

Arquitectura ANFIS del proceso de fermentación de aceitunas negras naturales: entrenamiento a escala piloto y validación a escala industrial

Dolores M. E. ALVAREZ ⁽¹⁾, Luis KLIGER ⁽¹⁾, Mario R. MODESTI ⁽²⁾

⁽¹⁾ Centro de Investigación y Tecnología Química (CITeQ – UTN -CONICET), Maestro Marcelo López esq. Cruz Roja Argentina, Ciudad Universitaria, Córdoba, Argentina

⁽²⁾ Centro de Investigación en Informática para la Ingeniería (CIII), Maestro Marcelo López esq. Cruz Roja Argentina, Ciudad Universitaria, Córdoba, Argentina

E-mail de contacto: dalvarez@tecnicatura.frc.utn.edu.ar

Resumen

En el proceso de obtención de aceitunas negras naturales, las condiciones inciden sobre la calidad del fruto fermentado y éstas difieren a distintas escalas. El objetivo del trabajo es generar modelos matemáticos que caractericen las propiedades de las aceitunas negras naturales obtenidas a gran escala, a partir de datos del proceso a escala piloto. Se crearon arquitecturas ANFIS con parámetros físico-químicos como entradas, y de textura y color como salidas. Dichas estructuras se entrenaron con datos obtenidos a escala piloto y se validaron con los industriales. Las redes que demostraron mejor desempeño poseen dos funciones de membresía por entrada incorporada, en forma de campana generalizada y una de salida. Las estructuras logradas demostraron habilidad para predecir la evolución del proceso a escala industrial luego de los primeros días de fermentación. Para incrementar su aptitud, sería conveniente probar otros modelos para el tratamiento de datos, tales como las redes neuronales artificiales.

Palabras Claves: Aceitunas negras naturales; ANFIS; Escala piloto; Escala industrial

Abstract

In the fermentation of natural black olives, process conditions affect the quality of the product and they differ at different scales. The aim of this work is create mathematical models to characterize the properties of natural black olives obtained at large-scale process, from pilot scale one. ANFIS architectures with physicochemical parameters as inputs, and color and texture as outputs were created. Such structures were trained with data obtained at pilot scale and validated with those from industry. Networks showed better performance have two membership functions for input incorporated in the form of generalized bell, and a linear membership function as output. The structures has demonstrated ability to predict the evolution of the process at industrial scale in the first period of fermentation. To increase their ability, it would be useful to try other models, such as artificial neural networks.

Keywords: Natural black olives, ANFIS, Pilot scale, Industrial Scale

1. Introducción y Objetivos

1.1. Consideraciones Generales

A nivel nacional, el sector olivícola ha evolucionado notoriamente en las últimas dos décadas como consecuencia de la aplicación de la ley de diferimientos impositivos (Ley Nacional 21.021) y el mejoramiento en técnicas de producción (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria [INTA], 2012; Federación Olivícola Argentina, 2011). A su vez, el sector olivícola fue seleccionado como prioritario dentro de los agro-alimentos, en base a las posibles demandas y necesidades futuras del sistema productivo (Secretaría de Planeamiento y Políticas, Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva, 2011). En el noroeste cordobés existe una extensa región dedicada al cultivo del olivo, por lo que la producción de aceitunas y aceite constituye una actividad socio-económica relevante. Para la elaboración de aceitunas negras naturales, los frutos de olivo son incorporados a la salmuera de fermentación, la que evoluciona por acción de los microorganismos presentes. La textura y color de los frutos son considerados parámetros de calidad del producto.

A la hora de incorporar nuevas tecnologías, las industrias del sector generalmente adoptan las provenientes de países europeos, principalmente España. Dicha adaptación se constituye en necesaria y se lleva a cabo en forma gradual a distintas escalas.

En el caso de las aceitunas negras naturales, las condiciones del proceso pueden incidir sobre la calidad del fruto fermentado, Ünal y Nergiz (2003) y son diferentes si se verifican en la fase piloto o industrial. Tanto las condiciones de operación y entorno, como las características del equipamiento y aditivos empleados en la fermentación de aceitunas a escala piloto, son diferentes a las que se verifican en el proceso a gran escala (Tabla 1). Asimismo, es sabido que la implementación de tecnología a escala industrial, desde la etapa piloto, requiere de tiempo y es costosa.

