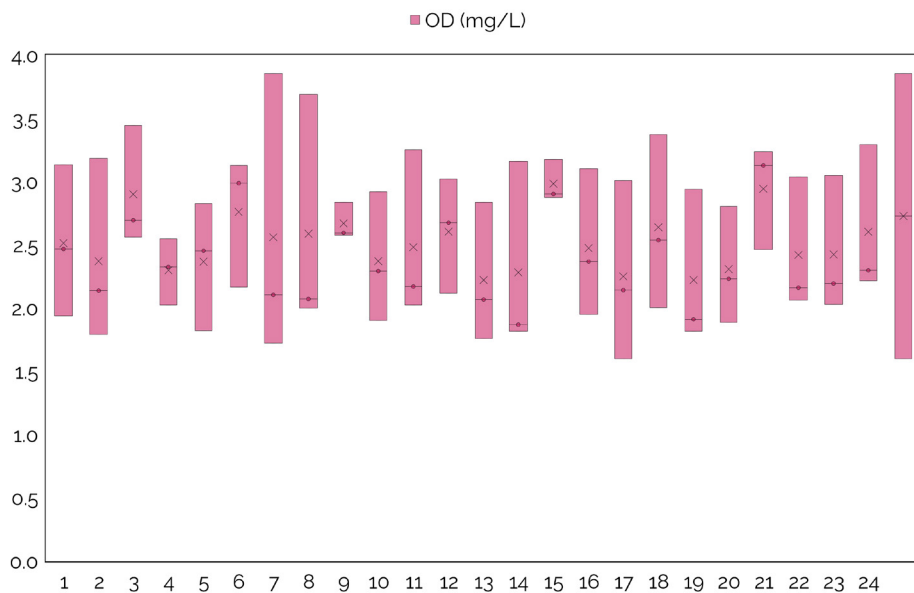


Fig. B.3.3a: Medidas de las botellas de los diferentes caños durante todo el embotellado

La Figura B.3.3b indica que al inicio de la jornada el vino embotellado presenta un nivel significativamente más elevado de oxígeno total, tanto en el espacio de cabeza como disuelto en el vino. El análisis de las variaciones a lo largo del embotellado, las botellas por hora obtenidas y los niveles de oxígeno que se incorporan en cada tramo del embotellado, permite indicar que de forma promediada el vino blanco se ha embotellado con un TPO (suma de OD más HSO) de 4,1 mg/L, siendo el 61% (2,5 mg/L) procedente del oxígeno disuelto y el 39% (1,6 mg/L) del oxígeno del espacio de cabeza. Aunque se pueden encontrar botellas con una TPO de 5,6 mg/L y otras con 2,6 mg/L.

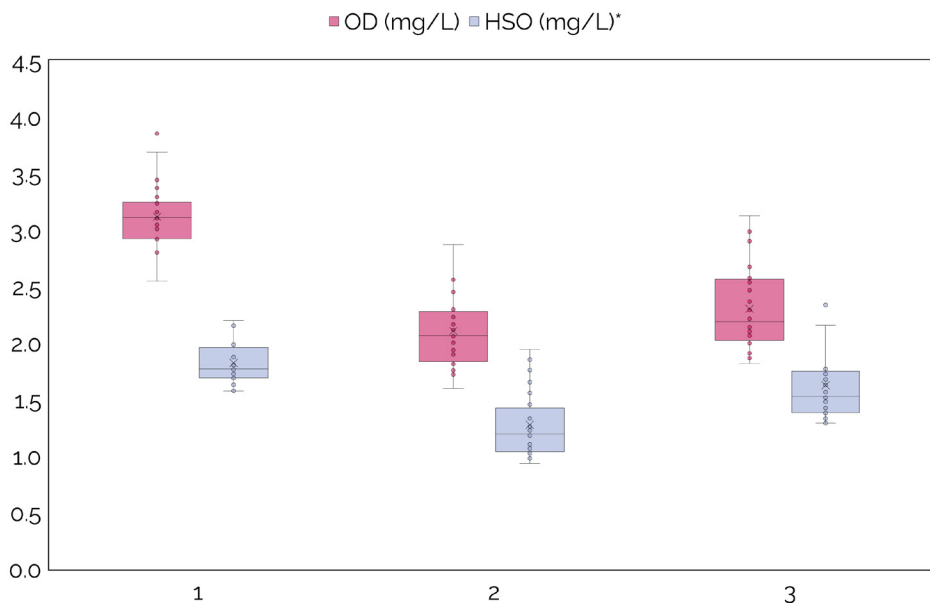


Fig. B.3.3b: Medidas de las botellas de todos los caños en 3 momentos diferentes de la jornada de embotellado

B.4.- Incorporación de oxígeno durante el trasiego con cobertura de N₂ y embotellado con vacío e inyección de N₂ de vino Verdejo

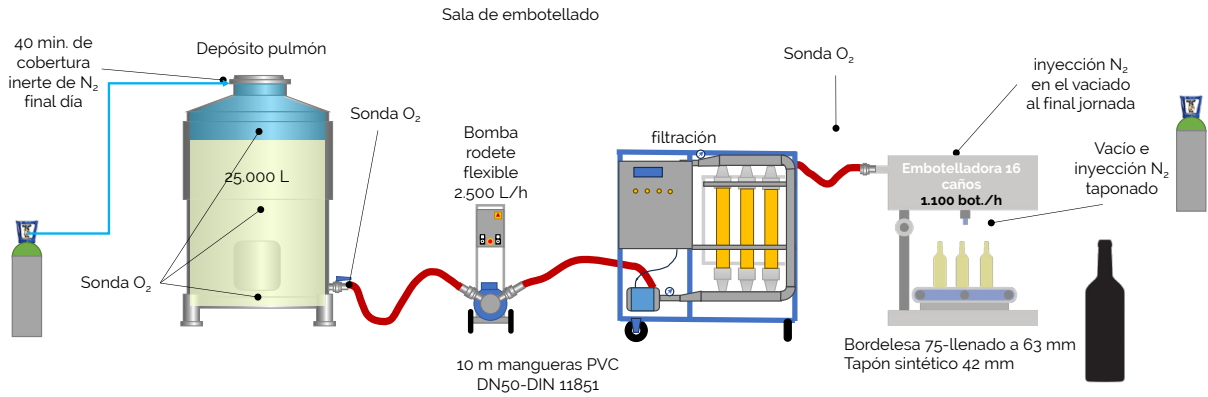


Fig. B.4.1. Esquema de la situación inicial del trasiego y embotellado de un vino variedad Verdejo, Tª ambiente= 14°C; Patm.= 921 mbar; duración 5 días

La Figura B.4.2 muestra el contenido de oxígeno del vino medido a la entrada de la embotelladora durante los 5 días de embotellado. Se observa que en el recorrido desde el depósito pulmón hasta la embotelladora, el vino recibe la incorporación de oxígeno principalmente al inicio de cada jornada.

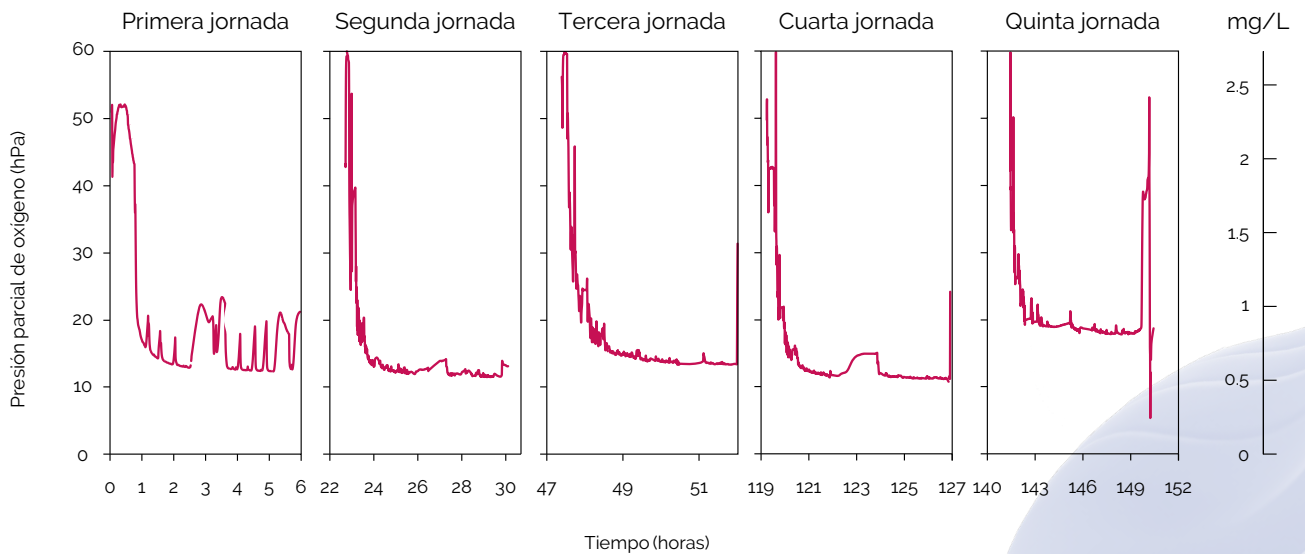


Fig. B.4.2: Medidas de oxígeno disuelto en el vino a la entrada de la embotelladora

Se observa que hay incorporaciones periódicas de oxígeno, especialmente el primer día de embotellado, que pueden suponer un aumento puntual de 0,35 mg/L, y que se deben a las paradas realizadas para colocar botellas, o para los almuerzos o distintos ajustes. Tanto al inicio como al final de la jornada, se observa un incremento de oxígeno debido a la incorporación de aire en la manguera que es bombeado hacia la embotelladora. De forma promediada el vino del depósito origen llega a la embotelladora con 0,9 mg/L de oxígeno disuelto, con variaciones entre días de 0,8 y 1,1 mg/L, cantidad que se añadirá a las incorporaciones propias del proceso de llenado y taponado.

La evaluación del oxígeno que recibe el vino recién embotellado se realiza gracias a la incorporación de 16 botellas transparentes provistas de sensores que permiten medir el oxígeno sin alterar el vino. La *Figura B.4.3a* presenta el oxígeno disuelto encontrado en las botellas que se llenaron de vino con cada uno de los 16 caños durante los 5 días de embotellado. El vino en la botella presentó niveles de oxígeno disuelto entre 2 y 3,5 mg/L, lo que indica una incorporación de 1 a 2,5 mg/L en la embotelladora. En algunos casos alcanzando niveles de 4 y 5 mg/L. No se han encontrado diferencias estadísticamente significativas entre emplear uno u otro caño, destacando la gran variabilidad encontrada en el oxígeno disuelto del vino con diferencias de hasta 3 mg/L entre botellas, situación que permite encontrar botellas con 2 mg/L y otras con 5 mg/L.

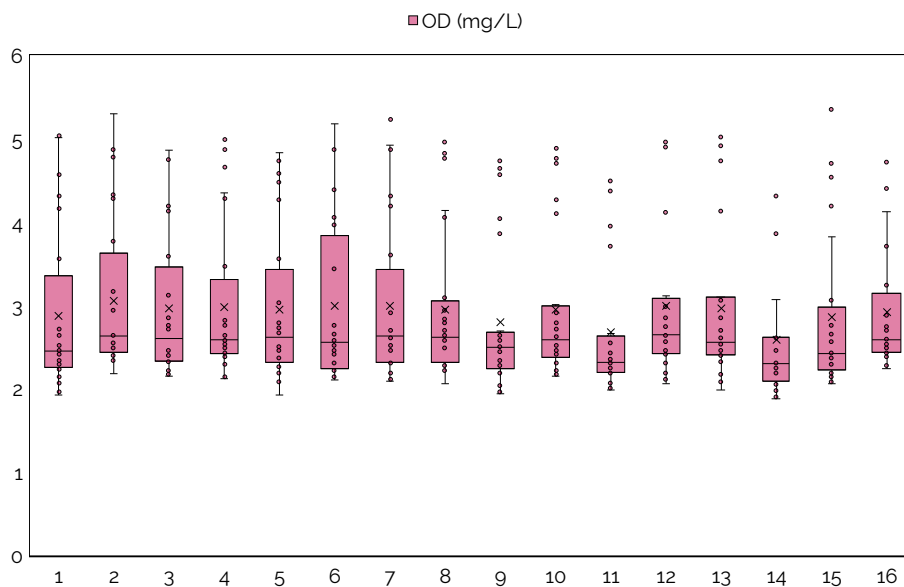


Fig. B.4.3a: Análisis de las medidas de las botellas de los diferentes caños durante todo el embotellado

El análisis de los resultados obtenidos en los 24 momentos distintos del embotellado (*Figura B.4.3b*) evidencia lo descrito anteriormente en relación con la importancia de las primeras horas de embotellado. En las 5 jornadas de embotellado se observa que el contenido en oxígeno disuelto del vino de las botellas en las primeras horas es significativamente más elevado, con niveles 4 mg/L del primer día y de 4,8 el último día, frente a los valores (entre 2,8 y 3,5 mg/L) de las botellas embotelladas en otros momentos de cada día. Considerando las botellas/hora, se puede estimar que las primeras 1.300 botellas de cada jornada presentaron hasta un 27% más de oxígeno que el resto de las botellas embotelladas cada día. Por otro lado, hay que destacar la incorporación de oxígeno el último día, hasta 3,2 mg/L, al final del embotellado debido al bombeo de aire junto al poco volumen de vino restante en el depósito prácticamente vacío y por tanto lleno de aire.

Respecto al oxígeno en el espacio de cabeza, se observaron diferencias en los distintos momentos del embotellado, con botellas que presentaron 0,31 mg/L frente a otras con 2,2 mg/L posiblemente debido a un desajuste en la inyección de N_2 . La variación en el oxígeno total recibido en el embotellado (TPO) varía más de 4 mg/L entre botellas, por lo que se ha encontrado botellas con 3 mg/L y otras con 7 mg/L, del inicio

de las jornadas de embotellado. Esta diferencia en el contenido de la TPO repercutió principalmente en los 5.500 L que fueron embotellados durante el último día, por lo que aproximadamente 7.300 botellas fueron embotelladas con un 11,5% más de oxígeno que las embotelladas los 2 primeros días.

En resumen, se embotellaron 25.000L de vino que de forma promediada contaban con un oxígeno total de 4,6 mg/L, siendo 2,9 mg/L (62%) del oxígeno disuelto y 1,7 mg/L (38%) del espacio de cabeza. Sin embargo, durante el proceso se encontraron botellas con diferencias de hasta 2,8 mg/L en la TPO cuyos vinos evolucionarán de forma muy diferente hasta llegar al consumidor. Así, se ha encontrado un 5% de botellas con TPO entre 6,2 y 6,5 mg/L frente a un 7% otras con niveles significativamente más bajos (3,7 mg/L),

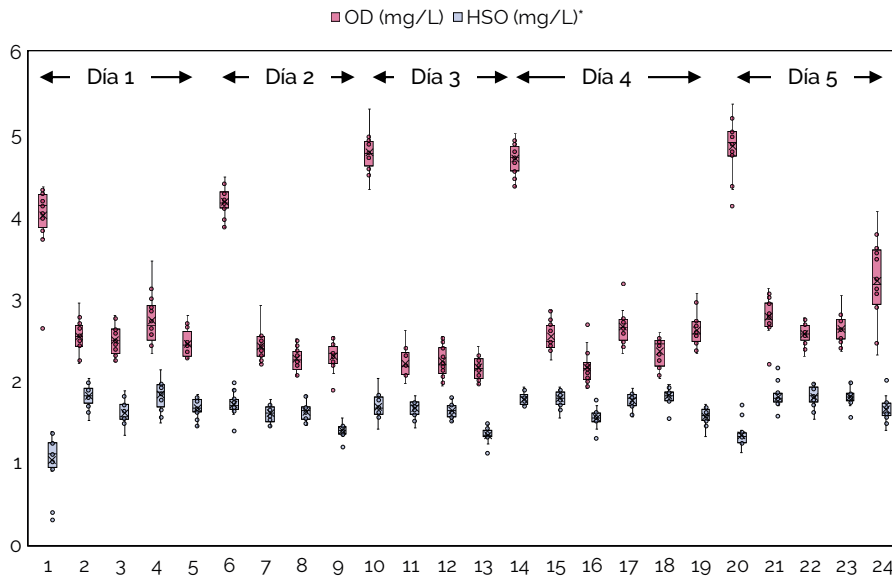


Fig. B.4.3b: Medidas de las botellas de todos los caños en 24 momentos diferentes

B.5.- Incorporación de oxígeno durante el trasiego y embotellado con inyección de CO₂ de vino Verdejo

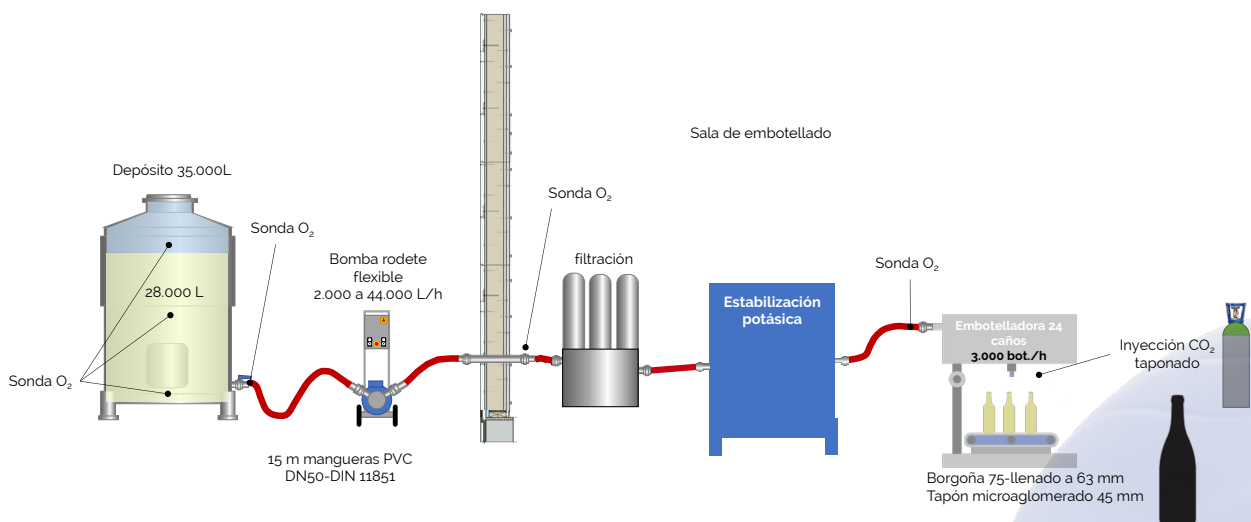


Fig. B.5.1. Esquema de la situación inicial del trasiego y embotellado de un vino variedad Verdejo, Tª ambiente- 16,4°C; Patm- 934 mbar; duración 3 días

El seguimiento del nivel de oxígeno en distintos puntos de los 28.000L de vino, durante el vaciado del depósito origen, se presenta en la *Figura B.5.2*. Se puede ver que el espacio libre en el depósito de 35.000L es aire (170 hPa), cuyo oxígeno está en contacto con la superficie del vino. Respecto al nivel de oxígeno en el vino situado a 60 cm y a 10 cm por debajo de la superficie, se observa que se mantiene por debajo de 0,1 mg/L durante el primer día de embotellado. Sin embargo, con el inicio de la segunda jornada se observa un incremento hasta 0,3 mg/L en el nivel de oxígeno en el vino que está en contacto con el espacio de cabeza (aire) (sonda a 10cm), debido al contacto con el aire.

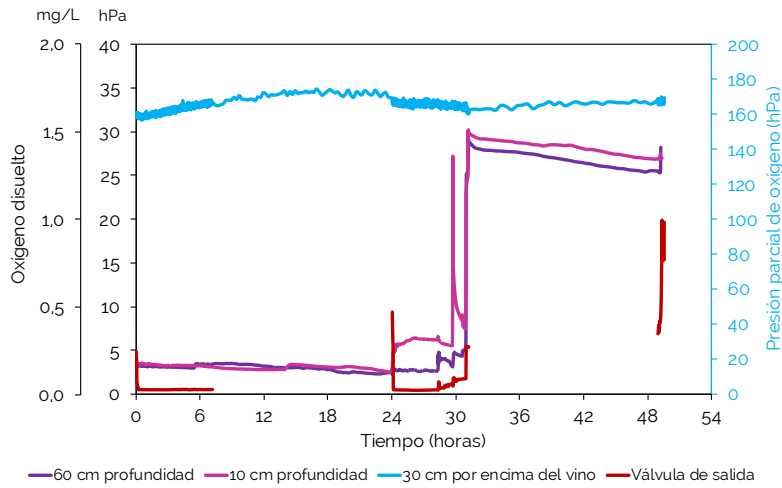


Fig. B.5.2: Medidas de oxígeno en el depósito trasegado

Al final de la segunda jornada de embotellado se produce un incremento significativo en el oxígeno (sonda a 10 cm) alcanzando 1,4 mg/L, debido a la incorporación de 500L de vino de otro depósito. Esta adición provocó un incremento de hasta 1,5 mg/L de oxígeno, registrados en las sondas que miden OD a una profundidad de 10 cm y 60 cm, por ello en el vino se mantuvieron niveles entre 1,3 y 1,5 mg/L de oxígeno hasta el final del embotellado.

