

## ORIGINAL

# Desarrollo de herramientas digitales predictivas y modelos matemáticos para la seguridad microbiológica del vino embotellado

Antonio Palacios\*, Ixone Borinaga\*, Sergi Ferrer\*\* y Elvira Zaldivar\*\*\*

\* *Laboratorios Excell Ibérica, C/ Planillo Nº 12, 26360 Logroño, La Rioja; www.excelliberica.com; Tel 941 445106.*

\*\* *Enolab, adscrito al Instituto de Biotecnología y Biomedicina (BIOTECMED) de la Universidad de Valencia.*

\*\*\* *QA Team Lead Mondelez International.*

Recibido 11 de febrero de 2026 / Aceptado 10 de marzo de 2026 / Publicado 1 de julio de 2026

## RESUMEN

Este trabajo presenta el desarrollo de herramientas digitales predictivas y modelos matemáticos para evaluar el riesgo microbiológico en vinos embotellados. Se analizaron 40 vinos comerciales embotellados mediante parámetros fisicoquímicos y microbiológicos con el objetivo de establecer relaciones matemáticas entre los datos analíticos y la posible presencia de microorganismos alterantes. A partir de estos datos se aplicaron técnicas estadísticas multivariantes, especialmente regresión por Mínimos Cuadrados Parciales (PLS), para desarrollar modelos predictivos capaces de estimar el riesgo de desarrollo microbiológico en el vino terminado. Los resultados permitieron identificar combinaciones de variables químicas asociadas al crecimiento potencial de microorganismos contaminantes y establecer niveles poblacionales de riesgo microbiológico. Estas herramientas pueden integrarse en sistemas digitales de trazabilidad y control de calidad, facilitando la toma de decisiones en bodegas y mejorando la seguridad microbiológica del vino embotellado.

## PALABRAS CLAVE

Riesgos microbiológicos, vinos embotellado, algoritmos predictivos.

## ABSTRACT

This study presents the development of predictive digital tools and mathematical models for assessing microbiological risk in bottled wines. A total of 40 commercial bottled wines were analysed using physicochemical and microbiological parameters in order to establish mathematical relationships between analytical data and the potential presence of spoilage microorganisms. Multivariate statistical techniques, particularly Partial Least Squares regression (PLS), were applied to develop predictive models capable of estimating the risk of microbial

growth in finished wines. The results allowed the identification of chemical variable combinations associated with the potential development of contaminating microorganisms and the definition of population risk levels. These tools can be integrated into digital traceability and quality control systems, supporting decision-making processes in wineries and improving the microbiological safety of bottled wines.

## KEYWORDS

Microbiological risks, bottled wines, predictive algorithms.

## 1. INTRODUCCIÓN

En el ámbito de un proyecto PERTE, financiado por la UE y en colaboración con Enolab, adscrito al Instituto de Biotecnología y Biomedicina (BIOTECMED) de la Universidad de Valencia y 8 importantes bodegas españolas repartidas por diferentes D.O.s, se ha querido aportar conocimiento y herramientas de evaluación a nivel de los riesgos microbiológicos que un vino pueda sufrir una vez se encuentre embotellado y para ello, se formó un consorcio colaborativo de todos los socios en el ámbito del proyecto llamado WINESURE01 “Estudio del nivel de riesgo microbiológico en función de parámetros bioquímicos, para desarrollar algoritmos y sistemas de trazabilidad que detecten alteraciones en los vinos terminados”.

El contenido de este trabajo incluye la evaluación de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de 40 vinos embotellados en su formato comercial, con el fin de cuantificar las relaciones matemáticas entre los datos de resultados químicos y microbiológicos. El objetivo fue definir niveles poblacionales de riesgo entre posibles microorganismos contaminantes que puedan desarrollar desviaciones sensoriales en el producto final.

A partir de los datos analíticos fisicoquímicos y microbiológicos obtenidos, se aplicó la técnica estadística de

Regresión de Mínimos Cuadrados Parciales (PLS) para construir modelos matemáticos predictivos capaces de explicar la presencia y el comportamiento de bacterias y levaduras en función del perfil químico del vino. Este enfoque permitió identificar los parámetros fisicoquímicos con mayor influencia sobre la estabilidad microbiológica, definiendo marcadores clave de riesgo y estabilidad que integran las ecuaciones predictivas en relación con el estado microbiológico final de las muestras analizadas. Estos modelos ya fueron empleados en trabajos realizados por Baranyi, J. (1995), Fahimi, N., et al. (2014) y Ross, T. et al (1994).

La regresión estadística PLS es especialmente útil cuando hay muchas variables explicativas que pueden estar correlacionadas. Se trata de un método rápido, eficiente y óptimo basado en técnicas de covarianza. Es un método muy recomendable cuando el número de variables explicativas es alto y se sospecha que estas variables pueden estar altamente correlacionadas. El principio de la regresión PLS consiste en generar, a partir de una tabla con “n” observaciones descritas por “p” variables, un conjunto de “h” componentes utilizando los algoritmos PLS1 y PLS2. Este método conduce a un modelo lineal, cuya ecuación es la siguiente: donde Y es la matriz de las variables dependientes, X es la matriz de las variables explicativas, Th, Ch, Wh\*, Wh y Ph son las matrices generadas por el algoritmo PLS, y Eh es la matriz de residuos.

$$Y = ThC'h + Eh = XWh * C'h + Eh = XWh (P'hWh)^{-1} C'h + Eh$$

Una ventaja significativa de la regresión PLS sobre las regresiones clásicas es la disponibilidad de gráficos que

describen la estructura de los datos. Gracias a los gráficos de correlación y carga, es fácil estudiar las relaciones entre las variables, ya sean entre variables explicativas, dependientes, o entre ambas. Además, el gráfico de proyecciones ofrece información sobre la proximidad de las muestras y la estructura del conjunto de datos. La regresión PLS también es útil para construir modelos predictivos.

## 2. OBJETIVOS

El presente trabajo tiene como objetivo principal desarrollar un sistema matemático predictivo que permita estimar el riesgo microbiológico del vino embotellado a partir de sus parámetros fisicoquímicos y su estado microbiológico residual, mediante modelos multivariantes de regresión por mínimos cuadrados parciales (PLS). A través de la identificación de las variables químicas clave que condicionan la supervivencia y proliferación de bacterias y levaduras contaminantes, se busca generar ecuaciones predictivas capaces de anticipar escenarios de inestabilidad microbiológica una vez el vino ha sido envasado y predispuesto para salir al mercado.

Como objetivos secundarios se plantea:

- Determinar los marcadores fisicoquímicos de estabilidad microbiológica más relevantes en vinos blancos, rosados y tintos.
- Establecer umbrales de riesgo microbiológico que faciliten decisiones operativas de liberación, cuarentena o rechazo de partidas embotelladas.
- Sentar las bases para el desarrollo futuro de sistemas de inteligencia artificial (“Microcalculator”) capaces de aprender de nuevas bases de datos analíticas y mejorar

### Análisis - Innovación - Tradición

Desde 1933, al servicio de la excelencia enológica

Acreditados por ENAC desde 1999.  
La acreditación garantiza la competencia técnica, el cumplimiento de normas internacionales y reconocimiento de los resultados a nivel nacional e internacional.