Tabla 1. Condiciones de fermentación a escala piloto e industrial

Condiciones	Escalas	
	Piloto	Industrial
Temperatura	Ambiente	Ambiente
Fermentadores	PVC (primer uso) - 25 L	Hormigón con interior revestido con pintura epoxi (uso permanente) - 5000 L
Entorno	Fermentadores cubiertos - Ambiente cerrado	Fermentadores abiertos - Intemperie
Aditivos	Grado técnico	Grado industrial

En este sentido, en las industrias elaboradoras de aceitunas de mesa puede ser de gran interés disponer de un modelo matemático que contribuya a anticipar las características del producto a escala industrial, a partir de ensayos realizados a escala piloto.

Por otro lado, la lógica difusa es una lógica multivalorada capaz de capturar informaciones vagas, descritas por lo general en un lenguaje natural que permite una representación simple de los procesos en términos de reglas IF –THEN, Kiralakis y Tsourveloudis (2005).

El Sistema de inferencias difuso basado en redes adaptativas (Adaptive Network-based Fuzzy Inference System-ANFIS) es la conjunción, y posee las ventajas, tanto de las redes neuronales como de la lógica difusa, Buragohain y Mahanta (2008); Arkhipov et al. (2008). Puede ser interpretada como una red neuronal con parámetros difusos, o como un sistema difuso con parámetros o funcionamiento distribuidos. Así, el método ANFIS es ideal para la interpretación de sistemas no lineales de entrada y salida, Arkhipov et al. (2008); Cheng et al. (2002; Naderloo et al. (2012).

En este contexto, el objetivo del trabajo es generar y validar modelos matemáticos, por medio de arquitectura ANFIS, que permitan caracterizar las propiedades de las aceitunas negras naturales obtenidas a escala industrial, a partir de datos del proceso a escala piloto.

2. Metodología y Materiales

Se desarrolló una arquitectura ANFIS para caracterizar las propiedades de las aceitunas negras naturales obtenidas a escala industrial, a partir de datos del proceso a escala piloto.

2.1. Fermentación de aceitunas negras naturales a escala piloto e industrial

El estudio se llevó a cabo con frutos de olivo de la variedad Manzanilla, provenientes de Cruz del Eje, Córdoba. En las Figuras 1 y 2 se observan los reactores empleados a escala piloto e industrial.

Para el ensayo a escala piloto se empleó un depósito de policloruro de Vinilo (PVC) de 25 litros de capacidad, mantenido a temperatura ambiente durante la experiencia. Se incorporó aire mediante una columna de PVC de 0,7 cm de diámetro y 45 cm de longitud soportada por otra de vidrio. En la parte superior de la columna se acopló una válvula esférica para la regulación del caudal de aire (Figura 1). La aireación se realizó durante 8 h diarias.

En la Figura 2 se muestra el fermentador empleado a escala industrial. En este caso, el aireador empleado se diseñó de acuerdo a Garrido Fernández et al. (1987) y de Castro et al. (2007) con escasas modificaciones, teniendo en cuenta las dimensiones de los fermentadores (5000 litros de capacidad). Al igual que en la experiencia piloto, la aireación se realizó durante 8 horas diarias con un caudal de 0,25 l/h/litros de salmuera y la relación kg de aceitunas/litros de salmuera fue de 0,6.