El seguimiento de la incorporación de oxígeno en los 28.000L de vino durante su recorrido desde el depósito origen hasta la embotelladora se presenta en la *Figura B.5.3*. Las lecturas del oxígeno a la entrada de la embotelladora mostraron un nivel inicial de 1 mg/L que bajó hasta los 0,2 mg/L, mostrando aumentos de 0,2 mg/L debido a paradas y descansos durante los dos primeros días de embotellado.

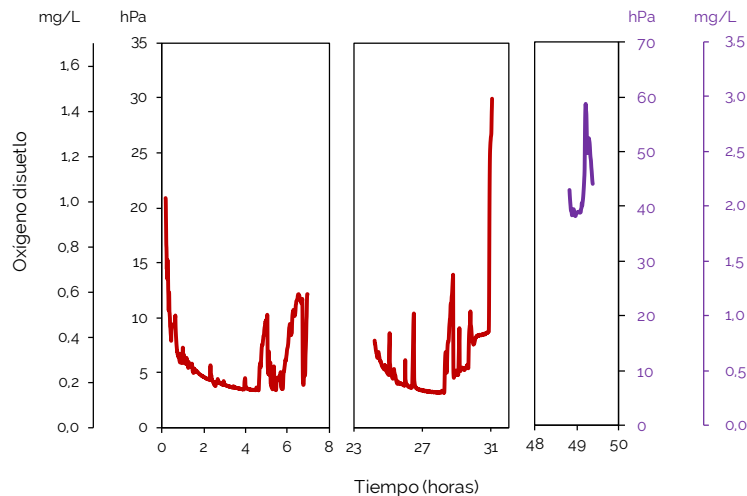


Fig. B.5.3: Medidas de oxígeno en el vino a la entrada de la embotelladora

Al final de la segunda jornada se observa el incremento de oxígeno mencionado debido a la incorporación de 500 litros de vino de otro depósito.

Al final del embotellado, el tercer día, cuando ya que quedaba poco vino en el depósito, los niveles de oxígeno registrados en la sonda de la entrada a la embotelladora aumentaron hasta 3 mg/L.

El vino llegaba a la embotelladora con un nivel medio de oxígeno disuelto de 0,9 mg/L.

El seguimiento del oxígeno incorporado en cada botella durante el embotellado se ha realizado con la medida de 24 botellas seguidas en 11 momentos distintos del proceso.

El OD que presenta el vino en la botella refleja la incorporación de oxígeno al vino durante los diferentes procesos por los que va pasando hasta la taponadora. La *Figura B.5.4a* muestra que en la botella algunos vinos tienen 2 mg/L y otros el doble, 5,4 mg/L de oxígeno disuelto, mostrando en algunos caños (3, 8, 14, 23) más variabilidad que en otros (1, 5, 16, 20).

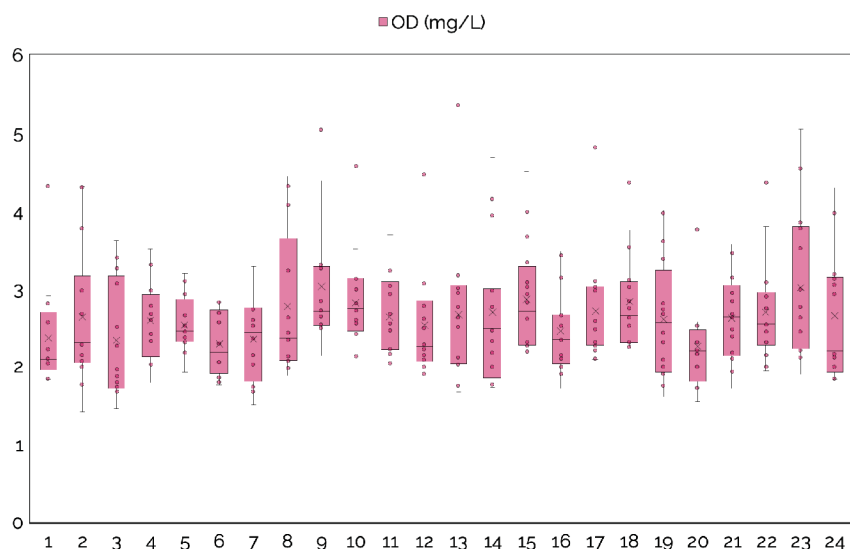


Fig. B.5.4a: Medidas del oxígeno disuelto en el vino de las botellas de los diferentes caños durante todo el embotellado

Los resultados del OD evaluado en distintos momentos indica que la incorporación de oxígeno en los últimos litros bombeados hacia la embotelladora aumentó, posiblemente debido a la entrada de aire que se refleja en el OD del vino embotellado (momento 11, *Figura B.5.4b*). La medida del HSO muestra el oxígeno que hay en el espacio de cabeza y que potencialmente pasará al vino, los resultados indican en algunas botellas niveles 0,9 mg/L, mientras que en otras es el triple, 2,7 mg/L (*Figura B.5.4b*).

En general, el 27% de las botellas mostraron unos niveles de HSO 1,2 y 1,4 mg/L, que corresponden al embotellado del primer día. Sin embargo, el segundo día se encontró que en el 73% de las botellas los niveles aumentaron a 1,7 y 1,9 mg/L. Respecto al oxígeno disuelto, los vinos incorporaron a los 0,9 mg/L que llevan al llegar a la embotelladora, cantidades de oxígeno entre 1,5 y 2,7 mg/L en los distintos momentos del embotellado. Así, en el 41% de las botellas el vino presentó entre 2,2 y 2,5 mg/L de oxígeno disuelto, y en el 59% de las botellas el vino mostró cantidades superiores, entre 2,6 y 3,6 mg/L.

En resumen, el oxígeno total que reciben los vinos embotellados (TPO) indica el oxígeno total recibido por los vinos en el embotellado, que se debe en mayor proporción al oxígeno disuelto que al oxígeno en el espacio de cabeza. En algunos momentos se embotellaron vinos con TPO entre 3,4 y 4,0 mg/L (un 34%), mientras que en otros momentos el vino presentó niveles entre 4,2 y 5,3 mg/L (en el 66% de las botellas).

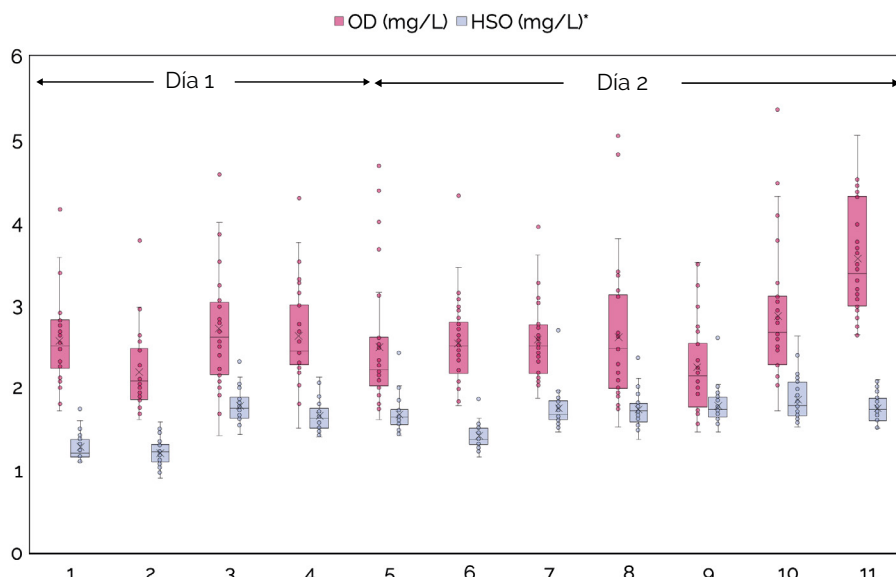


Fig. B.5.4b: Medidas en las botellas de todos los caños en 11 momentos diferentes del embotellado

B.6 - Incorporación de oxígeno durante el trasiego con cobertura de N₂ con bomba y gravedad para el embotellado con inyección de N₂ de vino Tinta de Toro

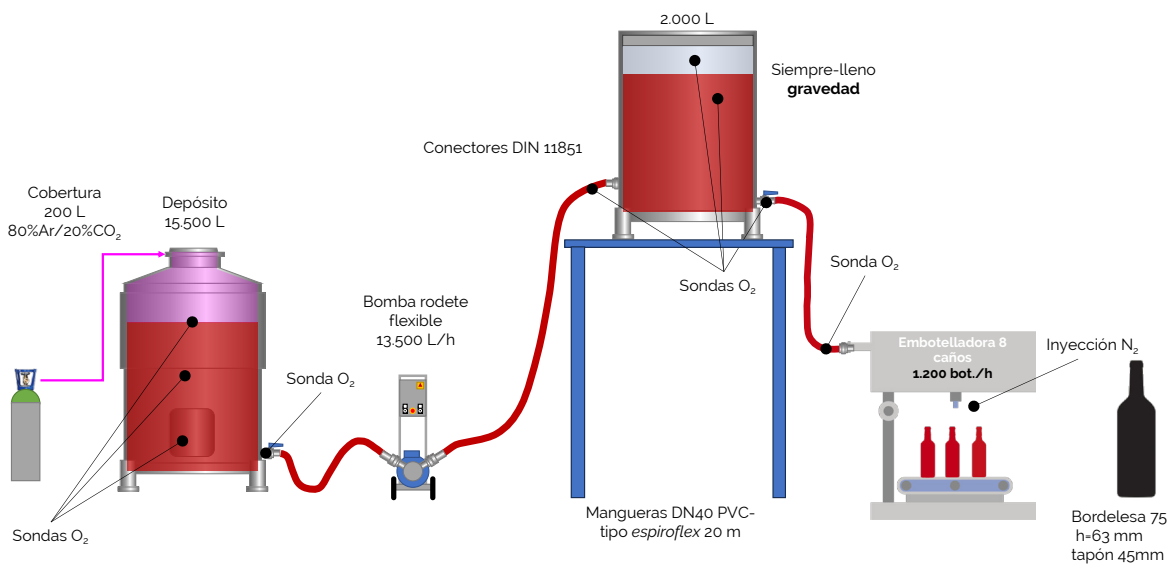


Fig. B.6.1. Esquema de la situación inicial del trasiego y embotellado de un vino variedad Tinta de Toro. Tª ambiente= 9,9°C. Patm.= 942 mbar; duración 4 días

El movimiento del vino desde el depósito origen hasta la embotelladora se presenta en la *Figura B.6.2*, indicar que entre las 12 y las 45 horas el sistema estuvo parado debido a problemas en la embotelladora, y la manguera siguió conectada a la salida del depósito.

Se observa que, a pesar de crear en las paradas nocturnas, una capa inerte sobre el vino del depósito origen con 200 litros de CO₂/Ar, el espacio de cabeza es aire (sondas 15 cm y 30 cm aire). Esta situación hace que el vino incremente su nivel de oxígeno disuelto de 0,05 mg/L el primer día a 0,8 mg/L de oxígeno el último día de embotellado (ver sonda sumergida 10 cm en el vino).

A la salida del depósito (sonda válvula de salida) se observa que el oxígeno disuelto del vino retenido en la manguera aumenta hasta 1,2 mg/L, debido a que la embotelladora está parada y el vino no circula. Con el inicio de la siguiente jornada el vino circula y los niveles de oxígeno disuelto a la salida del depósito son bajos, pero se incrementan significativamente hasta 0,8 mg/L debido a la disolución del oxígeno del espacio de cabeza.

La *Figura B.6.3* recoge las medidas a la entrada y a la salida del depósito pulmón, que alimenta a la embotelladora, y también a la entrada de la embotelladora. El vino entra en el depósito pulmón con un valor promedio de 0,4 mg/L de oxígeno disuelto, valor que se incrementa con las incorporaciones producidas en este depósito, que sumado al oxígeno agregado durante el llenado de la botella dan lugar al oxígeno disuelto presente en el vino recién embotellado.

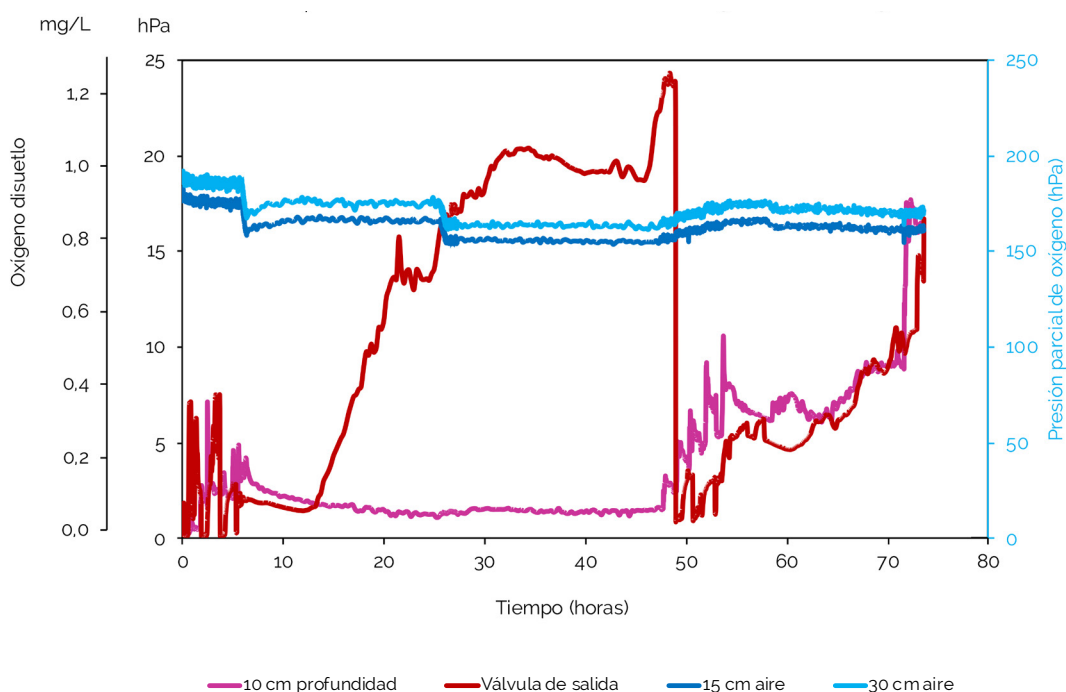


Fig. B.6.2: Medidas de oxígeno en el depósito trasegado

Se observa que al inicio de la primera jornada de trabajo el vino entra en la embotelladora con más de 2,5 mg/L de oxígeno disuelto, nivel provocado por la incorporación al vino del aire de las mangueras.

Durante la parada (dos días) todo el sistema estuvo montado provocando incorporación de oxígeno por las mangueras. Esta situación se refleja en el nivel de oxígeno del vino al entrar en la embotelladora, que pasa de menos de 0,3 mg/L en la primera jornada de embotellado a 2 mg/L al final del proceso el cuarto día, mostrando de forma promediada 0,7 mg/L.

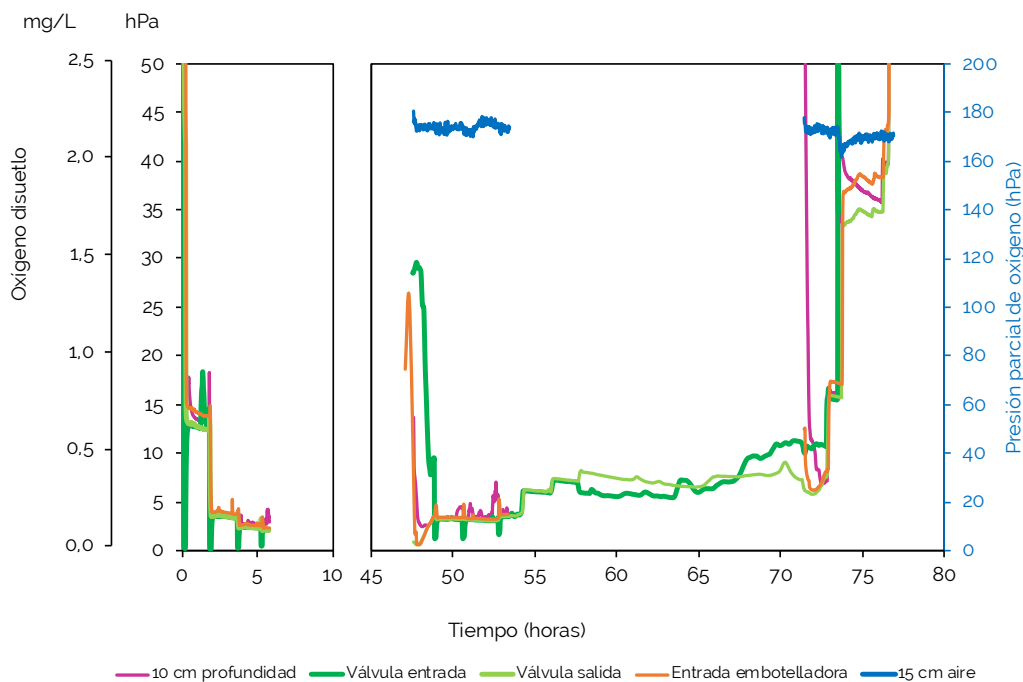


Fig. B.6.3: Medidas de oxígeno en el depósito pulmón y a la entrada embotelladora

Las Figuras 6.4 presentan los resultados de las medidas realizadas a las botellas con sensores incluidas en distintos momentos del proceso de embotellado.

El proceso de llenado y taponado se estudió como se ha descrito anteriormente. Los niveles de oxígeno disuelto en las botellas procedentes de los distintos caños variaron desde valores por encima de 9 mg/L que muestran al vino saturado de oxígeno hasta valores de 1,6 mg/L (Figura B.6.4a). Este incremento del oxígeno disuelto en la embotelladora, desde niveles medios de 0,7 mg/L a casi saturación, se relaciona con la turbulencia en el llenado de la botella vacía, en la que la inyección de N_2 no parece tener ningún efecto. No se han encontrado diferencias significativas en el uso de los distintos caños.

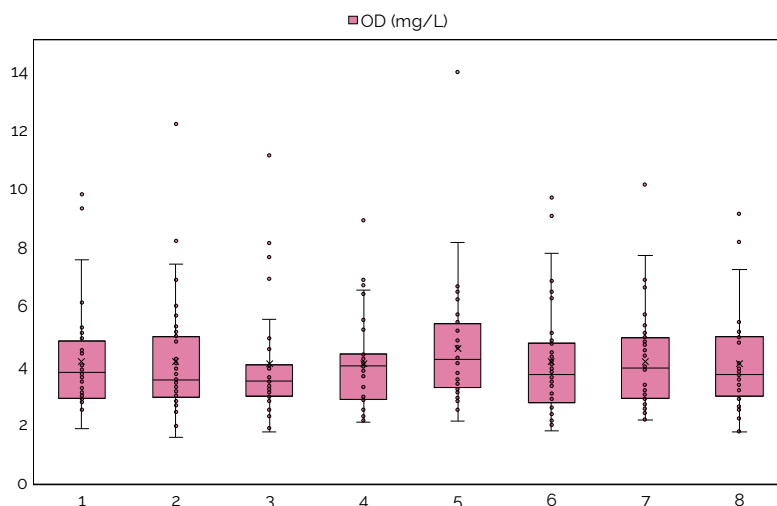


Fig. B.6.4a: Medidas del oxígeno disuelto en las botellas llenadas en los diferentes caños durante todo el embotellado

El oxígeno total que reciben los vinos en el embotellado es la suma del oxígeno disuelto y del oxígeno en el espacio de cabeza, que con el tiempo se disolverán en el vino. Los resultados indican que el vino embotellado muestra alto contenido de oxígeno disuelto (*Figura B.6.4b*), especialmente al inicio de cada jornada con datos por encima de 6 mg/L. Respecto al oxígeno en el espacio de cabeza, los niveles de oxígeno que potencialmente se incorporarán al vino, oscilan entre 1,3 mg/L y 3,2 mg/L a lo largo de todo el embotellado (*Figura B.6.4c*). De forma promediada HSO es de 1,8 mg/L que con el tiempo se incorporará al vino y que sumado al OD promedio indica que el vino recién embotellado presenta una cantidad total de oxígeno (TPO) promedia de 5,9 mg/L.