Con más de 90 años de experiencia somos referencia en análisis de vinos, bebidas espirituosas y vinagres.

- ✓ Análisis físico-químico y microbiológico.
- ✓ Control de calidad y asesoramiento técnico.
- ✓ Estudios de estabilidad y envejecimiento.
- ✓ Especialistas en extractos naturales y aromas.



**M.REAL**  
LABORATORIO ENOLÓGICO DESDE 1933



C/ Armas de Santiago, 17. Jerez de la Fra.  
956 185 171 | contacto@laboratoriomreal.com  
@laboratoriomreal | laboratoriomreal.com



| Bodega | Descripción | Grado alcohólico | AT   | pH   | AV   | CO <sub>2</sub> | Densidad | Glu Fru | Ác Málico | Ác Láctico | SO <sub>2</sub> libre | SO <sub>2</sub> total |
|--------|-------------|------------------|------|------|------|-----------------|----------|---------|-----------|------------|-----------------------|-----------------------|
| 1      | MC11-10     | 11,46            | 5,40 | 3,34 | 0,33 | 704             | 0,99590  | 11,70   | 1,40      | 0,10       | 14                    | 90                    |
|        | MC11-11     | 11,57            | 5,40 | 3,34 | 0,34 | 862             | 0,99590  | 11,60   | 1,50      | 0,10       | 15                    | 92                    |
|        | MC11-12     | 11,55            | 5,40 | 3,34 | 0,34 | 982             | 0,99590  | 11,80   | 1,40      | 0,10       | 15                    | 90                    |
|        | MC11-5      | 12,12            | 5,40 | 3,35 | 0,34 | 1.279           | 0,99250  | 4,30    | 1,40      | 0,10       | 1                     | 110                   |
|        | MC11-13     | 11,58            | 5,40 | 3,35 | 0,33 | 441             | 0,99570  | 11,10   | 1,40      | 0,10       | 12                    | 97                    |
| 2      | M0 11-1     | 13,55            | 5,30 | 3,55 | 0,46 | 309             | 0,99040  | 0,70    | 1,50      | 0,20       | 5                     | 75                    |
| 3      | L:AB01/23   | 12,43            | 6,30 | 3,64 | 0,55 | 769             | 0,99360  | 2,90    | 3,80      | 1,00       | 5                     | 73                    |
|        | L:TG06/23   | 12,16            | 6,40 | 3,52 | 0,51 | 679             | 0,99350  | 3,10    | 3,70      | 0,70       | 10                    | 93                    |
|        | L:TG07/23   | 11,94            | 6,40 | 3,52 | 0,51 | 550             | 0,99370  | 3,00    | 3,70      | 0,70       | 9                     | 94                    |
|        | L:TG10/23   | 12,22            | 6,30 | 3,60 | 0,52 | 793             | 0,99360  | 3,10    | 3,70      | 0,80       | 11                    | 99                    |
|        | L:TG8/23    | 12,09            | 6,30 | 3,55 | 0,55 | 682             | 0,99360  | 3,10    | 3,60      | 0,80       | 12                    | 105                   |
| 4      | VC05        | 11,20            | 5,25 | 3,35 | 0,28 | 592             | 0,99290  | 2,19    | 1,02      | 0,54       | 15                    | 112                   |
|        | VC07        | 11,24            | 5,25 | 3,46 | 0,31 | 511             | 0,99330  | 1,99    | 1,75      | 0,52       | 9                     | 156                   |
|        | VC09        | 12,66            | 5,50 | 3,34 | 0,40 | 428             | 0,99100  | 1,76    | 1,95      | 0,57       | 12                    | 86                    |
|        | VC14        | 12,65            | 5,54 | 3,36 | 0,34 | 416             | 0,99190  | 4,34    | 1,83      | 0,43       | 190                   | 96                    |
|        | VC20        | 11,20            | 5,27 | 3,46 | 0,31 | 521             | 0,99320  | 1,51    | 1,77      | 0,53       | 6                     | 158                   |

Tabla 1.

continuamente la capacidad predictiva de los modelos. Este enfoque se integra plenamente en el concepto de Industria 4.0, donde el análisis de datos, la modelización matemática y la digitalización de procesos permiten una gestión predictiva de la calidad sensorial y seguridad y alimentaria del vino. Ya en 2013, Taboada-Rodríguez et al usaron métodos similares para optimizar el uso de conservantes en vinos tintos desalcoholizados con buenos resultados

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

Para desarrollar estos modelos matemáticos, las 40 muestras de vino blanco, fueron divididas en dos grupos: vinos blancos y rosados, por un lado, y tintos por otro. Una vez obtenidos los modelos matemáticos, se realizaron sucesivas iteraciones para eliminar las variables que no aportaban valor al modelo. Como criterio de calidad se utilizó el gráfico de VIPs (Importancia de las Variables para la Proyección), el cual permite identificar rápidamente qué variables explicativas tienen mayor contribución al modelo. Según Tenenhaus y colaboradores (2005), las variables deben tener valores superiores a 0,8 para que se considere que contribuyen significativamente al modelo matemático.

Tras la elaboración de los primeros modelos, se llevó a cabo un proceso interactivo con el objetivo de seleccionar única-

mente aquellas variables que mostraron valores superiores a 0,8 en la primera iteración, y eliminar aquellas con valores VIPs inferiores. Esto garantizó que las variables retenidas contribuyeran de manera significativa a la calidad del modelo. Además, se verificó que la retención de parámetros con valores VIPs seleccionados, no solo mejoraba la calidad del ajuste del modelo (reflejada en la disminución del parámetro Q<sup>2</sup>), sino que también incrementaba el valor del parámetro R<sup>2</sup>X acumulado, cuyo valor óptimo descrito en bibliografía es de 0,6 en adelante, siendo este valor un indicador de la calidad explicativa del modelo.