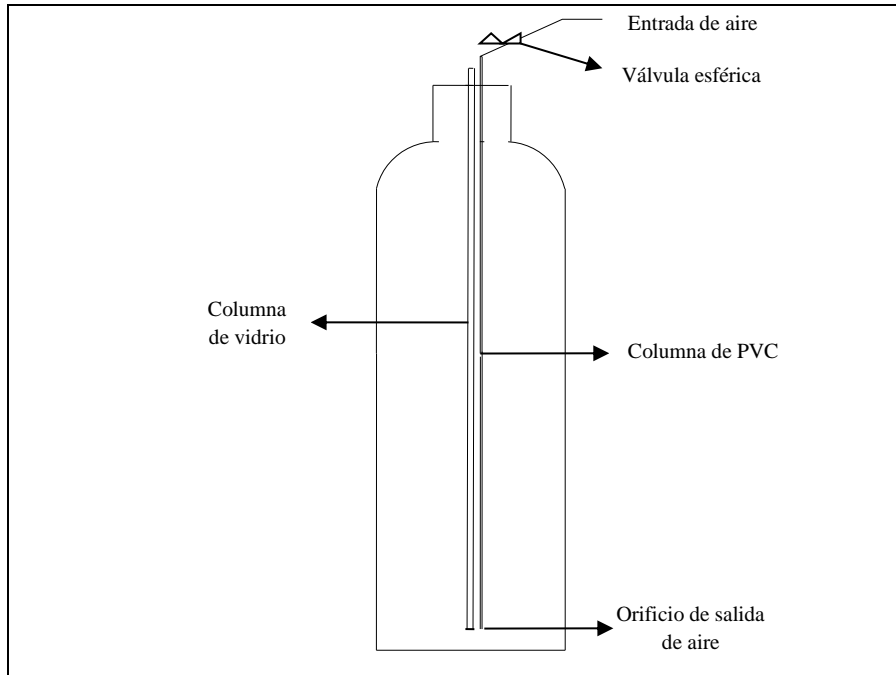


Figura 1. Fermentador empleado a escala piloto

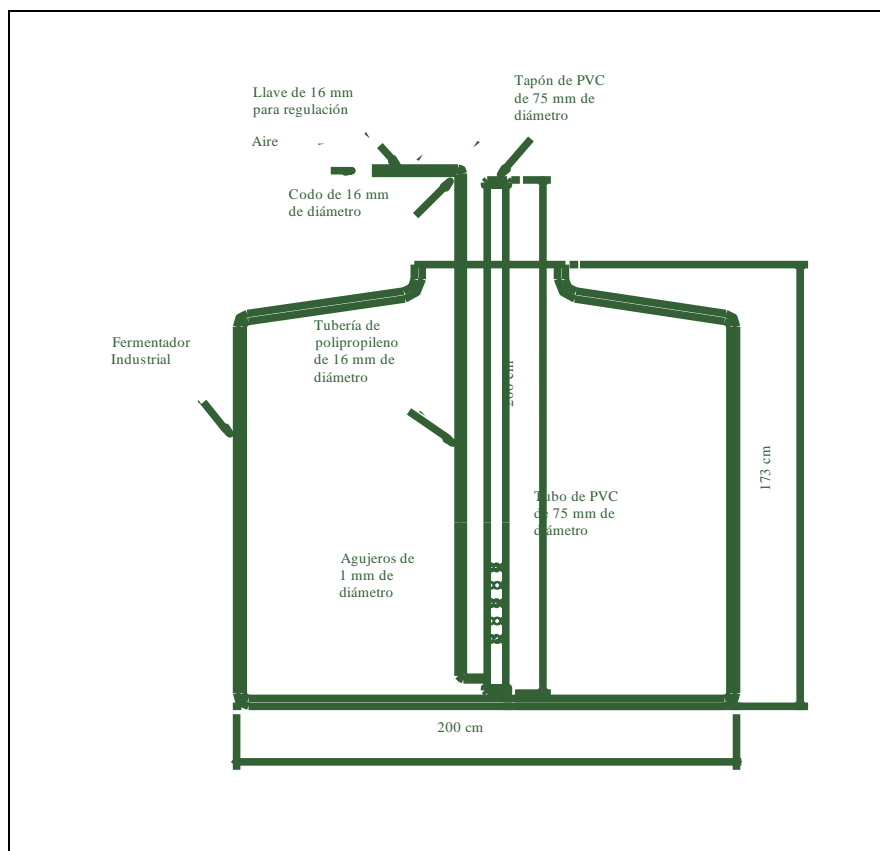


Figura 2. Fermentador empleado a escala industrial.