Atendiendo a las medidas realizadas y al flujo de botellas por hora, se ha encontrado que el vino del 12% de las botellas cuenta con una TPO superior a 8 mg/L, en el 40% de las botellas entre 8 y 5,3 mg/L, mientras que el vino del 48% de las botellas presenta una TPO entre 4,4 y 5 mg/L. Estas diferencias repercuten en la evolución del vino en botella y hacen que el consumidor pueda encontrarse que el vino de distintas botellas presenta características muy diferentes.

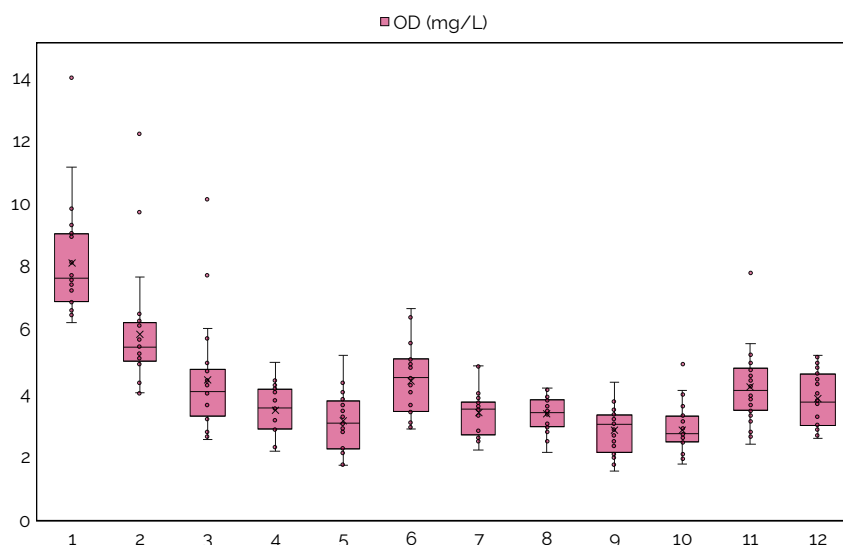


Fig. B.6.4b: Medidas del oxígeno disuelto en el vino de las botellas de todos los caños en 12 momentos diferentes

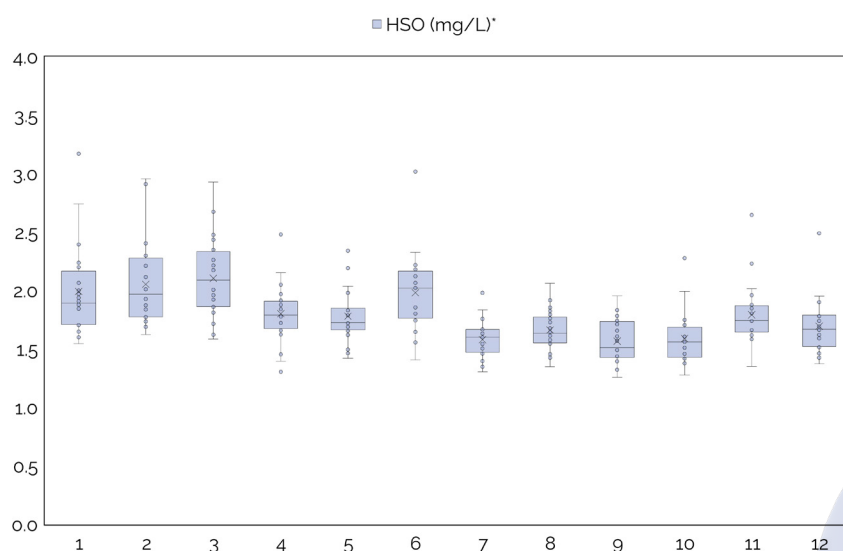


Fig. B.6.4c: Medidas del oxígeno en el espacio de cabeza de las botellas de todos los caños en 12 momentos diferentes

B.7.- Incorporación de oxígeno durante el trasiego inertizado y embotellado de vino tinto Tempranillo

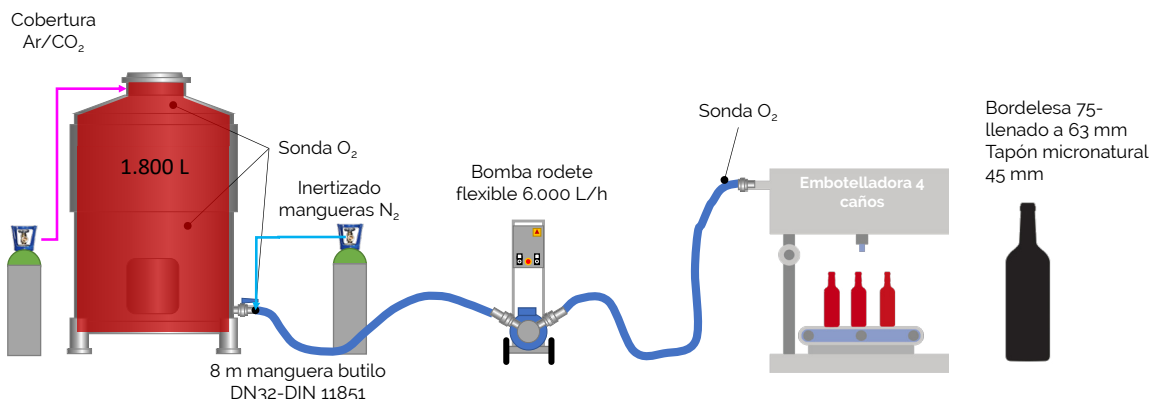


Fig. B.7.1. Esquema de la situación inicial del trasiego y embotellado de un vino variedad Tempranillo, T° ambiente = 16,8°C; $Patm.$ = 932 mbar; duración 1 día

El estudio de los aportes de oxígeno durante el embotellado se monitorizó gracias a las medidas realizadas con las sondas de oxígeno instaladas según se indica en la *Figura B.7.1*. Las mangueras empleadas fueron de butilo y se inertizaron antes de comenzar el trasiego. La inertización se realizó con N_2 durante 2 minutos a un caudal de $1 \text{ m}^3/\text{h}$ y 1013 mbar de presión atmosférica, hasta que se alcanzaron $0,1 \text{ mg/L}$ de oxígeno en su interior. Durante todo el embotellado, el vino se acompañó con una manta de CO_2/Ar , es decir se realizó un blanketing por un total de 215 minutos, incorporando CO_2/Ar a un caudal de $1,2 \text{ m}^3/\text{h}$ y 1013 mbar de presión atmosférica. Este proceso permitió mantener el espacio de cabeza del depósito origen durante todo el embotellado con niveles bajos de oxígeno, como lo indicó la sonda situada a 30 cm por encima del vino, que registró unos valores promedio de 30 hPa.

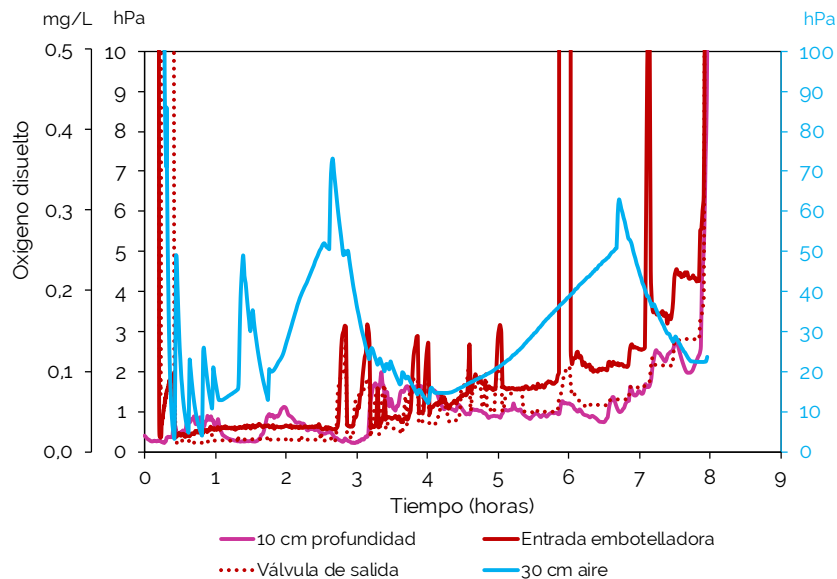


Fig. B.7.2: Medidas de oxígeno en el depósito origen

Las acciones de inertización permitieron mantener al vino con niveles bajos de oxígeno disuelto. La sonda sumergida 10 cm en el vino indicó, que salvo en momentos puntuales, niveles por debajo de 0,01 mg/L, mostrando un ligero incremento hasta 0,1 mg/L en el vaciado, *Figura B.72*.

Resultados muy semejantes se obtuvieron de la válvula colocada a la salida del depósito, que registró en el vino valores desde 0,02 mg/L hasta 0,1 mg/L.

A la entrada de la embotelladora se observó un ligero incremento de oxígeno disuelto en el vino, variando entre 0,02 y 0,2 mg/L. Las paradas para colocación de botellas o ajustes de la embotelladora provocaron incrementos puntuales que supusieron incorporaciones de oxígeno al vino de 0,1 mg/L y en dos momentos más de 0,5 mg/L.

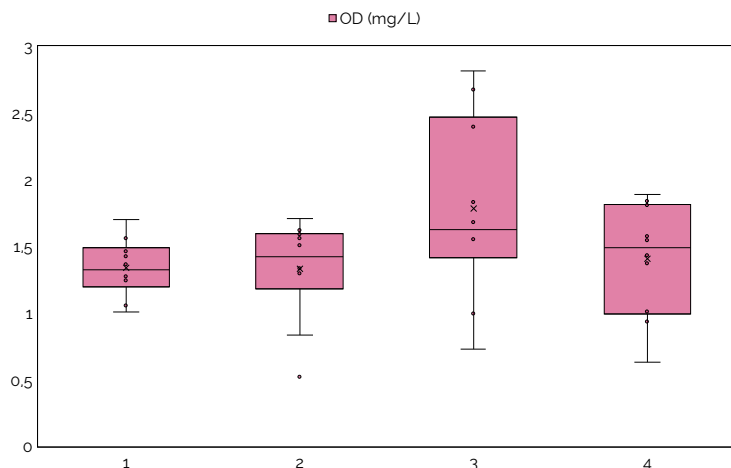


Fig. B.7.3a: Medidas de las botellas de los diferentes caños durante todo el embotellado

El seguimiento del oxígeno incorporado durante el proceso de llenado y taponado de las botellas se presenta en la *Figura B.7.3a*. Se observan diferencias en el oxígeno disuelto del vino procedente de los distintos caños, mostrando una variabilidad de 2,3 mg/L, con vinos que presentaron 0,5 mg/L y otros 2,8 mg/L (*Figura B.7.3a*). La mayor heterogeneidad la presentaron los vinos embotellados en el caño 3, posiblemente debido a una mayor turbulencia en el llenado de la botella.

Respecto al efecto de la duración del embotellado, la *Figura B.7.3.b* muestra los resultados obtenidos de las medidas realizadas en el vino embotellado en 5 momentos distintos de la jornada.

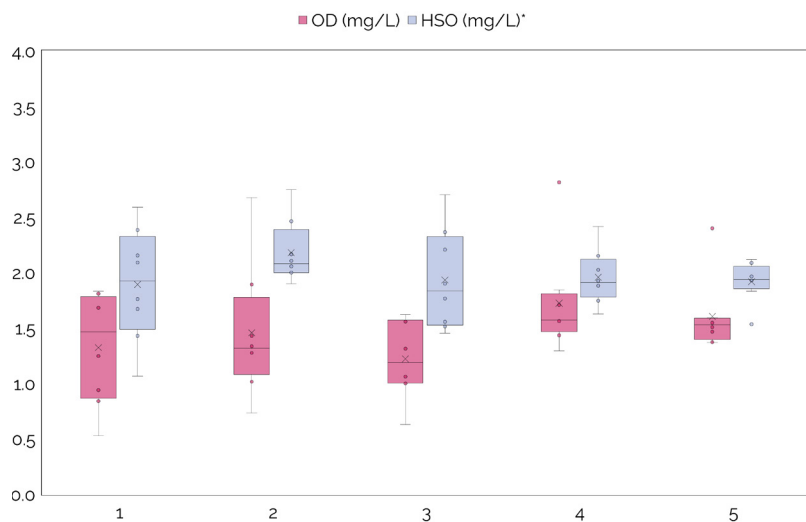


Fig. B.7.3b: Medidas de las botellas de todos los caños en 5 momentos diferentes

Las medidas realizadas en los distintos momentos son representativas del oxígeno que reciben los vinos en un número de botellas (según botellas/hora). Se observa que el nivel de oxígeno disuelto aumenta con el tiempo, lo que provocó que el vino del 29% de las botellas se embotellara con niveles entre 1,2 y 1,5 mg/L de oxígeno disuelto, y el vino del 71% de las botellas con valores entre 1,6 y 1,7 mg/L. Respecto al oxígeno en el espacio de cabeza, durante todo el embotellado se encontraron niveles semejantes, todas las botellas presentaron HSO entre 1,9 y 2,2 mg/L.

La suma del OD y HSO indica la cantidad de oxígeno recibida en el embotellado (TPO), y en este caso se han encontrado botellas con niveles entre 3,2 y 3,7 mg/L. De forma promediada, el 59% de las botellas presentaron una TPO entre 3,2 y 3,5 mg/L y el 41% restante entre 3,6 y 3,7 mg/L. Estos resultados nos indican que el oxígeno disponible para el vino recién embotellado proviene de la suma del oxígeno presente en el espacio de cabeza de la botella, que con el tiempo se incorporará al vino y que supone entre el 54% y el 61% del total, y del oxígeno disuelto que tiene el vino que corresponde entre el 47-39% del total.

B.8.- Incorporación de oxígeno durante el trasiego sin inertizado y embotellado de vino tinto Tempranillo

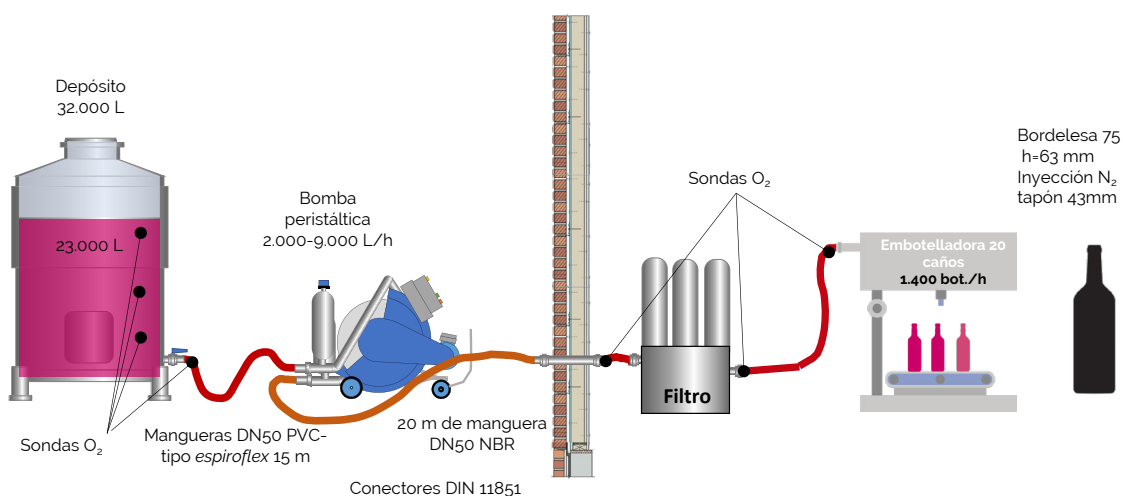


Fig. B.8.1. Esquema de la situación inicial del trasiego y embotellado de un vino variedad Tempranillo, T° ambiente $+19,3^{\circ}\text{C}$; $\text{Patm.} = +931 \text{ mbar}$; duración 3 días

La medida de la incorporación de oxígeno en el vino durante su movimiento desde el depósito origen hasta la embotelladora se realizó en distintos puntos del recorrido. Durante los 3 días se observó que el nivel de oxígeno disuelto en el vino del depósito aumentaba debido a la incorporación del oxígeno del aire del espacio de cabeza, que aumentaba según se vaciaba el depósito.

Las sondas sumergidas en el vino a 10 cm y a 60 cm mostraron el primer día valores semejantes, unos 0,1 mg/L, saliendo el vino del depósito con 0,2 mg/L. En la segunda jornada de trabajo se observó un incremento en el vino que salía del depósito con 0,4 mg/L y tercer día los niveles aumentaron significativamente a lo largo de la jornada, desde 0,5 mg/L hasta los 3 mg/L.

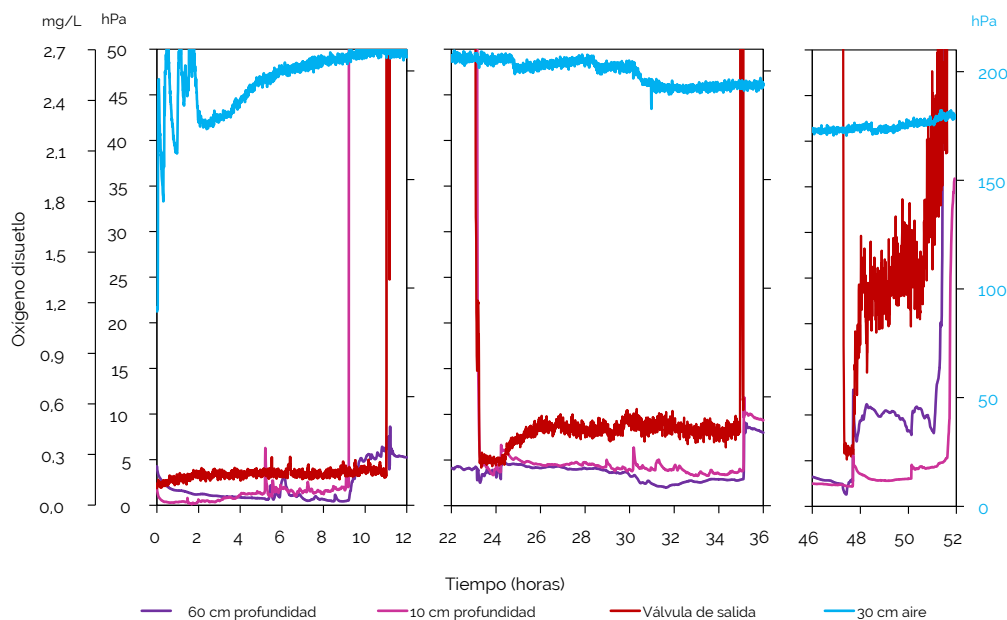


Fig. B.8.2: Medidas de oxígeno en el depósito origen trasegado

Según va llegando el vino a la embotelladora, se ha monitorizado el nivel de oxígeno disuelto a la salida de la tubería fija, a la salida del filtro y a la entrada a la embotelladora.

Como en otras ocasiones, se observan niveles más elevados al inicio de las jornadas, están por debajo de 0,3 mg/L en el vino que entra en la embotelladora la primera jornada, 0,42 mg/L en la segunda y algo más elevados (1 mg/L) el tercer día, entrando a la embotelladora los últimos litros de vino con niveles de hasta 1 mg/L.