Tras este proceso se obtuvieron cuatro modelos matemáticos:

1. Modelo PLS explicativo de la población de **bacterias** en función de parámetros fisicoquímicos en **vinos blancos y rosados**.
  2. Modelo PLS explicativo de la población de **levaduras** en función de parámetros fisicoquímicos en **vinos blancos y rosados**.
  3. Modelo PLS explicativo de la población de **bacterias** en función de parámetros fisicoquímicos en **vinos tintos**.
  4. Modelo PLS explicativo de la población de **levaduras** en función de parámetros fisicoquímicos en **vinos tintos**.
- Para el desarrollo del sistema matemático predictivo

Antonio Palacios, Ixone Borinaga, Sergi Ferrer y Elvira Zaldivar

| Bodega | Descripción | <i>A. aceti</i> | <i>L. brevis</i> | <i>L. Plantarum</i> | <i>O. oeni</i> | <i>Pediococcus</i> | <i>S. cerevisiae</i> | <i>Z. Bailli</i> | <i>Brett.</i> | <i>Hongos</i> | <i>Bact. Acéticas</i> | <i>Bact. Lácticas</i> | <i>Levaduras</i> | <i>Levaduras NS</i> |
|--------|-------------|-----------------|------------------|---------------------|----------------|--------------------|----------------------|------------------|---------------|---------------|-----------------------|-----------------------|------------------|---------------------|
| 1      | MC11-10     | nd              | nd               | nd                  | 48             | nd                 | 45.000               | nd               | nd            | nd            | nd                    | nd                    | nd               | nd                  |
|        | MC11-11     | nd              | 20               | nd                  | 260            | nd                 | nd                   | nd               | nd            | nd            | nd                    | nd                    | nd               | nd                  |
|        | MC11-12     | nd              | nd               | nd                  | nd             | nd                 | 110                  | nd               | nd            | nd            | nd                    | nd                    | 800              | nd                  |
|        | MC11-5      | 250             | nd               | nd                  | nd             | nd                 | 5.200                | nd               | nd            | nd            | nd                    | nd                    | 440.000          | nd                  |
|        | MC11-13     | 110             | nd               | nd                  | nd             | nd                 | 180                  | nd               | nd            | nd            | nd                    | nd                    | nd               | nd                  |
| 2      | M0 11-1     | 350             | nd               | nd                  | nd             | nd                 | nd                   | nd               | nd            | 2             | nd                    | nd                    | nd               | nd                  |
| 3      | L:AB01/23   | 15              | nd               | nd                  | nd             | nd                 | 4                    | nd               | nd            | nd            | nd                    | nd                    | nd               | nd                  |
|        | L:TG06/23   | nd              | nd               | nd                  | nd             | 35                 | 120                  | nd               | nd            | nd            | nd                    | nd                    | nd               | nd                  |
|        | L:TG07/23   | nd              | nd               | nd                  | 17             | nd                 | nd                   | 84               | nd            | nd            | nd                    | nd                    | nd               | nd                  |
|        | L:TG10/23   | nd              | nd               | nd                  | nd             | nd                 | 66                   | 87               | nd            | nd            | nd                    | nd                    | nd               | nd                  |
|        | L:TG8/23    | nd              | nd               | nd                  | nd             | 43                 | 130                  | nd               | nd            | nd            | nd                    | nd                    | nd               | nd                  |
| 4      | VC05        | nd              | nd               | nd                  | nd             | nd                 | 220                  | nd               | nd            | nd            | nd                    | nd                    | 136              | nd                  |
|        | VC07        | nd              | nd               | nd                  | 93             | nd                 | 210                  | 190              | nd            | nd            | nd                    | nd                    | 80               | nd                  |
|        | VC09        | nd              | nd               | nd                  | nd             | nd                 | 61                   | nd               | nd            | nd            | nd                    | nd                    | 24               | nd                  |
|        | VC14        | nd              | nd               | nd                  | 180            | nd                 | 110                  | nd               | nd            | nd            | nd                    | nd                    | 24               | nd                  |
|        | VC20        | nd              | nd               | nd                  | 87             | nd                 | nd                   | 30               | nd            | nd            | nd                    | nd                    | 44               | nd                  |

nd= no detectado

Tabla 2.

aplicado a la evaluación del riesgo microbiológico del vino una vez embotellado con el fin de anticipar posibles problemas de inestabilidad en el producto final, se emplearon modelos estadísticos multivariantes basados en regresión de mínimos cuadrados parciales (PLS), implementados a través del software estadístico XLSTAT 2024.

Las matrices de datos empleadas en los algoritmos provienen de los análisis microbiológicos y químicos de las 4

bodegas que participaron con vinos blancos o rosados y las 5 con tintos.

La **Tabla 1** muestra los parámetros fisicoquímicos de los vinos blancos y rosados obtenidos mediante técnicas enzimáticas y de infrarrojo cercano.

La **Tabla 2** muestra los parámetros microbiológicos de los vinos blancos y rosados obtenidos por técnicas de cultivo en medios selectivos, PCR a tiempo real y citometría de flujo en forma de matriz primera de datos.



**Fabricación, venta y alquiler de maquinaria para el método tradicional**

Fabricante marca



93 015 36 63

www.sparklingequipment.com  
sales@sparklingequipment.com



*Desarrollo de herramientas digitales predictivas y modelos matemáticos para la seguridad microbiológica del vino embotellado*