En ambas escalas, se realizaron las siguientes determinaciones a lo largo de la fermentación: porcentajes de acidez libre, azúcares reductores (método de Lane Eynon) y

concentración de CO₂ determinada de acuerdo a Fernández Diez et al., (1985). El color superficial del fruto se midió en un espectrofotómetro Minolta Chroma 508d. El parámetro registrado fue porcentaje de reflectancia a 700 nm. La dureza de las aceitunas se cuantificó mediante una prensa a la que se acopló una celda de compresión cizallamiento. El valor obtenido para cada muestra analizada se calculó como la media de 10 determinaciones y se expresó en kg fuerza/100 g de fruto.

Las determinaciones se realizaron por triplicado y los resultados se analizaron estadísticamente mediante análisis de Varianza (ANOVA) con un nivel de significancia de 0,05. Para los ensayos físico-químicos se tomaron muestras de salmuera a intervalos regulares de tiempo, mientras que las de aceitunas se efectuaron al inicio y final del proceso.

2.2. Entrenamiento y validación del Sistema ANFIS

Para el entrenamiento de la red se consideró, como variables de entrada, la matriz de datos compuesta por los parámetros de proceso a escala piloto (84x4 elementos): porcentajes de acidez libre, azúcares reductores y concentración de CO₂. A su vez, se consideraron las temperaturas ambiente media de la ciudad de Córdoba. Como variables de salida se tomó el color superficial (% de reflectancia a 700 nm) y la textura (kg /100 g de fruto) de los frutos, interpolados con el mismo criterio aplicado para las entradas (84x2 elementos).

Para la validación del modelo, se tomaron los datos análogos de entrada y salida del proceso, a escala industrial.

El estudio se llevó a cabo mediante el programa Matlab® (Demuth y Beale, 2012). En la Tabla 2 se observa la información relevada experimentalmente a escala piloto empleada para desarrollar el sistema ANFIS, mientras que en la Tabla 3, se muestran los datos obtenidos a escala industrial, con los cuales éste se validó.

Tabla 2. Datos físico-químicos obtenidos a escala piloto, utilizados para el entrenamiento de la arquitectura ANFIS

Días	Acidez (%)	Az. Red. (%)	CO ₂ (%)	T Prom. (°C)	Textura (kg/100g)	Color (% ref.)
0	0,125	0,1	30,5	17,9	111,39	63,77
7	0,27	0,1	103	21,15		
12	0,665	0,15	110	22,2		
21	0,84	0,13	75	14,5		
28	1,005	0,23	62	16,05		
35	0,93	0,13	55	15,55		
42	0,82	0,08	42	17,45		
49	0,825	0,1	43,5	23,6		
56	0,825	0,05	24,5	19,92		
63	0,81	0,04	24	16,25		
70	0,77	0,05	11,5	17,05		
77	0,82	0,05	17	8,3		
84	0,78	0,02	11	11,7	100,67	29,37

Tabla 3. Datos físico-químicos obtenidos a escala industrial, empleados en la validación de la arquitectura ANFIS

Días	Acidez (%)	Az. Red. (%)	CO ₂ (%)	T Prom. (°C)	Textura (kg/100g)	Color (% ref.)
0	0,11	0,2	23,5	20.9	111,39	63,77
7	0,563	0,23	93	20.95		
12	0,582	0,1	101,5	23.3		
21	0,892	0,2	76,5	16.45		
28	1,075	0,15	43	16.45		
35	1,035	0,1	42,5	15.4		
42	1,18	0,1	43,5	16.25		
49	1,25	0,05	29	20.4		
56	1,02	0,04	27	18.2		
63	0,855	0,05	24	16.4		
70	0,865	0,05	22	17,05		
77	0,88	0,10	20	6,2		
84	0,9	0,04	18	11.8	97,67	36,79

Para la construcción de la red se transformaron previamente los datos de entrada y salida, de forma tal que fueran reconocibles para el sistema. El entrenamiento propiamente dicho se llevó a cabo mediante sucesivas iteraciones, a través de la regla de aprendizaje híbrida, la cual combina el método gradiente descendiente con el estimador de mínimos cuadrados. Para la evaluación de los resultados se consideró como indicador el menor error cuadrático medio en función de las pruebas realizadas.