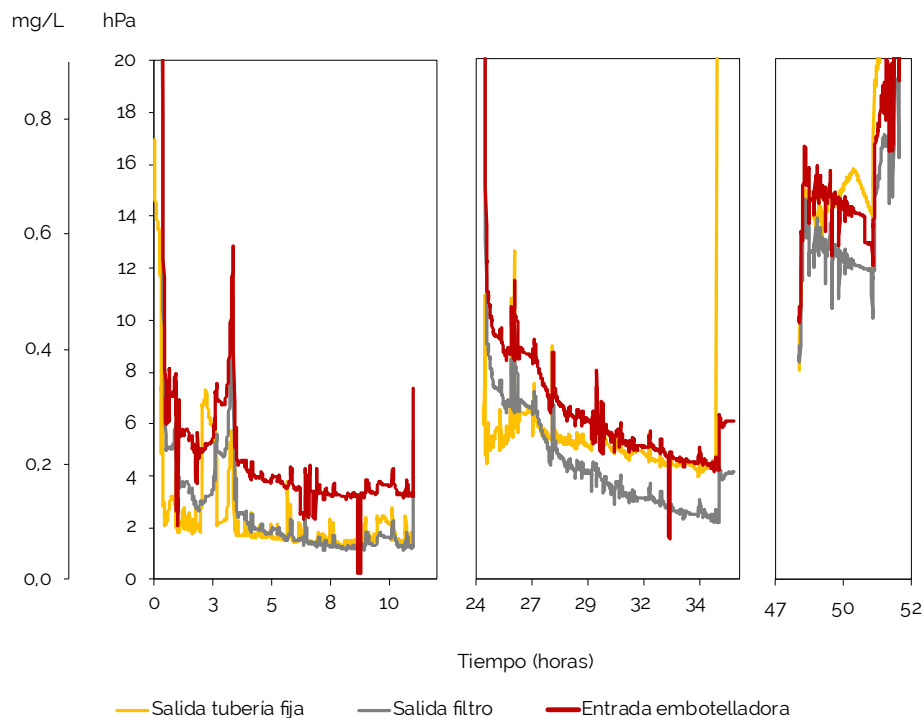


Fig. B.8.3: Medidas de oxígeno hasta la embotelladora

Las medidas realizadas en el vino embotellado de las botellas procedentes de 20 caños distintos y recogidas durante los 3 días de embotellado se representan en la *Figura B.8.4a*, mostrando que el vino embotellado tenía entre 0,4 y 1 mg/L de oxígeno disuelto. Por lo tanto, la incorporación de oxígeno en la embotelladora fue bastante baja, de 0,1 a 0,5 mg/L.

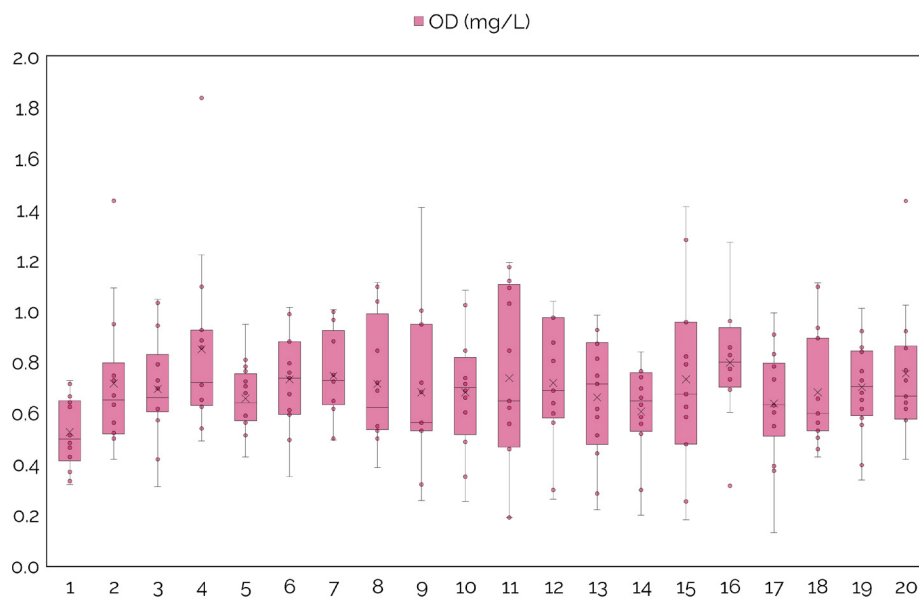


Fig. B.8.4a Medidas de las botellas de los diferentes caños durante todo el embotellado

Durante el embotellado se recogieron botellas en 9 momentos distintos para conocer la variación del oxígeno disuelto y el oxígeno en el espacio de cabeza, los resultados se muestran en la *Figura B.8.4b*. Teniendo en cuenta las botellas embotelladas cada día y las medidas promedio realizadas en cada momento, se ha encontrado que en el 13% de las botellas el vino presentaba entre 0,8 y 0,9 mg/L de oxígeno disuelto, el 33% presentó 0,7 mg/L y el resto de las botellas, un 54% se embotelló con entre 0,4 y 0,6 mg/L. Se encontró que el oxígeno en el espacio de cabeza (HSO) era más elevado que el OD, con niveles entre 1,1 y 1,3 mg/L en todos los momentos estudiados. El oxígeno total (TPO) recibido por los vinos en el embotellado varió entre 1,6 y 2,1 mg/L, con niveles entre 2 y 2,1 mg/L en el 43% de las botellas y de 1,6 a 1,9 en el 57% de las botellas. Como en el caso anterior es importante destacar que la incorporación de oxígeno en la embotelladora es significativo, y se refleja en que HSO tiene más peso en la TPO que OD, en concreto con un 64% del oxígeno total.

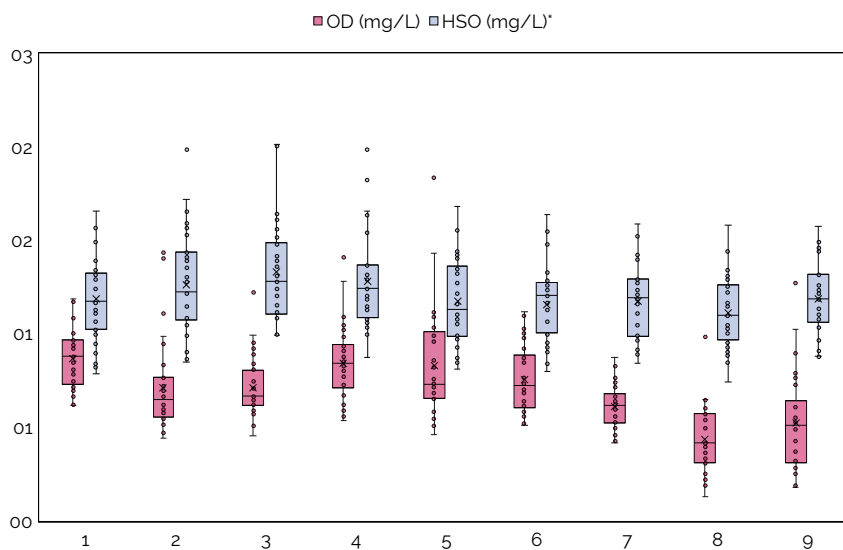


Fig. B.8.4b. Medidas de las botellas de todos los caños en 9 momentos diferentes

B.9.- Incorporación de oxígeno durante el trasiego y embotellado con inyección de N₂ de vino tinto Tempranillo

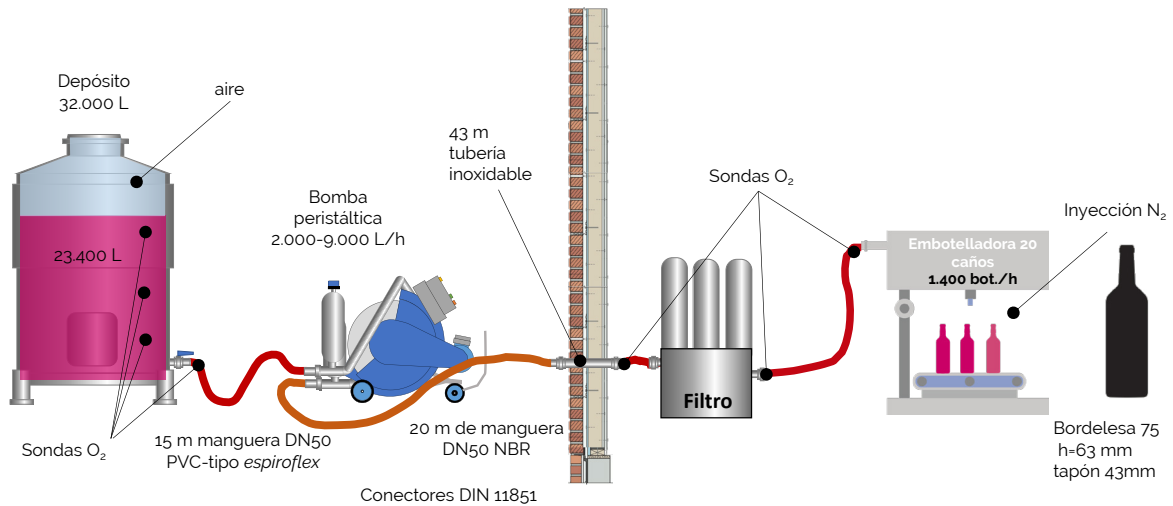


Fig. B.9.1. Esquema de la situación inicial del trasiego y embotellado de un vino variedad Tempranillo. T^a ambiente +19,7°C; Patm. +927 mbar; duración 2 días

Las medidas de la incorporación de oxígeno en el vino en su movimiento desde el depósito origen hasta la embotelladora fueron realizadas en distintos puntos del recorrido, en este caso el depósito está incompleto. La Figura B.9.2 muestra que el volumen de gas sobre el vino es aire, el oxígeno del aire se va incorporando al vino y se refleja desde el inicio hasta el final del embotellado.

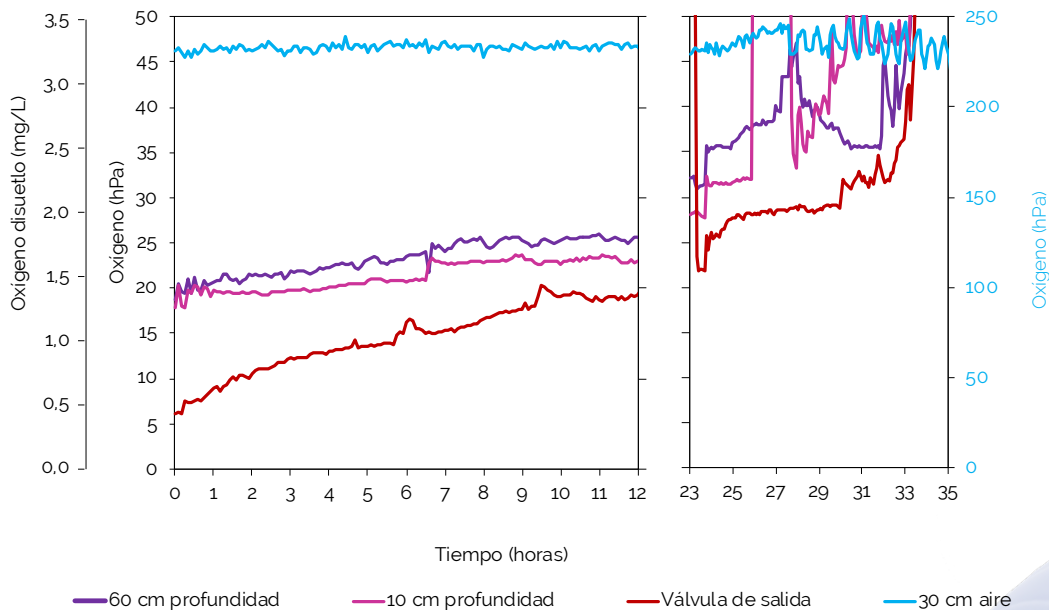


Fig. B.9.2. Medidas de oxígeno en el depósito trassegado

Las sondas que miden el nivel de oxígeno en el vino, a 10cm y 60cm, indicaron que durante la primera jornada de embotellado el vino se mantuvo en unos 1,5 mg/L, mientras que en la segunda se aumentó el contenido hasta los 3,5 mg/L.

Esta incorporación de oxígeno repercute en el nivel de oxígeno disuelto con el que sale el vino del depósito, así, al inicio del embotellado sale hacia la embotelladora con 0,4 mg/L, pero al finalizar la primera jornada aumenta hasta alcanzar 1,4 mg/L, y más de 3,5 mg/L al finalizar el embotellado.

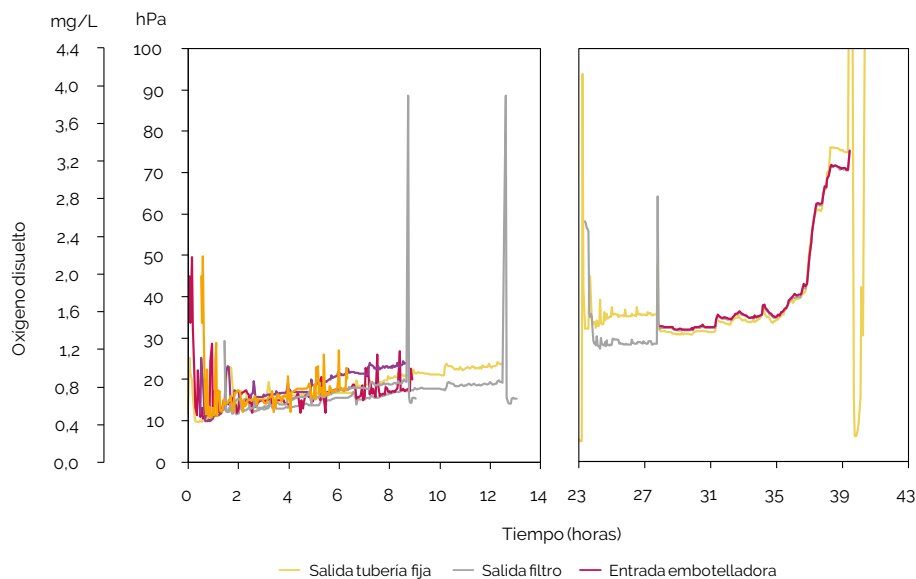


Fig. B.9.3: Medidas de oxígeno hasta la embotelladora

Las medidas realizadas en las botellas con sensores incorporadas durante el embotellado se representan en la *Figura B.9.4a*. El oxígeno disuelto del vino está determinado por el oxígeno que se ha ido añadiendo en todas las operaciones realizadas en bodega hasta justo la entrada del vino en la botella, que en este caso de forma promediada fue de 0,4 mg/L, sin mostrar diferencias significativas por el uso de un caño u otro.

Estos resultados indican que la inyección de N_2 en distintos momentos del proceso es muy efectiva y además de no permitir la incorporación de oxígeno, supone la retirada de parte del oxígeno del vino.

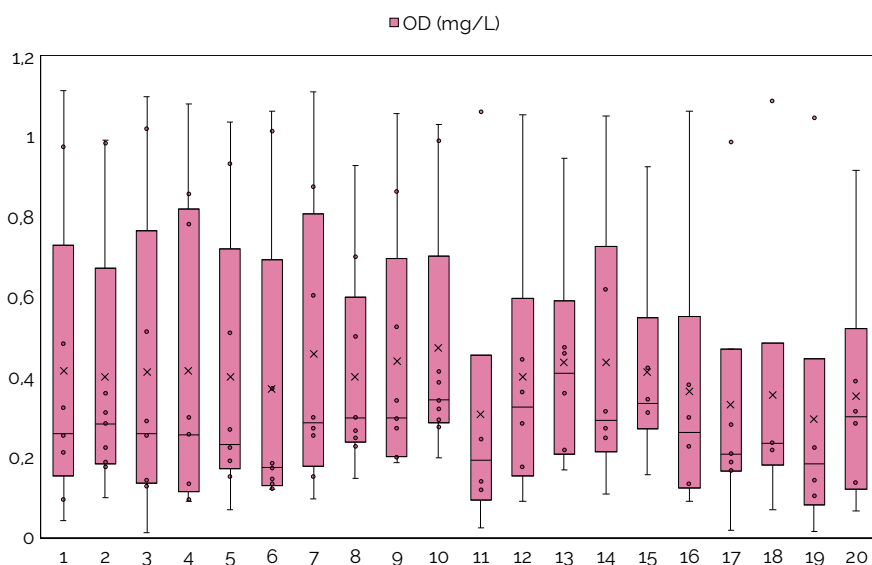


Fig. B.9.4a Medidas de las botellas de los diferentes caños durante todo el embotellado

La Figura B.9.4b recoge la evaluación del oxígeno total (TPO) recibido en el embotellado, como suma del OD y el HSO que se encuentra en la botella en 5 momentos distintos del embotellado. Se ha encontrado que el oxígeno disuelto promedio en el vino embotellado en la primera jornada está por debajo de 0,2 mg/L (el 47% de las botellas). Sin embargo, al final de la segunda jornada al final del embotellado se produce un incremento muy significativo en el oxígeno disuelto hasta niveles de 1 mg/L (ver Figura B.9.3) que afecta al 30% de las botellas y por ello en este día el vino se embotella de media con OD 0,8 mg/L. En el espacio de cabeza el nivel HSO varía de 0,8 mg/L el primer día a 0,7 mg/L el segundo, por lo que de forma promediada el vino se embotelló con 0,75 mg/L.

Globalmente el vino del 47% de las botellas se embotella el primer día con una tasa total de oxígeno de 0,98 mg/L, mientras que el 53% de las botellas se embotelló el segundo día con 1,5 mg/L.

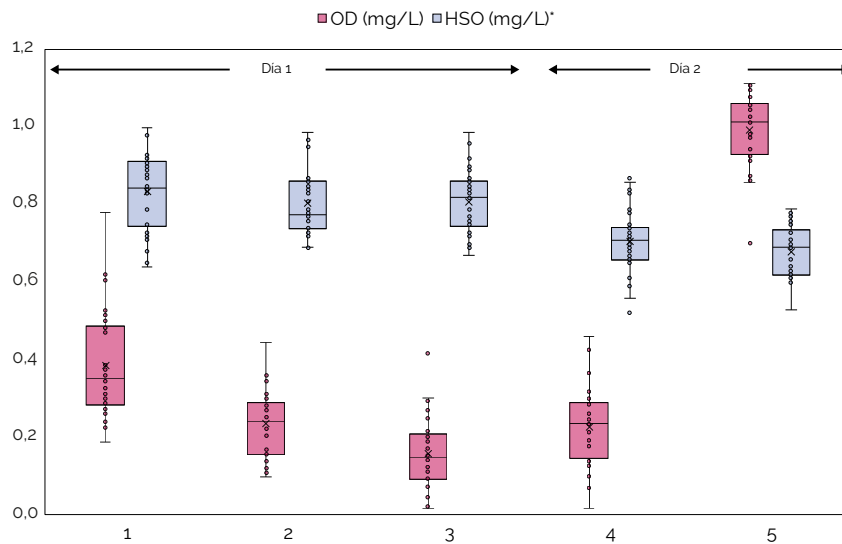


Fig. B.9.4b. Análisis de las medidas de las botellas de todos los caños en 5 momentos diferentes



Casos prácticos: C- OTROS ENSAYOS

C.1.- Caracterización del inertizado y del OTR de un depósito de acero inoxidable

La inertización de un depósito vacío de 10.000 L se realizó por desplazamiento del oxígeno del aire con dióxido de carbono hasta alcanzar valores de presión parcial de oxígeno por debajo de 5 hPa (2,5% aire saturación o 0,5 %O₂). El inertizado se llevó a cabo durante el mes de julio con una temperatura en el depósito de 24°C

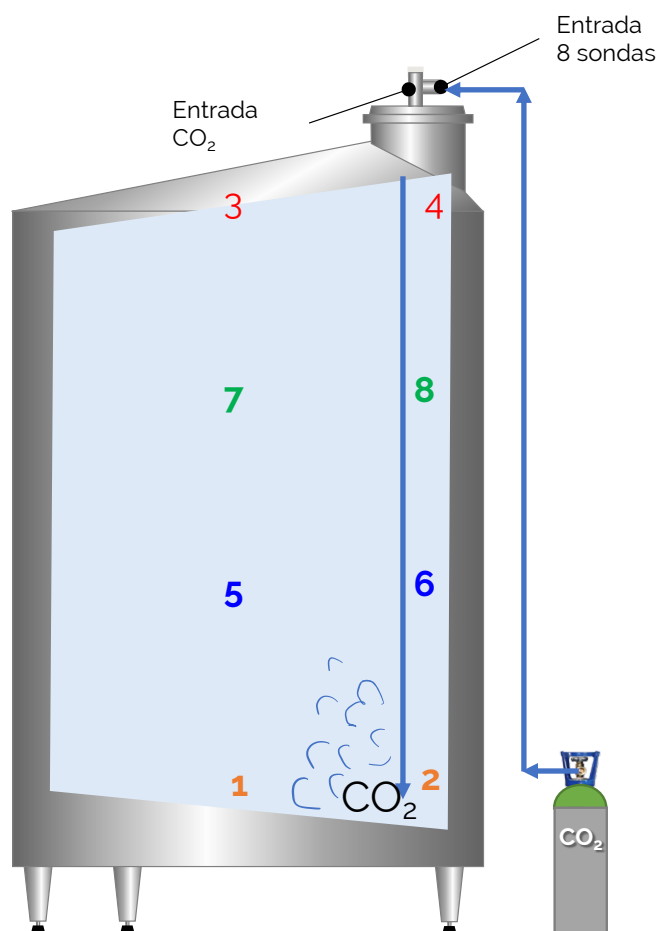


Fig. C.11. Esquema de disposición de las sondas fijas a diferentes alturas del depósito

Se colocaron 8 sondas de medida en 4 alturas diferentes, en el centro y junto a la pared del depósito para contemplar el papel que los diferentes accesorios pudiesen tener (boca de hombre, tomamuestras,...) según el esquema de la *Figura C.11*



Fig. C.12. a) Esquema de la entrada de las sondas y del gas inertizante junto con la salida del aire. b) Sistema de seguimiento de los 8 canales de medida de oxígeno junto al depósito.