| Bodega | Descripción       | Grado alcohólico | AT   | pH   | AV   | CO <sub>2</sub> | Densid. | Glu Fru | Ác Málico | Ác Láctico | SO <sub>2</sub> libre | SO <sub>2</sub> total |
|--------|-------------------|------------------|------|------|------|-----------------|---------|---------|-----------|------------|-----------------------|-----------------------|
| 1      | BB11-1-TR         | 14,35            | 5,30 | 3,66 | 0,74 | 206             | 0,99210 | 0,50    | 0,00      | 1,30       | 10                    | 74                    |
|        | BB11-6-TR         | 14,43            | 5,40 | 3,63 | 0,68 | 222             | 0,99190 | 0,40    | 0,00      | 1,30       | 6                     | 55                    |
|        | BB11-7-TR         | 14,58            | 5,60 | 3,62 | 0,75 | 203             | 0,99200 | 0,40    | 0,00      | 1,30       | 9                     | 62                    |
|        | BB11-10-TR        | 14,59            | 5,50 | 3,61 | 0,75 | 177             | 0,99190 | 0,20    | 0,00      | 0,20       | 4                     | 12                    |
|        | BB11-12-TR        | 15,02            | 5,40 | 3,69 | 0,70 | 198             | 0,99150 | 0,50    | 0,00      | 1,40       | 5                     | 37                    |
| 2      | Co11-1            | 14,79            | 5,03 | 3,91 | 0,68 | 428             | 0,99230 | 0,52    | 0,00      | 1,50       | 10                    | 26                    |
|        | Caño 1            | 14,93            | 5,20 | 3,88 | 0,69 | 360             | 0,99190 | 0,60    | 0,00      | 1,60       | 15                    | 43                    |
|        | Caño 3            | 14,86            | 5,20 | 3,88 | 0,69 | 345             | 0,99200 | 0,60    | 0,00      | 1,60       | 14                    | 43                    |
|        | Caño 5            | 14,87            | 5,20 | 3,88 | 0,69 | 333             | 0,99200 | 0,60    | 0,00      | 1,60       | 14                    | 43                    |
|        | Caño 10           | 14,89            | 5,20 | 3,88 | 0,69 | 400             | 0,99200 | 0,70    | 0,00      | 1,60       | 14                    | 44                    |
|        | Caño 15           | 14,89            | 5,20 | 3,88 | 0,69 | 319             | 0,99190 | 0,60    | 0,00      | 1,60       | 16                    | 44                    |
| 3      | GV-11-3 TD        | 12,32            | 5,50 | 3,48 | 0,51 | 247             | 1,00210 | 23,30   | 0,00      | 0,60       | 10                    | 54                    |
|        | GV 11-6TD         | 12,34            | 5,40 | 3,48 | 0,50 | 233             | 1,00160 | 22,00   | 0,00      | 0,60       | 11                    | 66                    |
|        | GV11- 10 TD       | 13,27            | 5,20 | 3,76 | 0,57 | 285             | 1,00200 | 22,90   | 0,00      | 1,20       | 14                    | 45                    |
|        | GV11- 14 SIN ALC. | 12,35            | 5,40 | 3,49 | 0,47 | 245             | 1,00280 | 24,70   | 0,00      | 0,70       | 15                    | 72                    |
|        | GV11- 15 SIN ALC. | 12,42            | 5,40 | 3,49 | 0,48 | 187             | 1,00210 | 23,30   | 0,00      | 0,60       | 12                    | 60                    |
|        |                   |                  |      |      |      |                 |         |         |           |            |                       |                       |
| 4      | MO 11-8           | 14,22            | 5,70 | 3,64 | 0,76 | 295             | 0,99300 | 0,40    | 0,00      | 1,60       | 10                    | 49                    |
|        | MO 11-11          | 14,00            | 5,50 | 3,62 | 0,58 | 329             | 0,99260 | 0,60    | 0,00      | 1,60       | 9                     | 35                    |
|        | MO 11-12          | 14,00            | 5,50 | 3,62 | 0,58 | 303             | 0,99270 | 0,60    | 0,00      | 1,60       | 7                     | 33                    |
|        | MO 11-15          | 13,83            | 5,50 | 3,61 | 0,67 | 312             | 0,99220 | 0,30    | 0,00      | 1,40       | 11                    | 41                    |
| 5      | V11-5TR           | 15,21            | 5,10 | 3,78 | 0,64 | 228             | 0,99180 | 0,90    | 0,00      | 0,90       | 18                    | 45                    |
|        | V11-6TR           | 15,29            | 5,10 | 3,78 | 0,64 | 218             | 0,99170 | 0,90    | 0,00      | 0,90       | 18                    | 46                    |
|        | V11-7TR           | 15,21            | 5,10 | 3,77 | 0,64 | 208             | 0,99180 | 0,90    | 0,00      | 0,90       | 14                    | 44                    |
|        | V11-8TR           | 15,28            | 5,10 | 3,78 | 0,64 | 229             | 0,99170 | 0,90    | 0,00      | 0,90       | 17                    | 45                    |
|        | V11-10TR          | 15,28            | 5,10 | 3,78 | 0,60 | 222             | 0,99180 | 0,90    | 0,00      | 0,90       | 18                    | 47                    |

**Tabla 3.**

La **Tabla 3** muestra los parámetros fisicoquímicos de los vinos tintos obtenidos mediante técnicas analíticas enzimáticas y de infrarrojo cercano que formó la tercera matriz de datos.

Por último, la **Tabla 4** detalla los parámetros microbiológicos obtenidos por técnicas de cultivo en medio selectivo, PCR y citometría de flujo en la cuarta matriz de datos primarios.

#### 4. RESULTADOS OBTENIDOS

##### 4.1. Modelo PLS explicativo del riesgo por bacterias en vinos blancos y rosados

Los VIPs (*Variable Importance in Projection*) en PLS miden la relevancia de cada variable predictiva para el ajuste del modelo, considerando tanto la predicción de Y como la estructura de X. Son herramientas clave para la selección de variables y la identificación de biomarcadores, donde valores >0,8 indican importancia significativa (**Figura 1**).

Según estos resultados, se eliminan del modelo matemático los parámetros inferiores a VIP de 0,8 como se

ve en el gráfico superior izquierdo (grado alcohólico, densidad, sulfuroso libre y total). El modelo obtenido tiene los siguientes parámetros de calidad: Q<sup>2</sup> acumulado de -0,055, R<sup>2</sup>Y acumulado de 0,227 y R<sup>2</sup>X acumulado de 0,598. Por lo que el parámetro R<sup>2</sup>X acumulado es cercano a 0,6, siendo este límite de corte a nivel de validación.

El modelo está compuesto por variables que aportan condiciones positivas al crecimiento de las bacterias en vinos blancos y rosados, como son: pH y acidez volátil. De esta manera, valores mayores de pH beneficiarían el crecimiento de las bacterias, por lo que es recomendable manejar el pH y mantener bajos los niveles de acidez volátil. Existen otros parámetros que también aportan de manera positiva al modelo, como serían la presencia del dióxido de carbono, ácido málico y azúcares residuales. Lo contrario para el ácido láctico, dado que una vez producido aminora el crecimiento de las bacterias lácticas debido al efecto inhibitor metabólico, fenómeno también conocido como retro inhibición o inhibición de producto final.