3. Resultados y Discusión

3.1. Desarrollo de la arquitectura ANFIS con datos obtenidos a escala piloto

Debido que la tabla posee puntos aislados de información, se procede a la creación de una función que reproduzca esta variable, simulando una medición diaria durante el periodo de experimentación, para cada una de las variables de entrada. El método utilizado es por medio de interpolación por Splines. Esto permite disponer del perfil relativo a la dinámica de las variables intervinientes.

En las Figuras 3 y 4 se pueden observar las variables de entrada y salida interpoladas para los 84 días de fermentación.

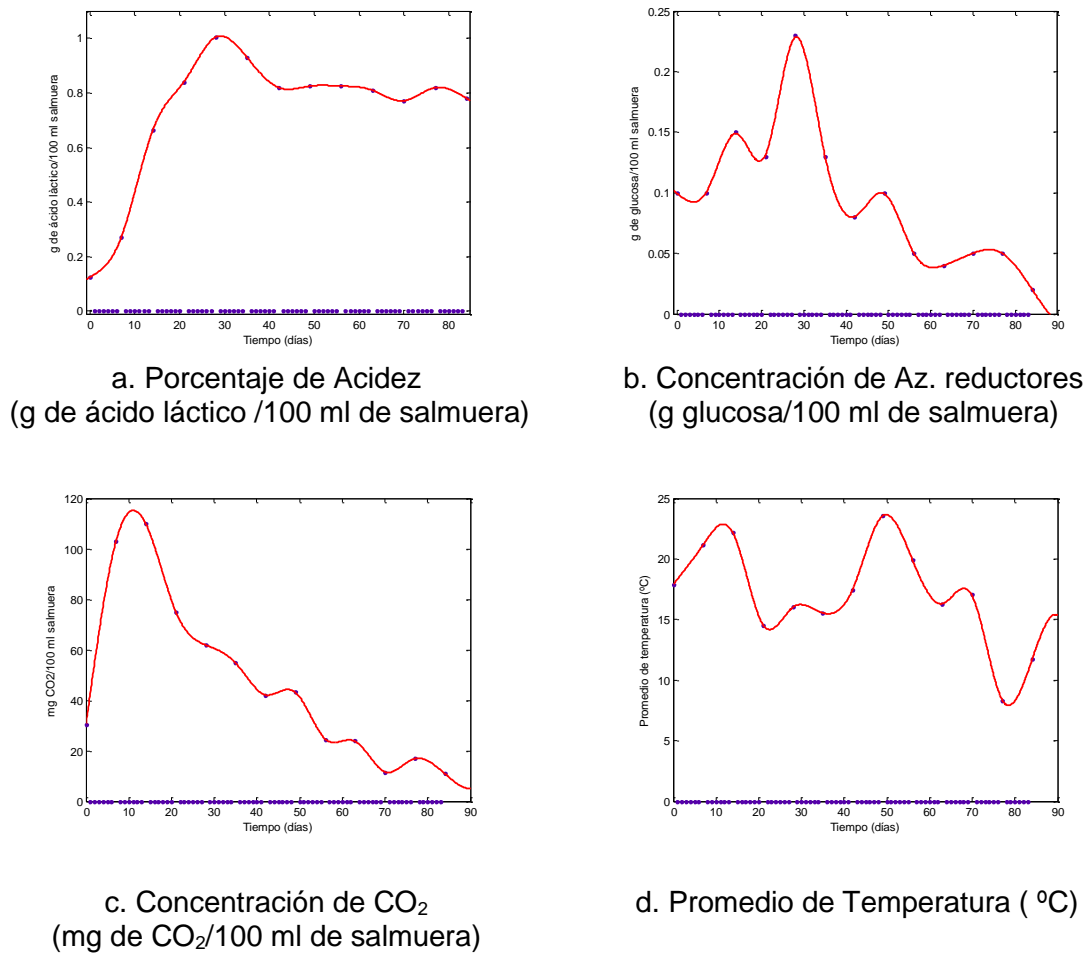
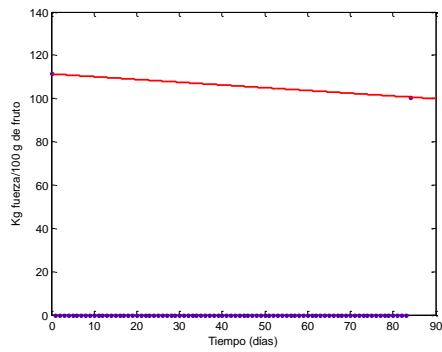
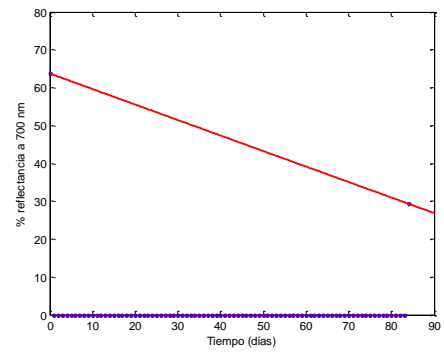