La *Figura C.12* muestra la entrada de dióxido de carbono en el depósito y la progresiva desoxigenación por desplazamiento desde la parte inferior del tanque. Se puede observar una fuerte bajada del contenido en O_2 similar (cualitativa y no cuantificable) en todos los puntos de medida hasta que los niveles entran dentro del rango de medida de las sondas.

Desde ese momento (minuto 5) se observa la estratificación del CO_2 en la parte inferior que permite desplazar todo el O_2 hacia la salida superior del tanque.

Finalmente, tras algo más de media hora, se consiguen niveles de O_2 por debajo del 2,5% aire sat. que permiten considerar que el depósito está completamente inertizado, y se procedió a cerrar la inyección de CO_2 evitando la presurización del depósito comenzando la monitorización de la entrada de oxígeno.

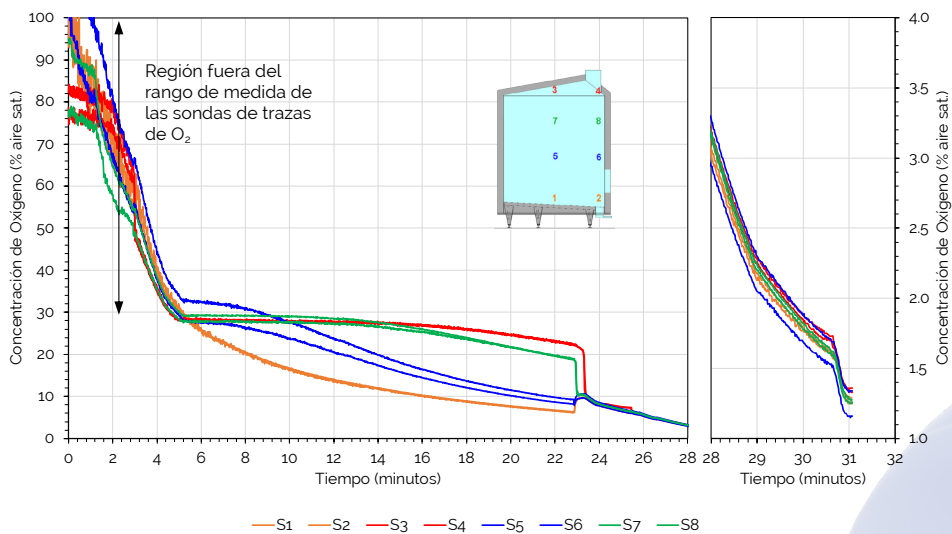


Fig. C.13. Evolución del desplazamiento de oxígeno con dióxido de carbono con los 8 canales de medida

La *Figura C.14* muestra la entrada de oxígeno en el depósito caracterizado mediante la monitorización de ocho puntos en el interior del depósito. Se pudo observar claramente que se produjo una vía preferencial de entrada de aire por la parte superior del depósito (S3) a través de la tapa superior. Esta entrada afectó a los puntos de medida 4, 7 y 8.

Además, también se observó una diferencia clara en la medida de oxígeno entre las sondas 5 y 6 colocadas a la misma altura. Mientras que la sonda 5 estaba colocada en el centro del depósito (la sonda 6 estaba colocada inmediatamente por encima de la boca de hombre). Tras un día de medida, la vía de entrada se estabilizó y la distribución del oxígeno atmosférico que había entrado por esa parte del depósito se redistribuyó por el resto del recipiente.

Tras 48h casi todas las sondas alcanzaron el equilibrio y se produjo una fase de estabilización. Tras este ensayo, si se extrapola este comportamiento a todo un año, y si se asumiese que todo el oxígeno que entra en el depósito se llega a disolver en el vino, se podría concluir que la tasa de entrada anual de oxígeno fue de 4,3 mg/L.

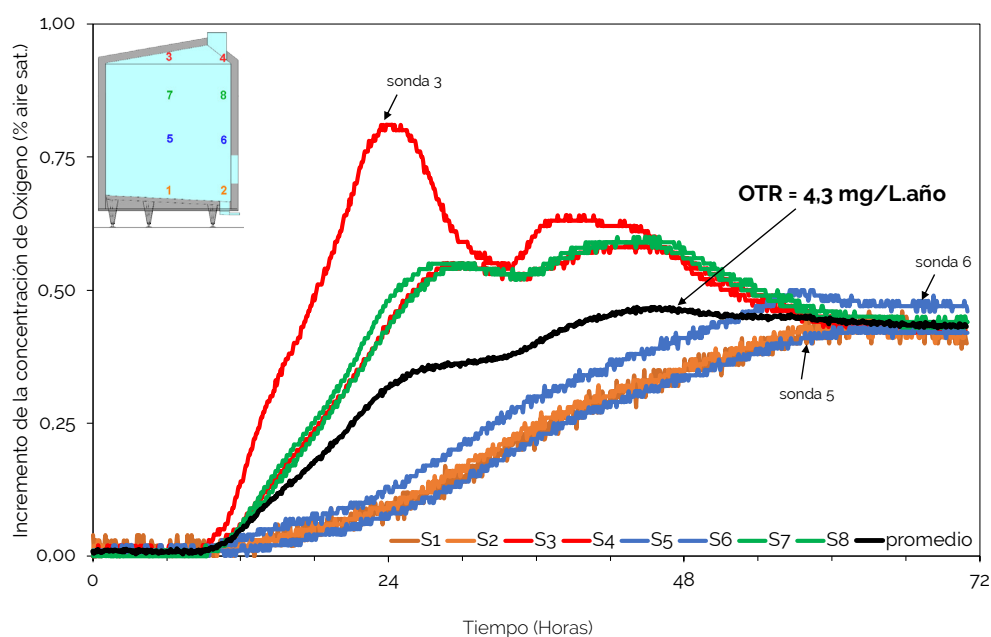


Fig. C.14. Evolución de la entrada de oxígeno en los ocho puntos monitorizados



Capítulo 12

Efecto en el vino del oxígeno recibido en el embotellado

Silvia Pérez Magariño¹, Ana María Martínez Gil² y Marta Bueno Herrera¹

¹ Instituto Tecnológico Agrario de Castilla y León

² Grupo UVaMOX- Universidad de Valladolid

12.1. Introducción**12.2. Análisis realizados en vinos embotellados****12.3. Efecto del oxígeno en los vinos**

12.3.1. Vinos blancos

12.3.2. Vinos tintos

12.4. Conclusiones**12.5. Referencias**

12.1.- Introducción

El oxígeno del aire está siempre presente durante el proceso de elaboración del vino y puede tener una influencia positiva o negativa. Esto va a depender principalmente de la cantidad y concentración de oxígeno disuelto, el momento del suministro de oxígeno, el tiempo de disolución y las características del vino (es decir, la presencia de compuestos en el vino que puedan reaccionar con el oxígeno y consumirlo y el contenido de dióxido de azufre libre).

Un exceso de oxígeno puede producir efectos negativos, principalmente sobre el color y la composición volátil de los vinos ¹⁻³. Uno de los momentos críticos de aporte de oxígeno es el que ocurre durante el embotellado y que puede afectar a la calidad final de los vinos de forma negativa, aunque dependerá de la cantidad de oxígeno, la temperatura y la composición del vino ⁴.

Normalmente, los vinos blancos y rosados son más sensibles a la oxidación que los tintos. Un exceso de oxígeno puede producir la formación de pigmentos pardo-amarillentos debido a la oxidación de los polifenoles, la formación de compuestos volátiles ligados al envejecimiento desarrollando notas oxidativas y una disminución de los aromas varietales ⁵⁻⁸.

Por todo ello, se ha estudiado el efecto del oxígeno aportado durante el embotellado en varios vinos blancos y tintos. Se han analizado distintos parámetros relacionados con la composición fenólica, el color y un gran número de compuestos volátiles con el fin de determinar el efecto del aporte de diferentes cantidades de oxígeno durante el embotellado sobre la calidad de los vinos.

12.2.- Análisis realizados en los vinos embotellados

El oxígeno que hay en la botella del vino recién embotellado (TPO), es la suma del oxígeno disuelto en el vino (OD) y del oxígeno que hay en el espacio de cabeza (HSO). La medida se ha realizado en cada botella gracias a la incorporación

de sensores para la medida del oxígeno en cada botella (ver [Capítulo 10](#)).

La intensidad del color se evaluó utilizando el método Glories ⁹. El contenido de polifenoles totales se

evaluó mediante el método de Folin-Ciocalteu (expresado en mg/L de ácido gálico) y el contenido de antocianos totales por cambio de pH (expresado en mg/L de malvidín-3-glucósido) ¹⁰.

Los compuestos volátiles mayoritarios se cuantificaron mediante inyección directa del vino, utilizando un cromatógrafo de gases con detector de ionización de llama ¹¹, centrándose el estudio en el contenido de acetaldehído y acetato de etilo. Los compuestos volátiles minoritarios se analizaron mediante microextracción en fase sólida del espacio de cabeza y cromatografía de gases con detector de masas ¹².

Los distintos compuestos volátiles cuantificados en los vinos estudiados se agruparon como ésteres etílicos lineales (butirato de etilo, hexanoato de etilo, octanoato de etilo y decanoato de etilo), ésteres etílicos ramificados (2-metilbutirato de etilo e isovalerato de etilo), terpenos (linalool, α -terpineol, geraniol y β -citronello), alcoholes C6 (1-hexanol, cis-3-hexenol y trans-3-hexenol), derivados de la vainillina (vainillina, vainillato de metilo, vainillato de etilo y acetovainillona), fenoles volátiles (guayacol, 4-metilguayacol, 4-vinilguayacol, 4-etilguayacol, 4-vinilfenol, 4-etilfenol y eugenol) y aldehídos de Strecker (2-metilbutanal, 3-metilbutanal, isobutiraldehído y fenilacetaldéhído).

12.3.- Efecto del oxígeno en los vinos

12.3.1.- Vinos blancos

En el caso de los vinos blancos, se estudiaron vinos de 2 añadas diferentes procedentes de distintas bodegas de Castilla y León.

- **Vinos blancos de la vendimia de 2020**

El estudio del embotellado de un vino blanco de la añada del 2020 permitió determinar la variabilidad en el oxígeno que reciben los vinos en este proceso. A los 18 meses del embotellado se analizó el vino que fue embotellado con diferente cantidad de oxígeno TPO, en concreto se escogieron 36 botellas. La *Tabla 12.1* muestra los datos de oxígeno total recibido (TPO), tanto el oxígeno disuelto (OD) como el disponible en el espacio de cabeza (HSO) de cada uno de los 36 vinos. Se muestran los vinos agrupados según el TPO recibido, en cada grupo la desviación del TPO es menor de 0,1.



Tabla 12.1. Datos del oxígeno recibido durante el embotellado en cada botella

Botella	TPO (mg/L)	OD (mg/L)	HSO (mg/L)	% OD	% HSO	grupo	TPO (mg/L)	OD (mg/L)	HSO (mg/L)	% OD	% HSO
1	2,74	1,8	0,98	64,2	35,8	Grupo 1	2,8 a	1,8 a	1,0 a	64,6 b	35,5 a
2	2,75	1,88	0,94	66,0	34,1						
3	2,82	1,79	1,03	63,6	36,6						
4	3,16	1,95	1,21	61,7	38,3	Grupo 2	3,2 b	2,0 a	1,3 b	60,8 ab	39,2 ab
5	3,19	1,89	1,30	59,1	40,8						
6	3,2	1,91	1,29	59,7	40,4						
7	3,21	1,82	1,39	56,7	43,4						
8	3,29	2,06	1,23	62,7	37,3						
9	3,38	2,19	1,18	64,9	35,0						
10	3,5	2,232	1,26	63,8	36,1	Grupo 3	3,6 c	2,2 b	1,4 bc	60,9 ab	39,1 ab
11	3,53	2,10	1,43	59,6	40,4						
12	3,62	2,14	1,48	59,0	41,0						
13	3,63	2,30	1,33	63,3	36,8						
14	3,68	2,16	1,52	58,7	41,3	Grupo 4	3,9 d	2,3 b	1,6 cd	58,7 a	41,3 b
15	3,82	2,17	1,65	56,7	43,3						
16	3,84	2,29	1,54	59,7	40,2						
17	3,89	2,33	1,57	59,8	40,3	Grupo 5	4,4 e	2,7 c	1,7 de	61,3 ab	38,7 ab
18	4,36	2,30	1,76	59,5	40,4						
19	4,4	2,83	1,58	64,2	35,9						
20	4,47	2,84	1,63	63,5	36,5						
21	4,49	2,80	1,69	62,4	37,7						
22	4,51	2,56	1,94	56,8	43,1	Grupo 6	4,7 f	2,9 cd	1,8 ef	61,4 ab	38,5 ab
23	4,69	2,92	1,77	62,3	37,7						
24	4,71	2,84	1,88	60,2	39,9						
25	4,73	2,87	1,86	60,7	39,2						
26	4,74	2,58	2,16	54,6	45,5						
27	4,76	3,19	1,58	66,9	33,1						
28	4,84	3,10	1,73	64,1	35,8						
29	4,91	3,13	1,78	63,8	36,2	Grupo 7	5,0 g	2,9 d	2,1 fg	58,5 a	41,4 ab
30	5,06	2,69	2,36	53,2	46,7						
31	5,24	2,90	2,34	55,4	44,6	Grupo 8	5,3 h	3,1 de	2,2 g	57,9 a	42,1b
32	5,33	3,13	2,20	58,7	41,3						
33	5,33	3,18	2,16	59,6	40,4						
34	5,42	3,24	2,18	59,7	40,3	Grupo 9	5,5 i	3,3 e	2,2 g	59,4 ab	40,3 ab
35	5,48	3,13	2,36	57,1	43,0						
36	5,62	3,44	2,18	61,3	38,8						

Diferentes letras en columnas indican diferencias estadísticamente significativas entre los 9 grupos ($p < 0,05$).

Las botellas se ordenaron de acuerdo con el TPO recibido, de menor a mayor, encontrándose una diferencia de 2.88 mg/L entre el menor TPO en la botella 1 y el mayor en la botella 36. Se observaron diferencias significativas entre los 9 grupos por su TPO, mientras que no ocurre lo mismo en OD y HSO, así el porcentaje de oxígeno disuelto en los vinos o disponible en el espacio de cabeza (%HSO y %OD) no es mayor o menor en función del TPO recibido.

En general, los vinos con mayor TPO, OD y HSO presentaron menor contenido de polifenoles totales y menor intensidad de color, presentando una correlación negativa, es decir, que cuanto más oxígeno tienen disponible los vinos blancos menor nivel de polifenoles y color mostraron (Tabla 12.2).

Se realizó un análisis multivariante de componentes principales para evaluar las relaciones de los compuestos analizados con el oxígeno recibido y visualizar en un plano la distribución de las muestras de vino con las variables analizadas en los vinos (Figura 12.1).

Tabla 12.2. Correlaciones entre el TPO, OD y HSO en el embotellado y la composición de los vinos blancos tras 18 meses en botella (* $p < 0.01$)

		TPO (mg/L)	OD (mg/L)	HSO (mg/L)
Polifenoles (mg/L)	correlación	-0,4645	-0,5187	-0,348
	p-valor	0,0043*	0,0012*	0,0376*
Intensidad de Color	correlación	-0,2658	-0,4584	0,0009
	p-valor	0,1172	0,0049*	0,9957
Alcoholes C6 (µg/L)	correlación	-0,4232	-0,5404	-0,2319
	p-valor	0,0101*	0,0007*	0,1735
Terpenos (µg/L)	correlación	-0,2223	-0,3948	0,0154
	p-valor	0,1924	0,0172*	0,9291
Derivados de la vainillina (µg/L)	correlación	-0,3687	-0,5042	-0,1607
	p-valor	0,0269*	0,0017*	0,3492
Fenoles volátiles (µg/L)	correlación	-0,4324	-0,5801	-0,204
	p-valor	0,0084*	0,0002	0,2327
Fenilacetaldehído (µg/L)	correlación	0,4836	0,5984*	0,2908
		0,0028*	0,0001*	0,0853

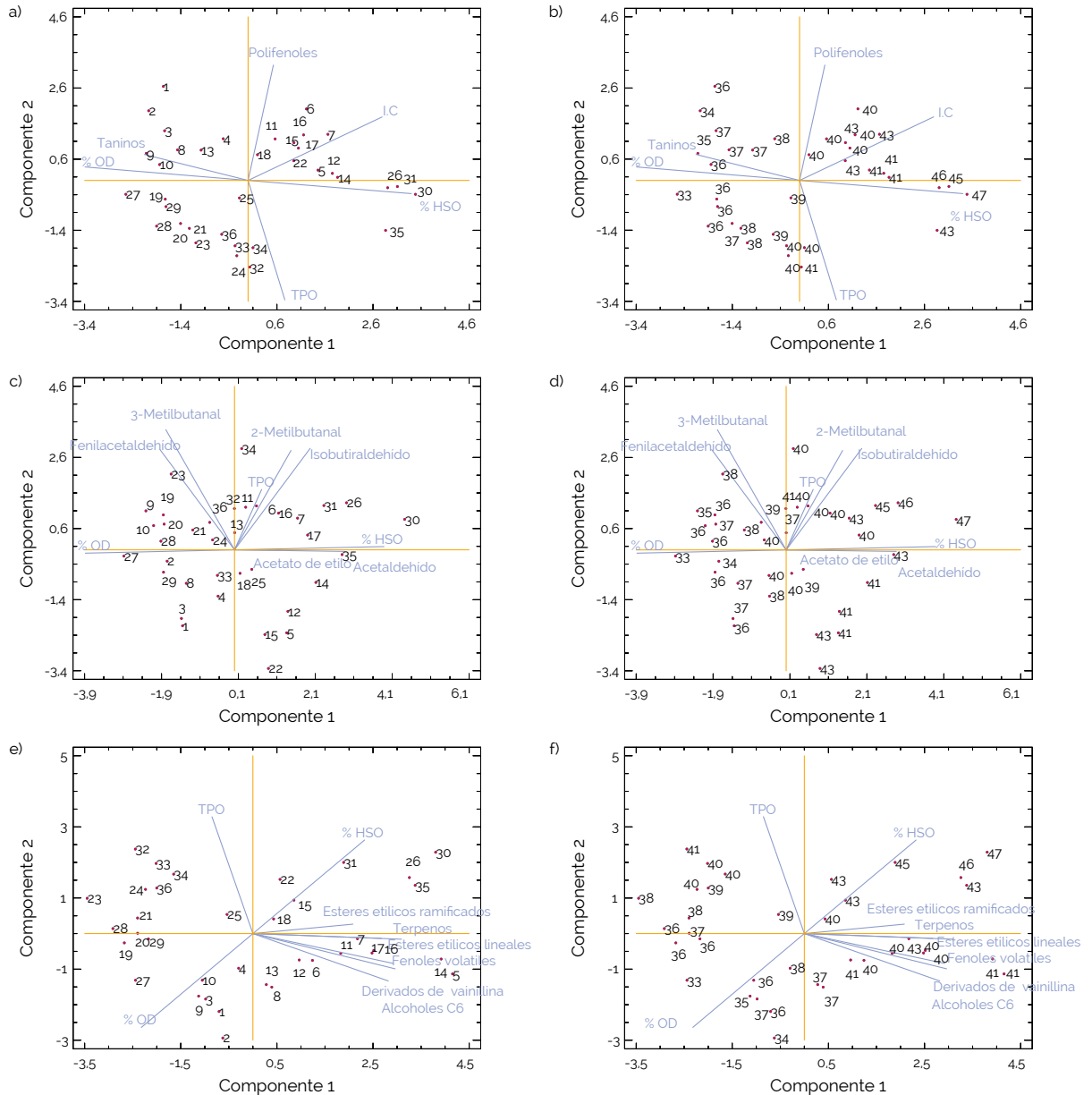


Fig. 12.1. Análisis de componentes principales de la composición química del vino y TPO, % HSO y %OD recibido en los 36 vinos blancos. Representando las muestras según el número de botella 1 al 36 (a, c y d), numeración que está relacionada con el TPO, y las muestras según porcentaje de oxígeno en el espacio de cabeza (%HSO) (b, d, f). Polifenoles, taninos, color a) y b); Aldehídos de Strecker, acetaldehído y acetato de etilo c) y d); Otros compuestos aromáticos e) y f)

La Figura 12.1a presenta la distribución mostrando a las dos componentes principales que explican el 75% de la varianza de los datos, cada vino está identificado de acuerdo con la Tabla 12.1. La Figura 12.1b muestra la misma distribución de los vinos, pero en este caso cada muestra se ha identificado por el %HSO. La función 1, que es la que mayor peso tiene 47%, permite ver la diferenciación de los vinos de acuerdo con su % HSO y OD situándose a la derecha los vinos en los que el peso del HSO en el oxígeno total es superior al 40%, que está relacionado positivamente con la intensidad de color y negativamente con los taninos. La función 2 con un peso de 28% permite ver la diferenciación de los vinos según el oxígeno total con el que fueron embotellados.