Antonio Palacios, Ixone Borinaga, Sergi Ferrer y Elvira Zaldivar

| Bodega | Descripción          | A. aceti | L. brevis | L. Plantarum | O. oeni | Pediococcus | S. cerevisiae | Z. Bailli | Hongos | Bact. Ácidas | Bact. Lácticas | Levaduras | Levaduras NS |
|--------|----------------------|----------|-----------|--------------|---------|-------------|---------------|-----------|--------|--------------|----------------|-----------|--------------|
| 1      | BB11-5-TR            | nd       | nd        | nd           | nd      | nd          | nd            | nd        | 4      | nd           | nd             | nd        | nd           |
|        | BB11-6-TR            | nd       | 29        | nd           | 11      | nd          | 56            | nd        | nd     | nd           | nd             | nd        | nd           |
|        | BB11-7-TR            | nd       | nd        | nd           | nd      | nd          | nd            | nd        | 4      | nd           | nd             | nd        | nd           |
|        | BB11-10-TR           | nd       | nd        | nd           | nd      | nd          | 130           | nd        | 8      | nd           | nd             | nd        | nd           |
|        | BB11-12-TR           | 54       | nd        | 100          | nd      | nd          | nd            | nd        | nd     | nd           | nd             | nd        | nd           |
| 2      | Co11-1               | 170.000  | nd        | 43           | 180.000 | 24          | 100           | 17        | nd     | 82.000       | 620.000        | nd        | nd           |
|        | Caño 1               | 65       | 22        | nd           | 560     | nd          | 560           | nd        | nd     | nd           | nd             | 140       | nd           |
|        | Caño 3               | 890      | nd        | 360          | nd      | nd          | 360           | nd        | nd     | 220          | nd             | 176       | nd           |
|        | Caño 5               | nd       | 36        | nd           | nd      | nd          | 650           | nd        | nd     | nd           | nd             | 240       | nd           |
|        | Caño 10              | 53       | 28        | nd           | nd      | nd          | 710           | nd        | nd     | nd           | nd             | 350       | nd           |
|        | Caño 15              | 72       | nd        | nd           | nd      | nd          | 1.000         | nd        | nd     | nd           | nd             | 590       | nd           |
| 3      | GV11-3 TD            | 57       | nd        | nd           | 260     | 310         | 66            | nd        | nd     | nd           | 12             | nd        | nd           |
|        | GV 11-6TD            | 4.000    | nd        | nd           | 12      | nd          | 180           | nd        | nd     | 80.000       | nd             | 6         | nd           |
|        | GV11- 10 TD          | 61.000   | nd        | nd           | nd      | nd          | 27            | nd        | nd     | 1.000.000    | nd             | nd        | nd           |
|        | GV11- 14 TD SIN ALC. | 6.800    | nd        | nd           | nd      | nd          | 62            | nd        | nd     | 30.000       | nd             | nd        | nd           |
|        | GV11- 15 TD SIN ALC. | 900      | 22        | nd           | 76      | nd          | nd            | nd        | nd     | nd           | nd             | nd        | nd           |
| 4      | M0 11-8              | 500      | nd        | nd           | 110     | nd          | nd            | nd        | nd     | nd           | nd             | nd        | nd           |
|        | M0 11-11             | nd       | nd        | nd           | 68      | nd          | nd            | nd        | 4      | nd           | nd             | nd        | nd           |
|        | M0 11-12             | nd       | nd        | nd           | 24      | nd          | nd            | nd        | 2      | nd           | nd             | nd        | nd           |
|        | M0 11-15             | nd       | nd        | nd           | 54      | nd          | 70            | nd        | 8      | nd           | nd             | nd        | nd           |
| 5      | V11-5TR              | 20       | nd        | nd           | 90      | nd          | 70            | nd        | nd     | nd           | nd             | nd        | nd           |
|        | V11-6TR              | nd       | 18        | nd           | nd      | nd          | 25            | nd        | nd     | nd           | nd             | nd        | nd           |
|        | V11-7TR              | nd       | nd        | nd           | 65      | nd          | nd            | nd        | nd     | nd           | nd             | nd        | nd           |
|        | V11-8TR              | 30       | nd        | 19           | 21      | nd          | 14            | nd        | nd     | nd           | nd             | nd        | nd           |
|        | V11-10TR             | 28       | nd        | nd           | 36      | nd          | 38            | nd        | nd     | nd           | nd             | nd        | nd           |

nd= no detectado

Tabla 4.

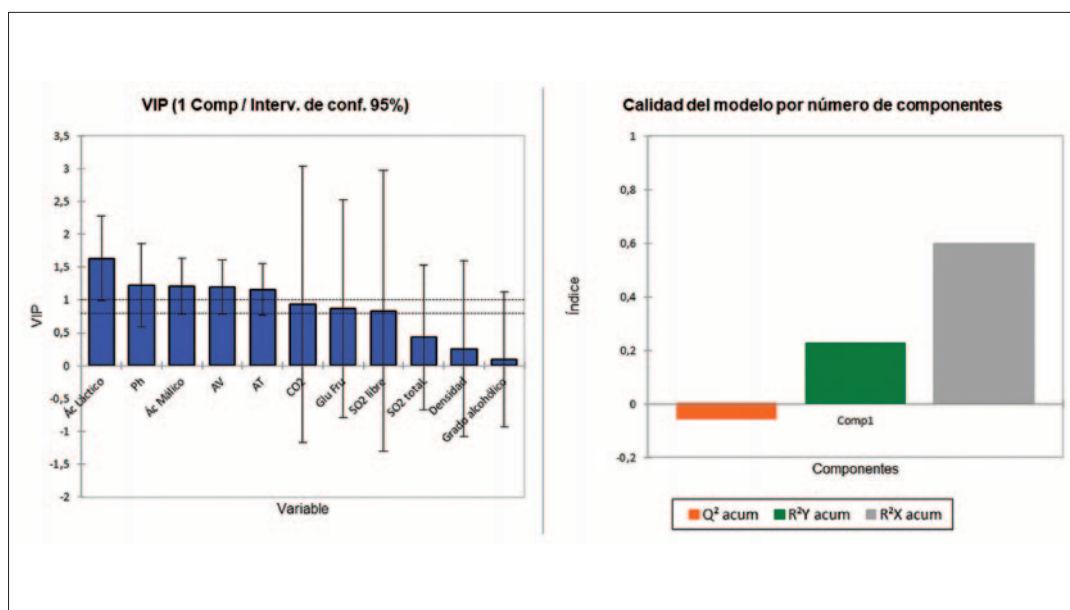


Figura 1. Gráfico VIPS en vinos blancos y rosados para bacterias(izquierda) y Gráfico de calidad del modelo predictivo (derecha).

| Variable        | Bacterias blancos y rosados |
|-----------------|-----------------------------|
| Intercepción    | 417,48                      |
| AT              | -30,87                      |
| pH              | 17,33                       |
| AV              | 59,98                       |
| CO <sub>2</sub> | 0,012                       |
| Glu Fru         | 1,55                        |
| Ác Málico       | 13,28                       |
| Ác Láctico      | -60,44                      |

Tabla 5.

| Variable         | Levaduras vinos blancos y rosados |
|------------------|-----------------------------------|
| Intercepción     | 19.000.000                        |
| Grado alcohólico | -27.000                           |
| AT               | -6.800                            |
| pH               | 100.000                           |
| AV               | 51.000                            |
| CO <sub>2</sub>  | -390                              |
| Densidad         | -19.000.000                       |
| Glu Fru          | 5.800                             |
| Ác Málico        | -7.600                            |
| Ác Láctico       | -84.000                           |

Tabla 6.

El modelo matemático obtenido consta de las variables indicadas en la [Tabla 5](#).