Figura 3. Interpolación correspondiente a las variables de entrada del modelo ANFIS durante los 84 días de fermentación



a. Textura
(kg/100 g de fruto)



b. Color.
(% de reflectancia a 700 nm)

Figura 4. Interpolación correspondiente a las variables de salida del modelo ANFIS

La arquitectura ANFIS se desarrolló teniendo en cuenta las salidas inherentes al color y a la textura en forma independiente. En la Figura 5 se observa la estructura de la red desarrollada. Tanto la arquitectura con salida “textura” como “color”, poseen 16 reglas del tipo AND como lo proponen los vectores de conformación.

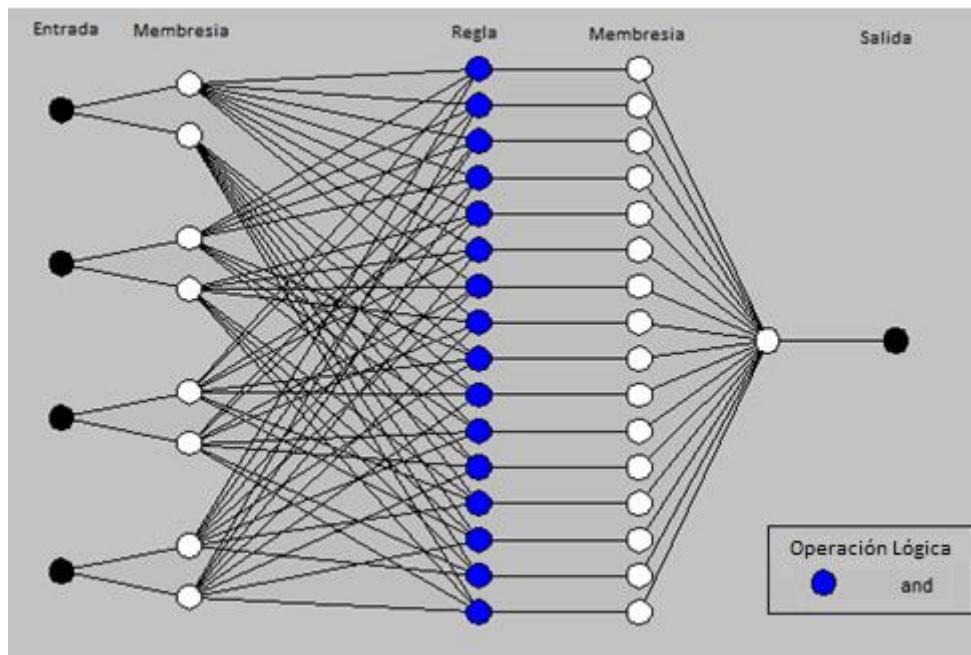


Figura 5. Estructura general de las arquitecturas ANFIS desarrolladas

Las redes que demostraron mejor desempeño poseen dos funciones de membresía por entrada incorporada, en forma de campana generalizada y una función de membresía lineal de salida como se muestra en la Figura 6.