En la *Figura 12.1c* se muestra la posición de las muestras y los compuestos volátiles relacionados con la oxidación. Los vinos se distribuyen en el eje X (función 1 que explica el 33% de la varianza) de acuerdo con el oxígeno que fueron embotellados, así los vinos que tienen más del 40% HSO se posicionan en el eje positivo (*Figura 12.1d*), definido con el acetaldehído, 2-metilbutanal, isobutiraldehído y el acetato de etilo, mientras que en el eje negativo se encuentran los vinos definidos por el %OD (oxígeno disuelto) más próximo al 3-metilbutanal y fenilacetaldehído. La función 2 con un peso de 21% está relacionada con el TPO, observándose que los vinos embotellados con mayores TPO, tras 18 meses de permanencia en botella presentan un mayor contenido de aldehídos Strecker, posiblemente debido a la formación de estos compuestos por la oxidación de los alcoholes superiores, a partir de precursores de aminoácidos y/o por su liberación de formas ligadas una vez consumido el SO₂^{13,14}, siendo por tanto vinos que pueden presentar notas aromáticas relacionadas con aromas a miel, aromas a malta y/o fruta madura⁶.

Respecto a los compuestos relacionados con los aromas frutales y florales, la *Tabla 12.2* muestra la correlación negativa de %OD, TPO con el contenido de alcoholes C6, terpenos, derivados de vainilla y fenoles volátiles, que indica que a mayor OD y TPO se encontró un menor contenido de estos compuestos aromáticos en los vinos a los 18 meses de guarda. La función 1 (55%) del análisis de componentes principales muestra la importancia del oxígeno disuelto en el vino o en el espacio de cabeza sobre los aromas frutales y florales del vino (*Figura 12.1e*). Los vinos embotellados con mayor oxígeno disuelto presentaron menores contenidos de aromas. La *Figura 12.1f* muestra que en general los vinos embotellados con %HSO superior a 40 se sitúan a la derecha, mientras que los que presentan un % menor a la izquierda. Sin embargo, la variable de mayor peso de la función 2 (21%) fue el TPO, separando los vinos que recibieron mayor y menor cantidad de oxígeno, siendo estos últimos los que presentaron mayor contenido de todos los compuestos analizados, excepto los ésteres etílicos ramificados. Por lo tanto, los vinos embotellados con menor TPO y menor OD son vinos que tras permanencia en botella resultan más afrutados y florales.

• Vinos blancos de la vendimia de 2022

En este caso también se realizó el seguimiento del embotellado seleccionando las seis botellas con mayores diferencias de TPO y a los 6 meses se analizó el vino embotellado con alto TPO y bajo TPO.

Las botellas se numeraron en orden creciente a su contenido en TPO (*Tabla 12.3*). Los vinos seleccionados como nivel alto de oxígeno recibieron un promedio de 6,1 mg/L frente a los 4,9 mg/L del nivel bajo, existiendo una diferencia de 1,2 mg/L de TPO entre los dos niveles. Durante el movimiento del vino desde el depósito origen hasta la embotelladora se produce una incorporación, entre 1,7 mg/L y 2,1 mg/L de oxígeno disuelto. Además, en el proceso de llenado y taponado también se observó una importante incorporación de oxígeno, así el nivel de oxígeno en HSO asciende a valores entre 2,8 mg/L y 4,5 mg/L, lo que supone el 63% y el 72% de todo el oxígeno disponible para el vino embotellado.

Tabla 12.3. Datos del oxígeno recibido durante el embotellado de cada botella

Botella	TPO (mg/L)	OD (mg/L)	HSO (mg/L)	%OD	%HSO	grupo	TPO (mg/L)	HSO (mg/L)	OD (mg/L)	%OD	%HSO
1	4,53	1,69	2,84	62,7	37,3	BAJO TPO	4,9 a	1,8 a	3,1 a	63,8 a	36,2 a
2	4,99	1,77	3,21	64,3	35,5						
3	5,13	1,83	3,31	64,5	35,7						
4	5,77	2,08	3,69	64,0	36,0	ALTO TPO	6,1 b	1,9 a	4,2 b	69,1 a	30,9 a
5	6,15	1,79	4,36	70,9	29,1						
6	6,23	1,72	4,51	72,4	27,6						

Diferentes letras en columnas indican diferencias estadísticamente significativas entre los dos grupos (p < 0,05)

La Figura 12.2 presenta el contenido en el vino de distintos compuestos en los vinos a los 6 meses en botella a) los compuestos que existen correlaciones significativamente con el contenido en oxígeno en espacio de cabeza (HSO) b); aldehídos de Strecker c); otros compuestos aromáticos relacionados con la oxidación d); otros compuestos aromáticos. Se puede observar que el contenido en ésteres etílicos lineales y en taninos de los vinos a los 6 meses del embotellado que habían recibido un alto TPO era menor que en los vinos que habían recibido menor oxígeno.

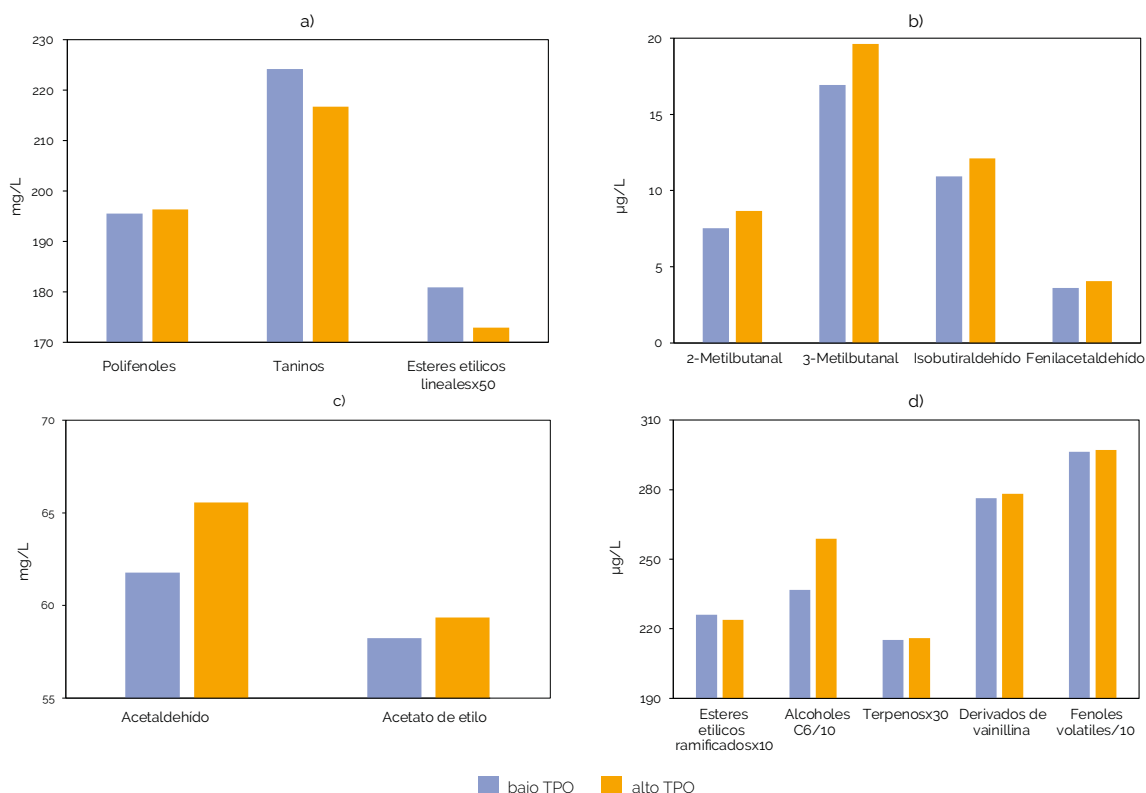


Fig. 12.2. Composición de los vinos blancos, embotellados con distinto TPO, tras 6 meses en botella (no hay diferencias estadísticamente significativas)

Se ha encontrado que existe una correlación positiva entre el contenido de oxígeno en el espacio de cabeza y los polifenoles del vino, mientras que es negativa con los ésteres etílicos lineales y los taninos (Tabla 12.4).

Tabla 12.4. Correlaciones entre el TPO, OD y HSO en el embotellado y la composición de los vinos blancos tras 6 meses en botella ($p < 0,01$)

	Polifenoles (mg/L)		Taninos (mg/L)		Esteres etílicos lineales (µg/L)	
	correlación	p-valor	correlación	p-valor	correlación	p-valor
TPO (mg/L)	0,3238	0,5313	-0,4488	0,372	-0,6636	0,1507
OD (mg/L)	0,1628	0,7579	-0,2811	0,5895	-0,4864	0,328
HSO (mg/L)	0,8211	0,0451*	-0,8638	0,0266*	-0,8916	0,017*

El análisis de componentes principales con los polifenoles y color se presenta en la *Figura 12.3.a*, indicando que la función 1 (48%) diferencia a los vinos embotellados con mayor TPO de los vinos con menor TPO, siendo también variables diferenciadoras el % HSO y %OD. Así los vinos embotellados con menor oxígeno en el espacio de cabeza tras 6 meses de botella mostraron mayor contenido de taninos, situándose estos vinos en la zona de los vinos de bajo TPO. Los vinos embotellados con alto TPO también presentan mayor %OD como los vinos 5 y 6.

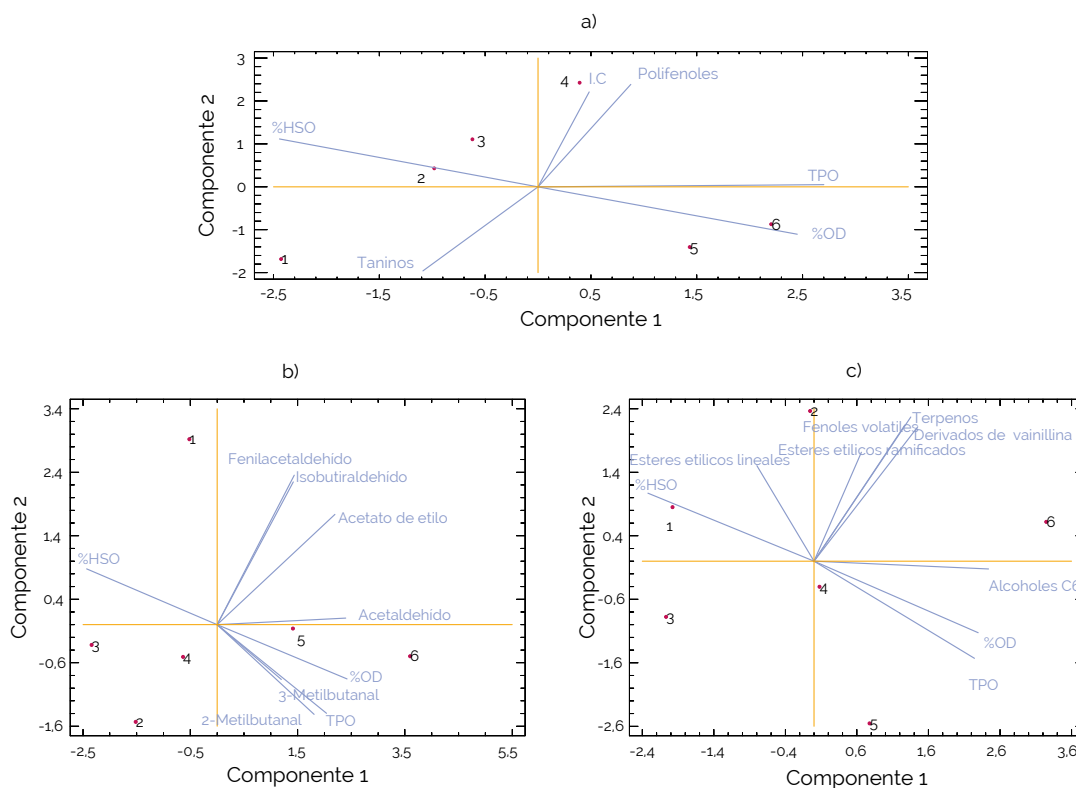


Fig. 12.3. Análisis de componentes principales con las variables TPO, % HSO y %OD y a) Polifenoles, color; b) Aldehídos de Strecker, acetaldehído y acetato de etilo; c) Otros compuestos aromáticos

En la *Figura 12.3 b* se observa que los compuestos volátiles relacionados con la oxidación se encuentran en mayor contenido en los vinos embotellados tras 6 meses con mayor %OD siendo el acetaldehído y el 3-metilbutanal los compuestos más representativos. El análisis de componentes principales realizado con estos compuestos muestra que los vinos con mayor %OD y todos los compuestos volátiles de oxidación se sitúan en el eje positivo de la función 1 (52%), siendo excepcional el posicionamiento del vino 1, muy próximo al vino 4 de acuerdo con esta primera función. La función 2 (26%) separa el vino 1 del resto por su mayor contenido de isobutiraldehído y fenilacetaldhído. Los vinos que recibieron más oxígeno en el embotellado (TPO), teniendo mayor importancia el %OD, se separan del resto por contener más compuestos de oxidación a los 6 meses del embotellado, es decir que han sufrido una mayor evolución de sus notas aromáticas hacia la oxidación.

La evolución en botella de los compuestos de los vinos blancos relacionados con los aromas frutales y florales también se encuentran afectados por el oxígeno que recibió el vino en el embotellado. Se ha encontrado que los ésteres etílicos lineales y los alcoholes C6 son los compuestos que más difieren entre los vinos embotellados con distinto oxígeno (*Figura 12.3c*). La función 1 del análisis de componentes principales, con un peso de 43%, permitió separar los vinos con más TPO, que también mostraron mayor %OD y alcoholes C6 que el resto de los vinos. Por otro lado, los vinos definidos por el %HSO y los ésteres etílicos lineales se situaron en la

zona negativa de la función 1. Estos vinos recibieron menor oxígeno total (TPO) pero tuvo mayor importancia el oxígeno en el espacio de cabeza, oxígeno que con el tiempo se va incorporando al vino. Por lo tanto, en el caso de los vinos blancos analizados se ha encontrado que si el oxígeno recibido proviene del proceso de movimiento del vino desde el depósito origen hasta la embotelladora (%OD), los vinos sufren mayor evolución de sus notas aromáticas hacia la oxidación durante la permanencia en botella, mientras que, si el oxígeno se va incorporando desde el espacio de cabeza, se favorece que el vino se mantenga más afrutado y floral.

12.3.2.- Vinos tintos

En el caso de los vinos tintos, se estudió el embotellado de un vino de la añada de 2022, y como en casos anteriores se seleccionaron botellas con vino que recibió cantidades muy diferentes de oxígeno. Estos vinos se analizaron tras 3 meses de guarda en botella.

Los vinos seleccionados como nivel alto de oxígeno recibieron un promedio de 6,0 mg/L y 3,4 mg/L los de nivel bajo, existiendo una diferencia de 2,6 mg/L de TPO entre los dos niveles (Tabla 12.5). Los mayores niveles de TPO vinieron definidos por mayor contenido de oxígeno disuelto (OD), siendo casi el 70% del oxígeno recibido, mientras que en las botellas de bajo TPO el %OD representa el 56%.

Tabla 12.5. Datos del oxígeno recibido durante el embotellado de cada botella de vino tinto

Botella	TPO (mg/L)	OD (mg/L)	HSO (mg/L)	%OD	%HSO	Grupo	TPO (mg/L)	OD (mg/L)	HSO (mg/L)	%OD	%HSO
1	3,36	1,94	1,42	57,7	42,3	BAJO TPO	3,4 a	1,9 a	1,5 a	55,7 a	44,3 a
2	3,43	1,74	1,69	50,7	49,3						
3	3,54	2,08	1,46	58,6	41,2						
4	5,88	3,96	1,92	67,3	32,7	ALTO TPO	6,0 b	4,1 a	1,9 b	69,0 a	31,0 a
5	6,02	4,27	1,75	70,9	29,1						
6	6,12	4,21	1,91	68,8	31,2						

El contenido de polifenoles y taninos fue ligeramente mayor en los vinos que recibieron más TPO. Además, estos vinos presentaron menor concentración de antocianos (Figura 12.4.a), probablemente debido a las reacciones de estos compuestos con el oxígeno lo que conlleva una estabilización del color con el tiempo (Figura 12.4.c). La Figura 12.4.b muestra el contenido de compuestos volátiles relacionados con la oxidación en los vinos tintos. Los vinos que recibieron mayor oxígeno presentaron mayores concentraciones de estos compuestos, principalmente de 3-metilbutanal, compuesto que presentó una correlación positiva con el TPO y el OD (p-valor de 0,01, correlación de 0,9). Además, los vinos que recibieron mayor cantidad de oxígeno presentaron menores notas afrutadas y a vainilla, por sus menores contenidos en butirato de etilo, hexanoato de etilo, octanoato de etilo y decanoato de etilo (ésteres etílicos lineales), 2-metilbutirato de etilo

e isovalerato de etilo (ésteres etílicos ramificados), vainillina, vainillato de metilo, vainillato de etilo y acetovainillona (derivados de la vainillina). Por otro lado, estos vinos también presentaron mayores notas verdes por su mayor contenido de 1-hexanol, cis-3-hexenol y trans-3-hexenol (alcoholes C6) y mayores notas fenólicas por su mayor contenido en guayacol, 4-metilguayacol, 4-vinilguayacol, 4-etilguayacol, 4-vinilfenol, 4-etilfenol y eugenol (Figura 12.4.d).