La fórmula matemática predictiva para el modelo de riesgo bacteriano en vinos blancos y rosados es la siguiente:

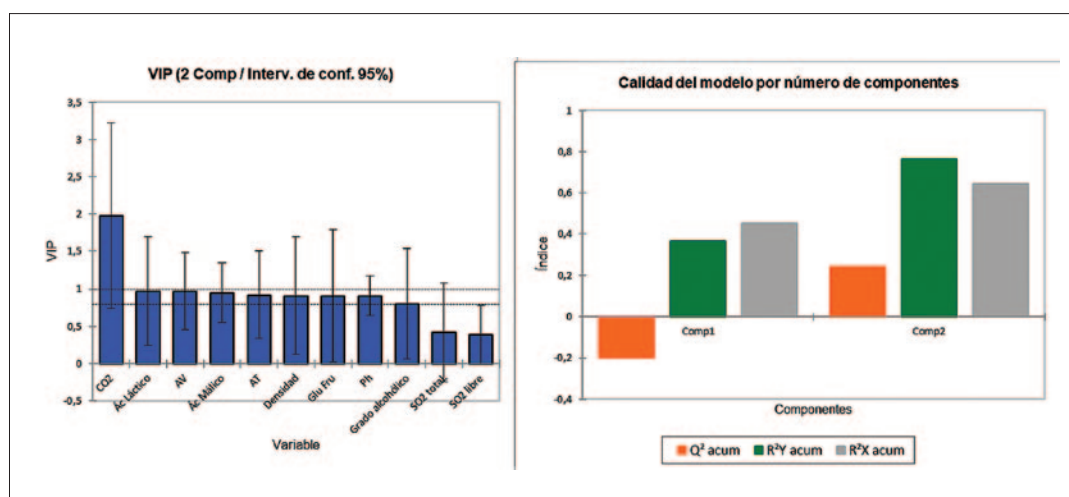
**Levaduras blancos y rosados** =  $1,9 \times 10^{-2} - 2,7 \times 10^4 \times \text{Grado alcohólico} - 6,8 \times 10^3 \times \text{AT} + 1,0 \times 10^5 \times \text{pH} + 5,1 \times 10^4 \times \text{AV} - 3,9 \times 10^2 \times \text{CO}_2 - 1,9 \times 10^7 \times \text{Densidad} + 5,8 \times 10^3 \times \text{Glu/Fru} - 7,6 \times 10^3 \times \text{Ác. Málico} - 8,4 \times 10^4 \times \text{Ác Láctico}$

#### 4.2. Modelo PLS explicativo del riesgo por levaduras en función de los parámetros fisicoquímicos en vinos blancos y rosados

La [Figura 2](#) muestra el gráfico de VIPs de la primera reiteración para la creación del modelo.

Se eliminan del modelo los parámetros sulfuroso libre y total, al ser secundarios. El análisis estadístico realizado devuelve dos posibles modelos, eligiéndose la componente 2, dado que sus parámetros de calidad son superiores. El modelo obtenido tiene los siguientes parámetros de calidad: Q<sup>2</sup> acumulado de 0,240, R<sup>2</sup>Y acumulado de 762 y R<sup>2</sup>X acumulado de 0,644. El parámetro R<sup>2</sup>X supera el valor de 0,6, sirviendo este límite de corte.

El modelo matemático obtenido consta de las variables indicadas en la [Tabla 6](#).



**Figura 2.** Gráfico VIPs en vinos blancos y rosados para levaduras (izquierda) y Gráfico de calidad del modelo predictivo (derecha).

LaVigne™  
**PROHYDRO**

Reduce el estrés  
hídrico y térmico

LaVigne™  
**RESILIENS**

Mitiga el  
estrés abiótico

LaVigne™  
**CICATRIX**

Recuperación  
tras granizo

LaVigne™  
**AROMA**

Eleva el potencial  
aromático

LaVigne™  
**BOTRYLESS**

Controla *Botrytis* y  
Podredumbre ácida

LaVigne™  
**MATURE**

Adelanta la  
madurez fenólica

La gama LaVigne™ ofrece soluciones microbiológicas diseñadas para mejorar la rentabilidad del viñedo y la calidad de la uva y del vino.

| Variable              | Bacterias vinos tintos |
|-----------------------|------------------------|
| Intercepción          | -13.000.000            |
| AT                    | -420.000               |
| pH                    | 420.000                |
| CO <sub>2</sub>       | 1.200                  |
| Densidad              | 14.000.000             |
| Glu Fru               | 5.900                  |
| SO <sub>2</sub> total | -3.600                 |

Tabla 7.

La fórmula matemática predictiva para el modelo de riesgo de contaminación por parte de levaduras en vinos blancos y rosados es la siguiente:

**Levaduras blancos y rosados** =  $1,9 \times 10^{-2} - 2,7 \times 10^4 \times \text{Grado alcohólico} - 6,8 \times 10^3 \times \text{AT} + 1,0 \times 10^5 \times \text{pH} + 5,1 \times 10^4 \times \text{AV} - 3,9 \times 10^2 \times \text{CO}_2 - 1,9 \times 10^7 \times \text{Densidad} + 5,8 \times 10^3 + \text{Glu/Fru} - 7,6 \times 10^3 \times \text{Ác. Málico} - 8,4 \times 10^4 \times \text{Ác. Láctico}$

El modelo está compuesto por variables que aportan condiciones positivas al crecimiento de las levaduras en vinos blancos y rosados, como son el pH, acidez volátil, CO<sub>2</sub> (propiedades anaerobias) y glucosa-fructosa. Otros parámetros, como la presencia de ácidos, disminuirían su capacidad de desarrollo en los vinos blancos y rosados.

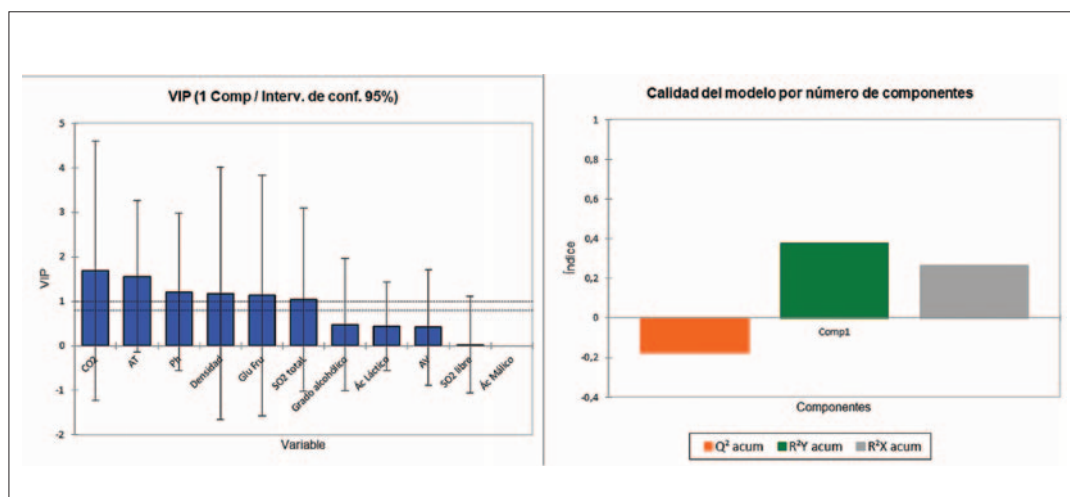
| Variable              | Levaduras vinos tintos |
|-----------------------|------------------------|
| Intercepción          | -1.700                 |
| AT                    | -240                   |
| pH                    | 670                    |
| CO <sub>2</sub>       | -1                     |
| Ác Láctico            | -160                   |
| SO <sub>2</sub> libre | -12                    |

Tabla 8.

### 4.3. Modelo PLS explicativo del riesgo por bacterias en función de parámetros fisicoquímicos en vinos tintos

La **Figura 3** muestra los gráficos de calidad estadística. Se eliminan del modelo los parámetros grado alcohólico, ácido láctico, ácido málico, acidez volátil y sulfuroso libre. El modelo obtenido tiene los siguientes parámetros de calidad: Q<sup>2</sup> acumulado de -0,172, R<sup>2</sup>Y acumulado de 0,377 y R<sup>2</sup>X acumulado de 0,262. El parámetro R<sup>2</sup>X acumulado es muy bajo (0,262), por lo que no se encuentra cercano al límite el de corte de 0,6. Se muestra en cualquier caso el modelo obtenido siendo este el de mayor calidad encontrada, no considerándose en este caso útil para los objetivos del trabajo.

El modelo obtenido consta de las variables indicadas en la **Tabla 7**.



**Figura 3.** Gráfico VIPS en vinos tintos para bacterias (izquierda) y Gráfico de calidad del modelo predictivo (derecha).

La fórmula matemática predictiva para el modelo de riesgo de contaminación por parte de bacterias en vinos tintos es la siguiente:

$$\text{Bacterias vino tinto} = -1,3 \times 10^7 - 4,2 \times 10^5 \cdot AT + 4,2 \times 10^5 \cdot pH + 1,2 \times 10^3 \cdot CO_2 + 1,4 \times 10^7 \cdot \text{Densidad} + 5,9 \times 10^3 \cdot \text{Glu/Fru} - 3,6 \times 10^3 \cdot SO_2 \text{ total}$$

En el caso del vino tinto el crecimiento de las bacterias se ve influenciado positivamente por los valores elevados de pH, CO<sub>2</sub> y densidad. Para inhibir el crecimiento de bacterias en vinos tintos se debería aumentar los valores de sulfuroso total (lo que incluye rigurosamente la fracción libre) y de la acidez total. Aunque como se ha dicho anteriormente, el modelo no se considera válido, seguramente por la necesidad de trabajar el modelo con más muestras para poder alimentar la base de datos.

#### 4.4. Modelo PLS explicativo del riesgo por levaduras en función de parámetros fisicoquímicos en vinos tintos

La Figura 4 muestra el gráfico de VIPs (Importancia de las Variables para la Proyección) y de calidad estadística para la creación del modelo.

Se eliminan del modelo los parámetros grado alcohólico, densidad, ácido málico, glucosa-fructosa, acidez volátil y sulfuroso total. El modelo obtenido tiene los siguientes parámetros de calidad: Q<sup>2</sup> acumulado de 0,246, R<sup>2</sup>Y acumulado de 0,366 y R<sup>2</sup>X acumulado de 0,524. El parámetro R<sup>2</sup>X acumulado no alcanza el valor de 0,6, siendo este el límite de corte. Sin embargo, autores como Sturm, M. E., et al. (2014) publica-

ron modelos para el crecimiento de levaduras contaminantes en vinos en función del pH, etanol y SO<sub>2</sub> libre exitosos debido al empleo de un mayor número de muestras.

El modelo obtenido consta de las variables indicadas en la Tabla 8.

La fórmula matemática predictiva para el modelo de riesgo de contaminación por parte de levaduras en vinos tintos es la siguiente:

$$\text{Levaduras vinos tintos} = -1,7 \times 10^3 - 2,4 \times 10^2 \cdot AT + 6,7 \times 10^2 \cdot pH - 1,3 \cdot CO_2 + 1,6 \times 10^2 \cdot \text{Ác Lático} - 1,2 \times 10^1 \cdot SO_2 \text{ libre}$$

En el caso del vino tinto el crecimiento de las levaduras se ve influenciado positivamente por los valores elevados de pH. Por el contrario, para inhibir su crecimiento se debería respetar la presencia de CO<sub>2</sub> creando mejores condiciones anaerobias, incrementar la fracción de sulfuroso libre, favorecer una mayor presencia de acidez total y constatar la realización de la FML con la presencia de ácido láctico.

Por último, hemos desarrollado un sistema de cálculo en Excel para que las bodegas puedan calcular sus niveles de riesgo microbiológico del vino embotellado metiendo los datos de los parámetros químicos del vino después del embotellado, con la idea de facilitar la decisión de liberar la mercancía en virtud de los resultados, ponerla en cuarentena o rechazarla si llegase el caso. Ponemos un ejemplo en el caso del algoritmo desarro-

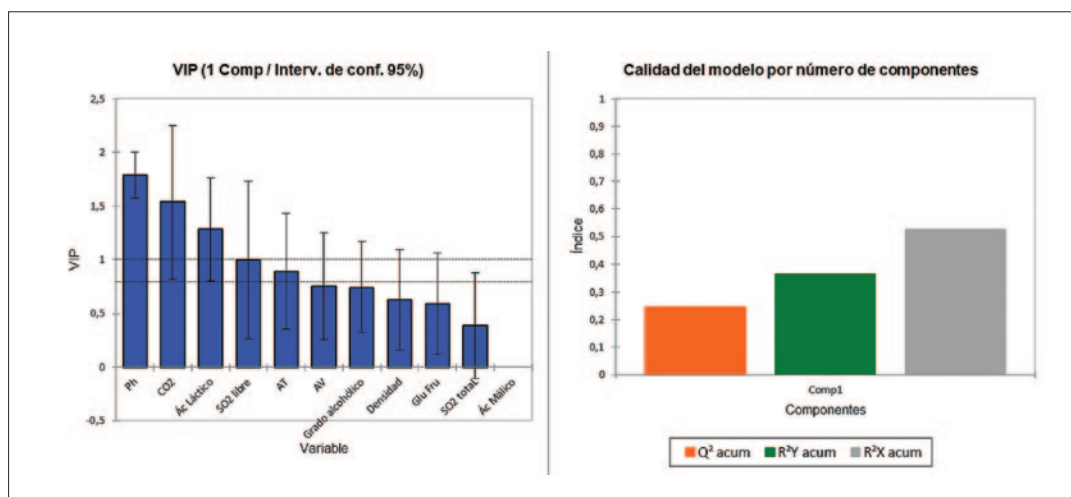


Figura 4. Gráfico VIPs en vinos tintos para levaduras (izquierda) y Gráfico de calidad del modelo predictivo (derecha).