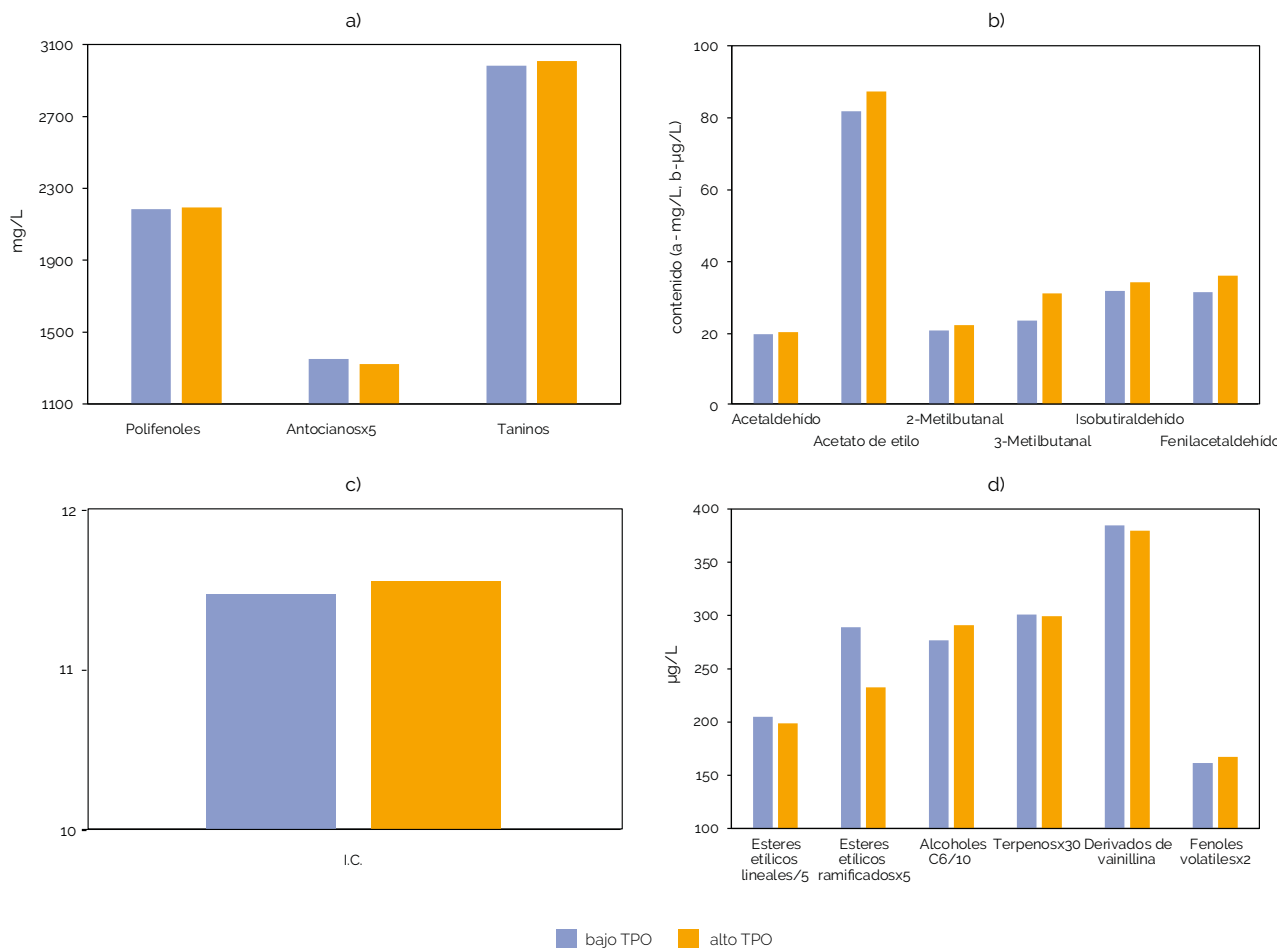


Fig. 12.4. Composición de los vinos tintos embotellados con distinto TPO tras 3 meses en botella

La Figura 12.5a muestra el análisis de componentes principales del oxígeno recibido en el embotellado con los fenoles y color. Se observa que la función 1 con un peso del 51% separa los vinos que presentan mayor TPO (vinos 4,5,6), definido por mayor porcentaje de oxígeno disuelto (%OD) y también polifenoles y taninos, mientras que los vinos que presentan menor TPO (vinos 1,2,3) están definidos por un mayor %HSO y antocianos. La función 2 que explica un 31% de la varianza está definida positivamente con los antocianos y negativamente con la intensidad de color. Se observa que el vino 4 embotellado con alto nivel de oxígeno disuelto (4 mg/L) y alto oxígeno en el espacio de cabeza (2 mg/L), muestra mayor intensidad colorante tras 3 meses en botella. Este resultado puede ser debido a la condensación y polimerización de los antocianos, proceso favorecido por el oxígeno da lugar a la formación de nuevos compuestos coloreados que suponen la estabilización del color con el tiempo.

La Figura 12.5b muestra el análisis de componentes principales del oxígeno con aldehídos de Strecker, acetaldehído y acetato de etilo. Se observa que la función 1 con un peso de 57% separa los vinos que presentan mayor TPO (vinos 4,5,6) de los vinos que presentan menor TPO (vinos 1,2,3). Como se ha descrito para los vinos blancos, los vinos embotellados con mayor TPO son aquellos que a los tres meses mostraron mayor contenido de aldehídos de Strecker, siendo el 3-metilbutanal el que mayor peso presentó. Además, estos vinos se embotellaron con mayor %OD.

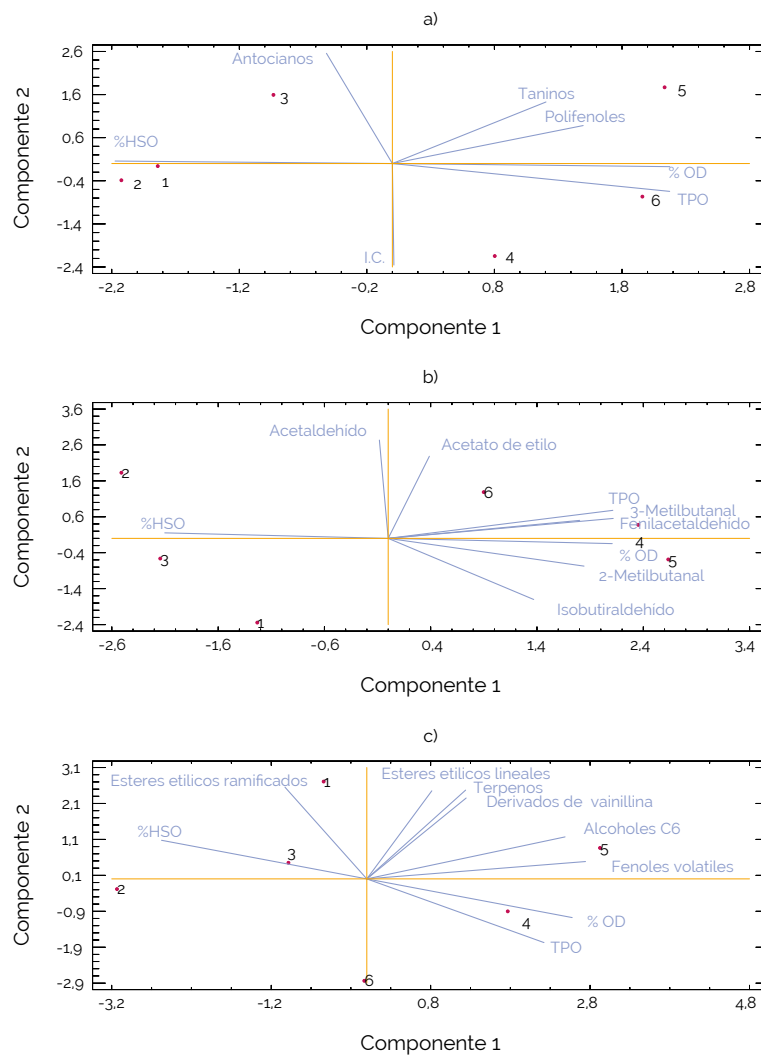


Fig. 12.5. Análisis de componentes principales con las variables TPO, % H₂SO y %OD y a) Polifenoles, color; b) Aldehídos de Strecker, acetaldehído y acetato de etilo; c) Otros compuestos aromáticos

Por último, se analizó el efecto del oxígeno recibido en el embotellado sobre los otros compuestos volátiles (Figura 12.5c). Se observa que los vinos embotellados con mayor nivel de oxígeno tras 3 meses en botella presentan más notas verdes y herbáceas debido a su mayor contenido en compuestos C6 (Figura 12.4d) como se observó en los vinos blancos de la vendimia 2022. Además se observa una tendencia a presentar mayor concentración de fenoles volátiles en estos vinos. La función 1 (51%) permite la separación de los vinos de bajo y alto TPO, siendo los alcoholes C6 y los fenoles volátiles los compuestos que definen a los vinos que recibieron más oxígeno en el embotellado. Por otro lado, los vinos embotellados con menor TPO y mayor %H₂SO están definidos por los ésteres etílicos ramificados.

12.4.- Conclusiones

En el caso de los vinos blancos analizados se ha encontrado que si el oxígeno recibido proviene del proceso de movimiento del vino desde el depósito origen hasta la embotelladora (%OD) los vinos sufren mayor evolución hacia compuestos de oxidación durante la permanencia en botella, mientras que, si el oxígeno se va incorporando desde el espacio de cabeza, se favorece que el vino se mantenga más afrutado y floral.

Además, se ha observado que la formación de acetaldehído, tanto en vinos blancos como tintos, está

más relacionada con la distribución del oxígeno que con el oxígeno total recibido.

Los vinos tintos expuestos a mayores cantidades de oxígeno son vinos que mantienen mejor su color con el tiempo debido a las reacciones que ocurren entre los compuestos fenólicos y el oxígeno.

Los vinos que recibieron mayor oxígeno durante el proceso de embotellado presentan mayores notas aromáticas de oxidación con el tiempo.

12.5.- Referencias

1. Escudero, A.; Asensio, E.; Cacho, J.; Ferreira, V. Sensory and chemical changes of young white wines stored under oxygen. An assessment of the role played by aldehydes and some other important odorants. *Food Chem.* 2002, 77(3), 325–331.
2. Laurie, V.F.; Salazar, S.; Campos, M.I.; Cáceres-Mella, A.; Peña-Neira, A. Periodic aeration of red wine compared to micro-oxygenation at production scale. *Am. J. Enol. Vitic.* 2014, 65(2), 254–260.
3. Ugliano, M. Oxygen contribution to wine aroma evolution during bottle aging. *J. Agric. Food Chem.* 2013, 61, 6125–6136.
4. Singleton, V.L. Oxygen with phenols and related reactions in musts, wines, and model systems: Observations and practical implications. *Am. J. Enol. Vitic.* 1987, 38(1), 69–77.
5. Carrascón, V.; Fernández-Zurbano, P.; Bueno, M.; Ferreira, V. Oxygen consumption by red wines. Part II: Differential effects on color and chemical composition caused by oxygen taken in different sulfur dioxide-related oxidation contexts. *J. Agric. Food Chem.* 2015, 63(5), 10938–10947.
6. Culleré, L.; Cacho, J.; Ferreira, V. An assessment of the role played by some oxidation-related aldehydes in wine aroma. *J. Agric. Food Chem.* 2007, 55, 876–881.
7. Kanavouras, A.; Coutelieris, F.; Karanika, E.; Kotseridis, Y.; Kallithraka, S. Color change of bottled white wines as a quality indicator. *OENO One* 2020, 54, 543–551.
8. Mislata, A. M.; Puxeu, M.; Tomás, E.; Nart, E.; Ferrer-Gallego, R. Influence of the oxidation in the aromatic composition and sensory profile of Rioja red aged wines. *Eur. Food Res. Technol.* 2020, 246, 1167–1181.
9. Glories, Y. La couleur des vins rouges. 2e partie. Mesure, origine et interprétation. *Connaiss. Vigne Vin* 1984, 18, 253–271.
10. Paronetto, L. *Polifenoli e tecnica enologica*. Selepress, Milan, Italy, 1977.
11. Pérez-Magariño, S.; Bueno-Herrera, M.; López de la Cuesta, P.; González-Lázaro, M.; Martínez-Lapuente, L.; Guadalupe, Z.; Ayestarán, B. Volatile composition, foam characteristics and sensory properties of Tempranillo red sparkling wines elaborated using different techniques to obtain the base wines. *Eur. Food Res. Technol.* 2019, 245, 1047–1059.
12. Pérez-Magariño, S.; Martínez-Gil, A.; Bueno-Herrera, M.; Nevares, I.; Del Álamo-Sanza, M. Kinetics of oxygen consumption, a key factor in the changes of young wines composition. *LWT - Food Sci. Technol.* 2023, 182, N°114786.
13. Bueno, M.; Carrascón, V.; Ferreira, V. Release and formation of oxidation related aldehydes during wine oxidation. *J. Agric. Food Chem.* 2016, 64, 608–617.
14. Bueno, M.; Marrufo-Curtido, A.; Carrascón, V.; Fernández-Zurbano, P.; Escudero, A.; Ferreira, V. Formation and accumulation of acetaldehyde and Strecker aldehydes during red wine oxidation. *Front. Chem.* 2018, 6,



Capítulo 13

Recomendaciones y protocolos de manejo de gases en bodega

Ignacio Nevares Domínguez, María del Álamo Sanza
y Luis Miguel Cárcel Cárcel
Grupo UVaMOX- Universidad de Valladolid

13.1. Introducción

13.2. Materiales y sistemas

13.3. La medida del volumen de gas dosificado

13.4. La inertización de mangueras

13.5. La inertización de depósitos vacíos: flushing

13.6. La cobertura de depósitos llenos: blanketing

13.7. La cobertura en el almacenamiento de vinos

13.8. La retirada de oxígeno disuelto en vinos mediante el borboteo de gases de inertizado

13.9. La embotelladora

13.10. La gestión del embotellado para minimizar la incorporación de oxígeno

13.1.- Introducción

El objetivo de este capítulo es ofrecer información práctica para poder aplicar las recomendaciones extraídas de los capítulos anteriores de este manual. El uso de gases de inertizado (que no inertes, ya que como se ha visto en el [Capítulo 1](#), el término inerte se refiere a que es no reactivo bajo determinadas condiciones de presión y temperatura) es el consejo fundamental para tener un control del oxígeno incorporado durante el proceso de trasiego y conservación de vinos, ambos aspectos siempre presentes durante la operación del embotellado.

13.2.- Materiales y sistemas

En cuanto a materiales se refiere, en el [Capítulo 5](#) se demuestra que el material de las mangueras que mejores prestaciones ofrece es el caucho butílico (IIR) junto con el NBR (caucho nitrilo butadieno), así mangueras como *Vinoflex easy* y *Millenium easy* (IVG Colbachini, Padua, Italia), ensayadas profusamente en este trabajo, son idóneas para las operaciones descritas.

Las posibles paradas durante el trasiego y embotellado supondrán una mínima incorporación de oxígeno atmosférico con el uso de estos materiales. En cuanto a la racorería se recomienda el estándar tri-clamp frente al DIN 11851, y en cualquier caso respecto al material escogido para las uniones, verdadero punto crítico en las conducciones, el NBR es el más recomendable. La renovación de las juntas al inicio de cada vendimia es una de las acciones más recomendables. Hay que prestar especial atención, ya que las juntas habituales son de EPDM, con prestaciones muy inferiores frente a la incorporación de oxígeno, y no hay que fijarse en el color de la junta ya que cada fabricante usa un código de colores diferente.

13.3.- La medida del volumen de gas dosificado

El objetivo de este apartado es ofrecer información práctica para poder realizar la medida del volumen de gas utilizado para desplazar el oxígeno de forma sencilla y asequible para cualquier bodega.

Como ha quedado patente a lo largo de este manual, el manejo adecuado de los gases utilizados en las diferentes operaciones de bodega se basa en el control de la cantidad de gas que queremos utilizar. En el **Capítulo 1** se recogen todas las explicaciones teóricas necesarias para entender adecuadamente los cálculos necesarios.

Desde el punto de vista práctico, la recomendación es medir en cada momento la cantidad de gas que se está utilizando en cada operación. Por un lado, este valor nos permitirá obtener los resultados que se buscan y por otro ajustar al máximo el gasto en gases de inertizado. La medida del caudal es la acción fundamental para conocer la cantidad de gas utilizado tras un tiempo de dosificación. La medida de la presión viene normalmente incluida en el ajuste de la presión de salida, en el caso de utilizar botellas, o en los ajustes del generador de gases, en el caso de producir el gas en la bodega.

Para medir el volumen de gas existen diferentes sistemas. El más habitual es el rotámetro o medidor de volumétrico de área variable (*Figura 13.1*), que en algunas ocasiones está incluido con el regulador de

presión, necesario cuando se usan botellas de gas.

La medida del volumen de gas requiere de varias consideraciones. La primera y más importante es la presión. Desde el punto de vista más práctico, la presión manométrica, que es **la presión que medimos con respecto a la atmósfera, nos permite obtener un factor que se deberá aplicar en la medida del caudal volumétrico**. De esta manera si se está midiendo un caudal de 10 L/min a una presión de 1,2 kg/cm², el verdadero caudal expresado en condiciones normales (Presión atmosférica de 1 kg/cm² =1 bar y 20°C), requerirá aplicar el factor 2,2 (1 kg/cm² de la presión atmosférica + 1,2 kg/cm² de la presión manométrica) para conocer el caudal volumétrico, es decir 10 L/min x 2,2 = 22 L/min.

La mayoría de los rotámetros vienen calibrados para un gas en concreto, mayoritariamente para aire. Cuando se requiere utilizar otro gas, lo más recomendable es adquirir el rotámetro calibrado para ese gas específico (N₂, Ar, CO₂ o mezcla de gases). No obstante, y dado el nivel de precisión de estos sistemas y que se desea trabajar con valores aproximados y no ultra precisos, es posible utilizar tablas para la conversión de caudales entre los diferentes gases.

Para poder realizar las comparaciones entre los diferentes gases el caudal medido, que está referenciado al aire, se corrige utilizando las constantes para cada gas.



Fig. 13.1: a) Rotámetro o caudalímetro volumétrico de área variable y b) regulador de presión con caudalímetro volumétrico (cortesía de Carburros metálicos S.A.)

Tabla 13.1: Factor de corrección para cada uno de los gases utilizados en procesos de inertizado

Gas	N ₂	CO ₂	Ar	80%N ₂ -20%CO ₂	80%Ar-20%CO ₂
Factor de corrección	1,01683	0,81127	0,85152	0,97918	0,84362

Ejemplo:

Determinar de forma simplificada el volumen de gas dosificado en condiciones de trabajo si se utiliza un rotámetro calibrado para aire regulado a 40 L/min y se utiliza Ar cuando el regulador de presión de la botella está fijado a una presión de salida cuando está abierto de 0,5 kg/cm². La presión atmosférica (consultada en un teléfono inteligente) es de 965 mbar.

- Q_g: Caudal de gas en las condiciones del entorno (L/min; m³/h;...)
- Q_L: Caudal de lectura del rotámetro
- P_{atm}: presión atmosférica (se puede consultar en el móvil o reloj inteligente) mbar
- P_{man}: presión que marca el manómetro de salida de gas de la botella (1013 mbar = 1 kg/cm²)
- F_{cg}: factor de corrección por el tipo de gas

$$Q_g = Q_L \cdot \frac{(P_{atm} + P_{man})}{P_{atm}} \cdot F_{cg} = 40 \cdot \frac{(965 + 0,5 \cdot 1013)}{965} \cdot 0,85152 = 51,9 \text{ L/min}$$

Existen en el mercado otros sistemas de medida del caudal volumétrico digitales de coste contenido que compensan todos los factores ambientales como la presión y la temperatura. Alguno está calibrado para diferentes gases y seleccionando el gas corrige el caudal volumétrico. Al ser digitales, la mayoría de ellos son capaces de tener implementada la función contador, con lo que la operación resulta mucho más sencilla.