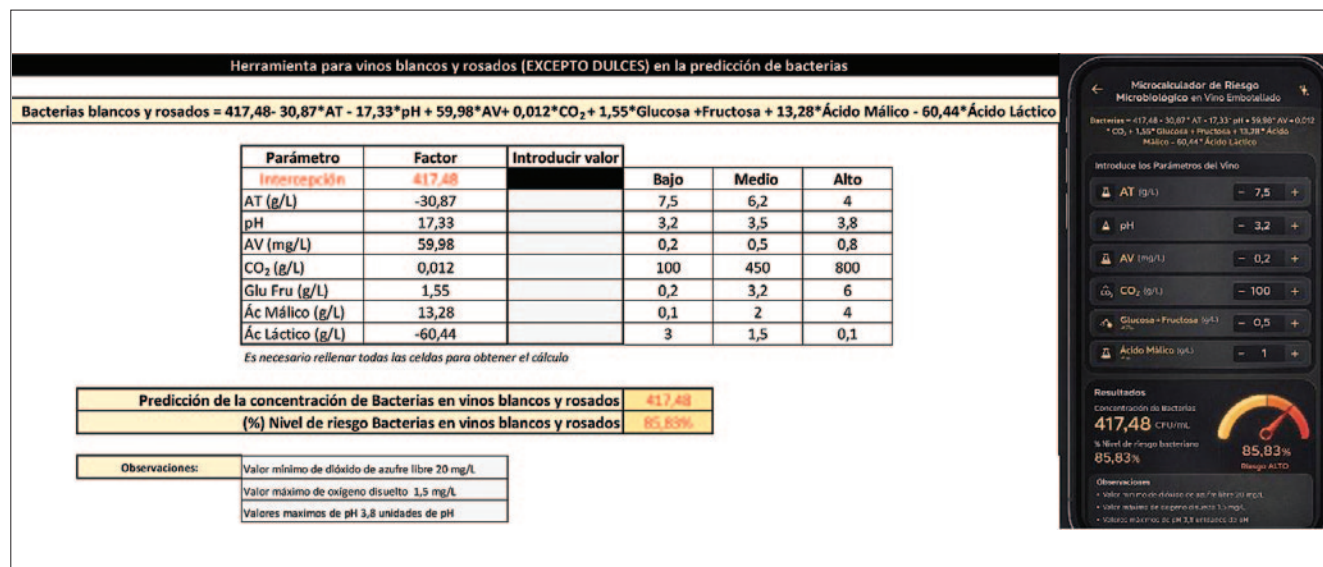


Tabla 9. Recreación a desarrollar con IA.

lado para vinos blancos y rosados respecto al riesgo de contaminantes de origen bacteriano. A modo ilustrativo, se incorpora una recreación de futuro a desarrollar con IA a nivel de aplicaciones informatizadas por diseñar (Tabla 9).

## CONCLUSIONES

1. Los resultados obtenidos demuestran que es posible modelizar de forma eficaz la población de microorganismos contaminantes en vinos embotellados a partir de su composición fisicoquímica, especialmente en el caso de vinos blancos y rosados, donde los modelos PLS alcanzan niveles explicativos satisfactorios. Parámetros como el pH, la acidez volátil, los azúcares residuales, el dióxido de carbono y los ácidos orgánicos se confirman como factores determinantes en la estabilidad microbiológica tras el embotellado.
2. Asimismo, se constata que la modelización en vinos tintos requiere una ampliación de la base de datos analítica para mejorar la robustez predictiva, lo que abre la puerta a futuras investigaciones con mayores volúmenes de información y datos analíticos contrastados.
3. La conversión de estos modelos en ecuaciones matemáticas operativas permite su implementación directa en herramientas digitales de predicción, facilitando una evaluación objetiva del riesgo microbiológico sin necesidad de esperar a la aparición de desviaciones sensoriales o crecimientos detectables en controles tardíos.

4. El desarrollo de la microcalculadora predictiva de riesgo microbiológico representa un avance significativo hacia una gestión preventiva de la calidad del vino embotellado, anticipando problemas microbiológicos antes de su comercialización, optimizando el uso de sulfuroso, las microfiltraciones y los tratamientos de acondicionado de las instalaciones de embotellado. Reduciendo pérdidas económicas por devoluciones o inestabilidades de vino en el mercado. La integración de estos modelos en plataformas digitales, aplicaciones móviles o sistemas de inteligencia artificial permitirá construir sistemas de decisión automatizados, consolidando un modelo de bodega inteligente alineado con los principios de la Industria 4.0. En definitiva, este trabajo establece las bases científicas para una nueva generación de herramientas predictivas en enología, donde la microbiología deja de ser reactiva para convertirse en un elemento de control preventivo, cuantitativo y digitalizado.

## AGRADECIMIENTOS

A la Universidad de Valencia por liderar el proyecto PERTE, al personal de Enolab, adscrito al Instituto de Biotecnología y Biomedicina (BIOTECMED). Un agradecimiento especial a los ocho enólogos que se unieron al proyecto GRAPERTE y aportaron sus vinos: Bodegas Bilbaínas S.A., Bodegas Martín Códax S.A.U., Bodegas Montecillo S.A.U., Bodegas Terras Gauda S.A., Bodegas y Viñedos Valtravieso S.L., Comenge Bodegas y Viñedos S.A., Grandes Vinos y Viñedos S.A. y Viña Costeira S.C.G.

Antonio Palacios, Ixone Borinaga, Sergi Ferrer y Elvira Zaldivar

## BIBLIOGRAFÍA

- Baranyi, J. (1995). Mathematics of predictive food microbiology. *International Journal of Food Microbiology*, 26 (2), 159–171.
- Fahimi, N., et al. (2014). A mathematical model of the link between growth and L-malic acid consumption for five strains of *Oenococcus oeni*. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 30, 2307–2316.
- Ross, T. & McMeekin, T. A. (1994). Predictive microbiology. *International Journal of Food Microbiology*, 24 (3), 295–309.
- Sturm, M. E., Arroyo-López, F. N., Garrido-Fernández, A., Querol, A., Mercado, L. A., Ramírez, M. L., & Combina, M. (2014). Probabilistic model for the spoilage wine yeast *Dekkera* (*Brettanomyces*) *bruxellensis* as a function of pH, ethanol and free SO<sub>2</sub> using time as a dummy variable. *International Journal of Food Microbiology*, 170, 83–90.
- aboadá-Rodríguez, A., Belisario-Sánchez, Y. Y., Cava-Roda, R., Cano, J. A., López-Gómez, A., & Marín-Iniesta, F. (2013). Optimisation of preservatives for dealcoholised red wine using a survival model for spoilage yeasts. *International Journal of Food Science and Technology*, 48 (4), 707–714.
- Tenenhaus, M., Vinzi, V. E., Chatelin, Y. M., & Lauro, C. (2005). PLS Path Modeling. *Computational Statistics & Data Analysis*, 48 (1), 159–205.



Fotografía: Angelo Villalobos (Pixabay).

Polígono La Portalada - C/ Portalada 3B Parcela 35 - 26006 Logroño (La Rioja) Tel.: 941 241613 - E-mail: [informacion@corinox.com](mailto:informacion@corinox.com)

**CORINOX**  
COMERCIAL RIOJANA DE INOXIDABLE  
[www.corinox.com](http://www.corinox.com)

(Chapa, tubería, perfiles, racores, válvulas, mangueras, depósitos siemprellenos, prensas, filtros...)