Fig 13.2: Flujoestado térmico digital Siargo MF5700 para la medida de caudales máxicos de gas. Hay versiones para cada gas

Fig 13.3: Flujoestado térmico digital SMC PF2M7 para la medida de gases, capaz de escoger el tipo de gas entre aire, N₂, Ar, CO₂ y sus mezclas

Tabla 13.2: caudales de diferentes gases medidos en un rotámetro calibrado para aire a 20°C a presión atmosférica

Caudal de aire			N ₂			Ar			CO ₂			80%N ₂ -20%CO ₂			80%Ar-20%CO ₂		
L/min	L/h	m ³ /h	L/min	L/h	m ³ /h	L/min	L/h	m ³ /h	L/min	L/h	m ³ /h	L/min	L/h	m ³ /h	L/min	L/h	m ³ /h
5	300	0,3	5,1	305,0	0,3	4,3	255,5	0,3	4,1	243,4	0,2	4,9	293,8	0,3	4,2	253,1	0,3
10	600	0,6	10,2	610,1	0,6	8,5	510,9	0,5	8,1	486,8	0,5	9,8	587,5	0,6	8,4	506,2	0,5
15	900	0,9	15,3	915,1	0,9	12,8	766,4	0,8	12,2	730,1	0,7	14,7	881,3	0,9	12,7	759,3	0,8
20	1200	1,2	20,3	1220,2	1,2	17,0	1021,8	1,0	16,2	973,5	1,0	19,6	1175,0	1,2	16,9	1012,3	1,0
25	1500	1,5	25,4	1525,2	1,5	21,3	1277,3	1,3	20,3	1216,9	1,2	24,5	1468,8	1,5	21,1	1265,4	1,3
30	1800	1,8	30,5	1830,3	1,8	25,5	1532,7	1,5	24,3	1460,3	1,5	29,4	1762,5	1,8	25,3	1518,5	1,5
35	2100	2,1	35,6	2135,3	2,1	29,8	1788,2	1,8	28,4	1703,7	1,7	34,3	2056,3	2,1	29,5	1771,6	1,8
40	2400	2,4	40,7	2440,4	2,4	34,1	2043,6	2,0	32,5	1947,0	1,9	39,2	2350,0	2,4	33,7	2024,7	2,0
45	2700	2,7	45,8	2745,4	2,7	38,3	2299,1	2,3	36,5	2190,4	2,2	44,1	2643,8	2,6	38,0	2277,8	2,3
50	3000	3,0	50,8	3050,5	3,1	42,6	2554,6	2,6	40,6	2433,8	2,4	49,0	2937,5	2,9	42,2	2530,9	2,5
55	3300	3,3	55,9	3355,5	3,4	46,8	2810,0	2,8	44,6	2677,2	2,7	53,9	3231,3	3,2	46,4	2783,9	2,8
60	3600	3,6	61,0	3660,6	3,7	51,1	3065,5	3,1	48,7	2920,6	2,9	58,8	3525,0	3,5	50,6	3037,0	3,0
65	3900	3,9	66,1	3965,6	4,0	55,3	3320,9	3,3	52,7	3164,0	3,2	63,6	3818,8	3,8	54,8	3290,1	3,3
70	4200	4,2	71,2	4270,7	4,3	59,6	3576,4	3,6	56,8	3407,3	3,4	68,5	4112,6	4,1	59,1	3543,2	3,5
75	4500	4,5	76,3	4575,7	4,6	63,9	3831,8	3,8	60,8	3650,7	3,7	73,4	4406,3	4,4	63,3	3796,3	3,8
80	4800	4,8	81,3	4880,8	4,9	68,1	4087,3	4,1	64,9	3894,1	3,9	78,3	4700,1	4,7	67,5	4049,4	4,0
85	5100	5,1	86,4	5185,8	5,2	72,4	4342,8	4,3	69,0	4137,5	4,1	83,2	4993,8	5,0	71,7	4302,5	4,3
90	5400	5,4	91,5	5490,9	5,5	76,6	4598,2	4,6	73,0	4380,9	4,4	88,1	5287,6	5,3	75,9	4555,5	4,6
95	5700	5,7	96,6	5795,9	5,8	80,9	4853,7	4,9	77,1	4624,2	4,6	93,0	5581,3	5,6	80,1	4808,6	4,8
100	6000	6,0	101,7	6101,0	6,1	85,2	5109,1	5,1	81,1	4867,6	4,9	97,9	5875,1	5,9	84,4	5061,7	5,1

13.4.- La inertización de mangueras

La eliminación del aire de las mangueras mediante el uso de gases que desplacen el oxígeno del aire es una tarea muy recomendable y necesaria, ya que realizada adecuadamente elimina una gran incorporación de

oxígeno en el vino que comienza a trasarse. Para realizar la inertización adecuadamente es necesario poder desplazar el aire de las mangueras sin afectar a los depósitos que conectan, para lo cual hay que utilizar un conector en cada extremo, uno para inyectar el gas de inertizado y el otro para evacuar el aire desplazado. Para ello, se utilizan enlaces macho-hembra del sistema utilizado en la bodega (DIN 11851, Tri-clamp, SMS,...). Los diámetros más comunes son DN32, DN40 y DN50, ya que diámetros mayores son bastante inmanejables. En la *Figura 13.4* se muestra un ejemplo del racor de la norma DIN 11851, enlace utilizado en los ensayos presentados en este manual.

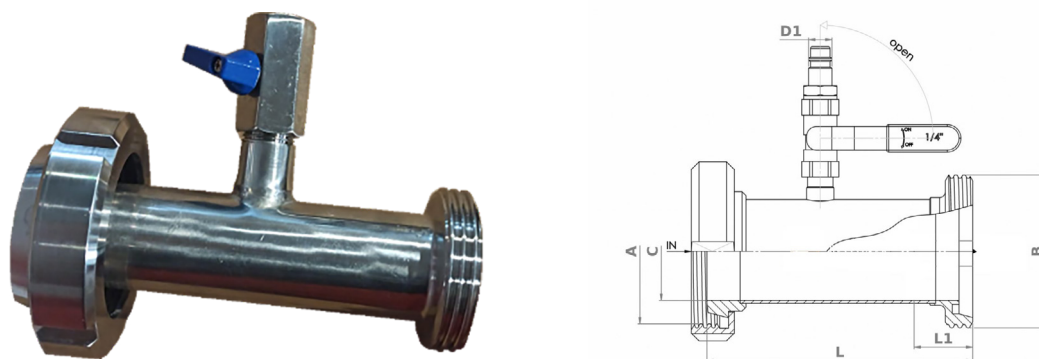


Fig. 13.4: Enlace macho hembra DIN 11851, DN50 con toma lateral 3/8" y mini-válvula de bola

La inertización correcta de las mangueras se alcanza cuando el gas evacuado por el extremo contrario al que se introduce el gas de inertizado muestra una presión parcial de oxígeno de 2,5 hPa (0,5 % O₂). Como no todas las bodegas disponen de un medidor de gas, se puede utilizar la *Figura 13.5* para determinar el tiempo necesario para inertizar una manguera DN50. Se observa que los tiempos son diferentes si se inyecta el gas de inertizado con un caudal de 10 o de 20 L/min, y no es lo mismo hacerlo con un gas que con otro. Con la *Figura 13.5* se pueden calcular los tiempos necesarios para inertizar mangueras.

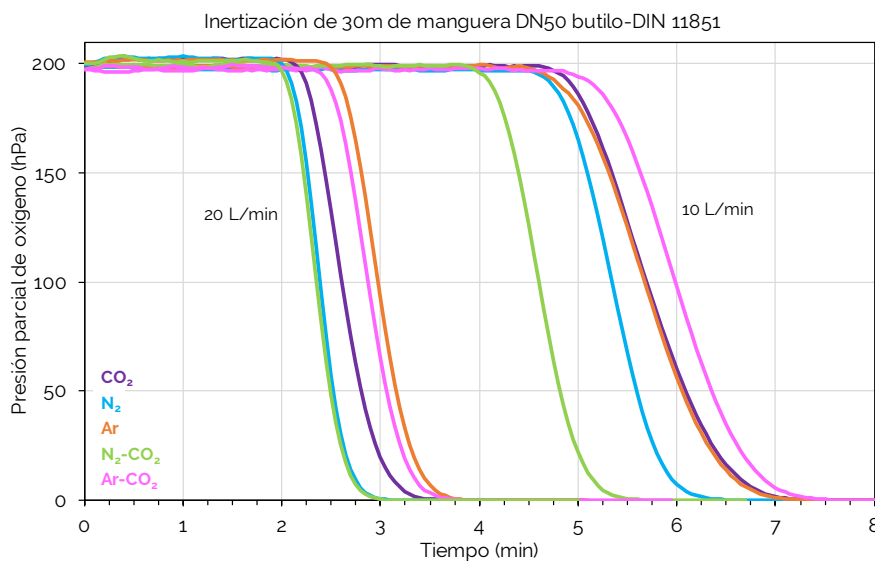


Fig. 13.5: Diagrama para la determinación del tiempo necesario para inertizar una manguera de 30m de butilo y DN50 para dos caudales y los gases de inertizado estudiados

En la *Figura 13.6* se recoge una comparativa del costo que supone el uso de un gas de inertizado u otro frente al nitrógeno y en función del caudal utilizado.

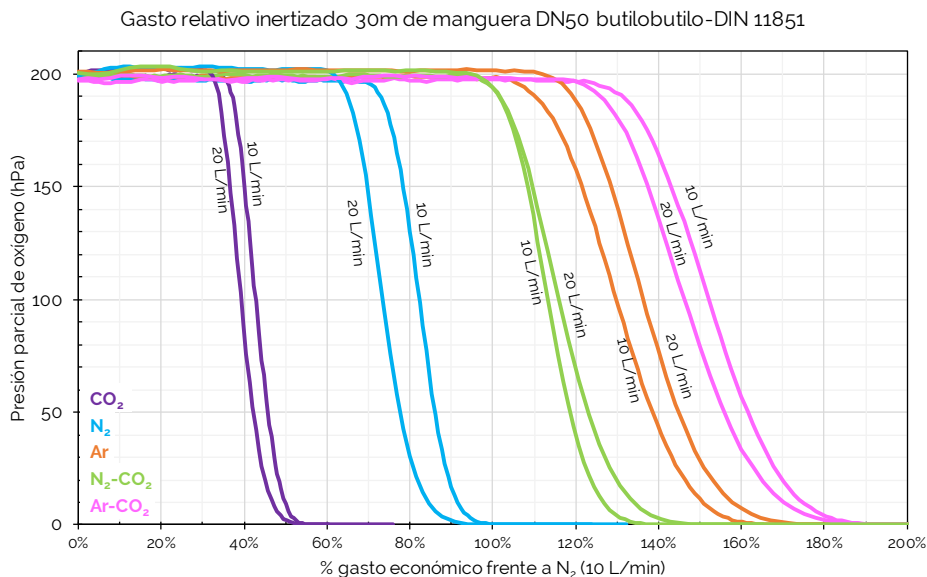


Fig. 13.6: Comparativa del gasto para inertizar una manguera de butilo de 30m y DN50, de los diferentes gases de inertizado frente al uso de N₂ con un caudal de 10 L/min

Como se puede observar únicamente el CO₂ es mucho más económico que el nitrógeno, habiendo escasa diferencia entre ambos caudales. El empleo del resto de los gases es entre un 40 y un 90% más caro. La recomendación es utilizar CO₂ si el vino lo permite, ya que indudablemente se producirá una pequeña incorporación, mientras que el uso de nitrógeno, un gas muy habitual en bodegas por la implantación de generadores de nitrógeno resulta muy recomendable y de coste contenido.

13.5.- La inertización de depósitos vacíos: flushing

Como se ha descrito en el [Capítulo 6](#), de las situaciones que más impacto tienen en la incorporación de oxígeno en un trasiego es la entrada del vino trasegado en el depósito vacío lleno de aire. El primer chorro de vino que entra en el depósito produce un aumento súbito de la superficie del vino en contacto con el aire, lo que normalmente lleva al vino a saturarse del oxígeno del aire (21%). Así, se recomienda como operación de inertizado más efectiva/económica que, tras el inertizado de las mangueras, se inerte el depósito en el que se va a almacenar el vino trasegado. Aunque lo más recomendable sería eliminar la mayoría del oxígeno del aire que lo llena, se ha comprobado que los gases más densos que el aire funcionan mejor, tanto desde el punto de vista de prestaciones de inertizado, como económicas. Los gases más densos permiten realizar un inertizado

por desplazamiento, con lo que la optimización del volumen de gas necesario aparece como una ventaja añadida. La naturaleza de estos gases permite realizar capas más densas que el aire de un espesor muy inferior a la altura del depósito. Así, esta capa que se mantiene en la parte inferior del depósito y acompaña al vino en el llenado del depósito, aísla al vino frente al oxígeno. El volumen recomendado de esta capa es del 50% del volumen del depósito, aunque en depósitos de gran volumen puede resultar más económico en tiempo y coste del gas utilizar el 25%, que ofrece unos resultados suficientemente buenos. Para realizar la operación de inertizado de los depósitos vacíos no es recomendable el nitrógeno, ya que "simplemente" diluye el oxígeno del aire, aunque sea el gas más presente en las bodegas gracias a los generadores de N₂, muy extendidos.

La operativa sería introducir el gas por la parte inferior del depósito, abriendo la tapa superior para evitar la presurización del depósito, facilitar la salida del aire desplazado cuando el gas es inyectado y permitir la formación de la capa de gas. La mayoría de los depósitos de las bodegas cuentan con dos válvulas en su parte inferior, por lo que el llenado se recomienda hacerlo por la válvula situada en la virola inferior del depósito (Figura 13.7). La inyección del gas debe de hacerse por la válvula inferior del fondo del depósito, generalmente utilizada para el vaciado total del mismo (Figura 13.7).



Fig. 13.7: Conexión recomendada para la inertización de mangueras y depósitos con dos válvulas

Cuando en depósitos más pequeños se disponga de una única válvula, se recomienda evacuar el aire de las mangueras desde el extremo conectado al depósito origen y dejar salir el aire arrastrado por el gas utilizado por la válvula en la que la manguera de llenado de vino está conectada al depósito. De esta forma con un único conector podremos inertizar tanto la manguera como el depósito.

13.6.- La cobertura de depósitos llenos: blanketing

Como se ha detallado en el **Capítulo 6**, además de evitar que durante el trasiego de un vino, éste entre en contacto con el aire, sobre todo cuando entra en un depósito vacío, igualmente se ha comprobado que la existencia de aire por encima de la superficie del vino puede ser una fuente importante de incorporación de oxígeno. Las pruebas realizadas para la caracterización de la cantidad de oxígeno que se llega a incorporar han puesto de manifiesto que, aunque menor que en el caso del depósito destino, acompañar con una capa protectora de gas permite minimizar el efecto. **La cantidad optimizada recomendable de un gas más denso que el aire es el 50% del volumen del depósito, siendo los más recomendables el Ar o el CO₂.** Otro aspecto importante es evitar los altos caudales de bombeo que generan torbellinos que aumentan la incorporación del aire, cavitación, o los momentos finales del trasiego cuando la aspiración puede ocasionar la entrada de aire en las conducciones que terminarán borboteando aire en el depósito destino. Es recomendable usar el bombeo al menor caudal posible, lo ideal sería por gravedad, y mantener una capa protectora que en el momento final del trasiego únicamente incorpora un gas sin oxígeno.



Fig. 13.8: Detalle del conexionado de la entrada de gas para el inertizado de un depósito y de la válvula de salida del aire

Para la incorporación del gas en el depósito lleno, lo ideal es disponer en la tapa superior del depósito de un conector para poder introducir el gas (Figura 13.8), o en su lugar un acople con válvula que permita realizar la operación en cualquier conexión de la parte superior del depósito (Figura 13.9). El caudal de entrada de gas debe ajustarse al caudal de vino que mueve la bomba, para garantizar que el volumen que sale del depósito de vino es ocupado por el gas de inertizado escogido. Igualmente es posible realizar una dosificación de gas de forma automática para mantener un depósito inertizado como su puede ver en las Figuras 3.3 y 3.4 del [Capítulo 3](#).



Fig. 13.9: Elementos necesarios para un conexionado de línea de gas con válvula a una conexión DIN 11851 de forma manual

13.7.- La cobertura en el almacenamiento de vinos

En el **Capítulo 8** se han presentado por un lado los resultados de los ensayos de almacenamiento de vinos en depósitos con un gran espacio de cabeza y por otro, las opciones para minimizar las incorporaciones del oxígeno a lo largo del tiempo. Una posible situación en los procesos de embotellado es interrumpirlo por una parada de fin de semana, dejando a medias el depósito con el vino a embotellar, por ello es necesario establecer y mantener las condiciones de inertización en el depósito durante dos o tres días. Cuando se dispone en la bodega de depósitos normales, en los que las tapas no están preparadas para mantener presión positiva (por encima de la atmosférica), para formar capas protectoras gaseosas que separen el vino del aire es necesario recurrir al uso de gases que desplacen el oxígeno e idealmente con densidades superiores al aire.

No es estrictamente necesario inyectar el gas para la formación de la capa protectora justo encima de la superficie del vino, ya que se ha comprobado que la inyección por la tapa tiene unas prestaciones superiores. El gas que produce una mejor protección es la mezcla de CO₂ en Ar, seguida por el CO₂ puro y el argón puro, siendo este último el recomendable si se quiere evitar la incorporación por disolución del CO₂ en el vino. En cuanto a la cantidad de gas a utilizar, para un fin de semana podría ser suficiente con la mitad del volumen de aire que contiene el depósito.

Aun cuando se utilicen las condiciones más favorables de persistencia de la cobertura protectora con un gas libre de oxígeno para minimizar la entrada de aire al depósito, la protección no debe extenderse más allá de las 48-72h, ya que si la capa no se renueva la incorporación del oxígeno del aire sigue una tendencia exponencial. La única forma de mantener la protección en el tiempo es mediante sistemas de inertizado automático con sobrepresión de gas de inertizado (*Figuras 3.3 y 3.4, Capítulo 3*).

En cuanto a la práctica habitual de utilizar la combustión de pastillas de azufre para generar SO₂ como profilaxis para evitar la aparición de microorganismos no deseados, se ha demostrado que no afecta al nivel de oxígeno del aire, con lo que no se puede confiar en esta práctica para evitar la incorporación del oxígeno al vino.

13.8.- La retirada de oxígeno disuelto en vinos mediante el borboteo de gases de inertizado

En este manual se han expuesto las experiencias y recomendaciones para minimizar las incorporaciones de oxígeno atmosférico no deseadas durante el almacenamiento, el trasiego, y eventualmente embotellado de un vino. No siempre es posible realizar trasiegos en condiciones idóneas para minimizar las incorporaciones no deseadas y en muchas ocasiones habrá que recurrir a la disminución del nivel de oxígeno disuelto antes de que interaccione con el vino. Aunque hoy en día existen sistemas de control de gases disueltos mediante el uso de contactores de membrana que funcionan muy bien, este equipamiento no es habitual en una bodega, salvo para situaciones muy concretas que lo requieran.

Cuando hay que recurrir al arrastre del oxígeno disuelto mediante gases, lo más recomendable es utilizar el nitrógeno, que en las condiciones de uso en bodega es considerado como un gas de inertizado. El uso de CO₂ con una solubilidad elevada en vinos, no es recomendable salvo que sea necesario su carbonatación. Las cantidades necesarias para lograr un desplazamiento efectivo del oxígeno disuelto oscilan entre 0,17 y 0,3 L de gas por cada L de vino, dosificados con caudales lo suficientemente bajos como para no disparar la creación de espuma y el gasto de gas.

13.9.- La embotelladora

Ante la necesidad de la adquisición de maquinaria de embotellado y teniendo especial cuidado para minimizar la incorporación de oxígeno en ese proceso, el primer aspecto que hay que tener en consideración es que el equipo tenga acabados de buena calidad, principalmente en el cabezal de llenado, tanto con las zonas en contacto con el gollete de la botella, como en las boquillas de inyección del vino. Resulta fundamental que el cierre superior sea correcto, asegurando la estanqueidad y la correcta evacuación del aire o el gas que contenga la botella, y que la boquilla realice el llenado con la menor turbulencia posible, y de forma homogénea en todas las botellas, con una correcta nivelación del líquido.

Una vez el cabezal de llenado es correcto, y sin considerar aspectos económicos, todas las referencias indican similares recomendaciones, siendo la inertización de la atmósfera de la botella fundamental para disminuir la incorporación de oxígeno en el vino. Es muy recomendable el soplado con gas de inertizado tras el enjuagado para desplazar el aire del interior de la botella, siendo lo correcto que esta atmósfera se conserve así hasta el llenado. Es muy importante controlar la presión de dicho gas, ya que se puede tener un consumo excesivo si la sobrepresión es excesiva. El uso de gas simultáneamente en el llenado contribuye decisivamente a reducir el contacto del vino con el aire, siendo una práctica aplicada por la mayoría de los fabricantes. Al seleccionar la taponadora, se debe considerar la correcta regulación del taponado, así como que las características de la mordaza y el empujador sean adecuadas para la compresión e introducción del tapón sin dañarlo. Así mismo, también disminuye la incorporación de oxígeno, el mantener el espacio de cabeza en atmósfera inerte desde el llenado al taponado, o emplear algún sistema que pueda asegurar que el espacio de cabeza queda protegido frente al oxígeno, extrayendo el gas de cabeza y sustituyéndolo por gas de inertización.

13.10.- La gestión del embotellado para minimizar la incorporación de oxígeno

Los resultados presentados en este manual indican la gran variabilidad en la incorporación de oxígeno al vino recién embotellado (ver [Capítulo 11](#)). Se ha encontrado que el vino durante su movimiento desde el depósito origen hasta la embotelladora puede incorporar entre 1 mg/L y 8 mg/L de oxígeno disuelto. Además, en la embotelladora se añade oxígeno debido al llenado y taponado de la botella, es el oxígeno contenido en el espacio de cabeza de la botella, y varía entre 0,5 mg/L y 3,2 mg/L. Por lo tanto, los vinos recién embotellados pueden contener cantidades de oxígeno próximas a 1,5 mg/L, y en otros casos pueden alcanzar valores próximos a la saturación (más de 8,5 mg/L). La gestión del oxígeno en el embotellado es crucial para la vida del vino en botella, ver [Capítulos 9 y 10](#). Estas dosis de oxígeno en el embotellado definen las características con las que el vino llegará al consumidor. Se ha encontrado que si el oxígeno recibido proviene del proceso de movimiento del vino desde el depósito origen hasta la embotelladora (oxígeno ya disuelto en el vino) los vinos durante la permanencia en botella sufren mayor evolución hacia compuestos de oxidación, mientras que si el oxígeno se va incorporando desde el espacio de cabeza, se favorece que el vino se mantenga más afrutado y floral.



UVa

UVa
MOX