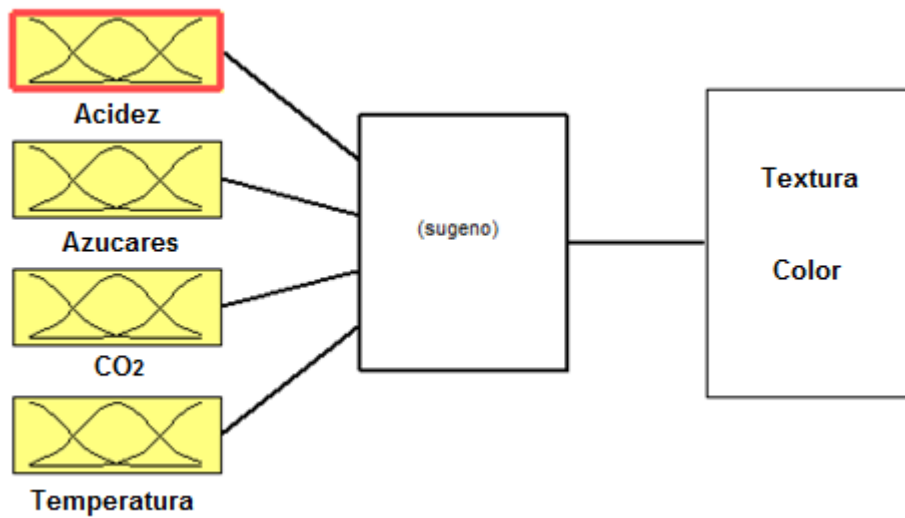


Figura 6. Variables de Entrada / Salida Correspondientes al modelo ANFIS con mejor desempeño durante el entrenamiento.

El entrenamiento del sistema ANFIS obtuvo los parámetros para sus respectivas Funciones de Membresía, en la Figura 7.

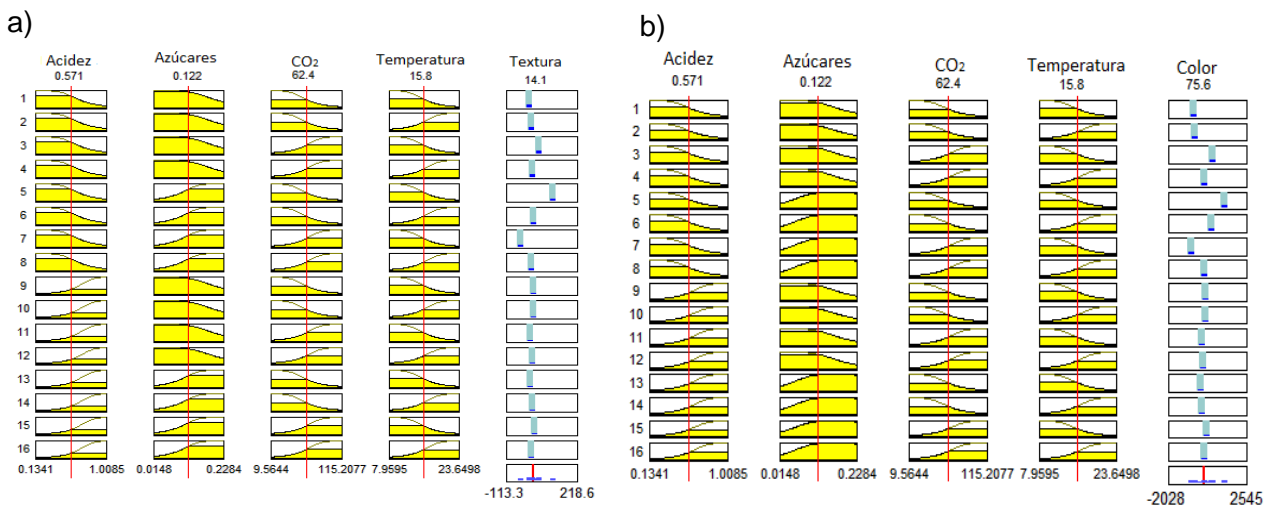


Figura 7. Parametrizaciones de la arquitectura ANFIS entrenada para a) textura y b) color.

En la Figura 8 se observa la aproximación obtenida para el parámetro de textura y color luego del entrenamiento de la estructura ANFIS, a escala piloto. En ambos casos se logró la convergencia luego de 20 iteraciones, obteniéndose un error de 0.0010129 para el caso de la textura y de 0.0080887 para el color.

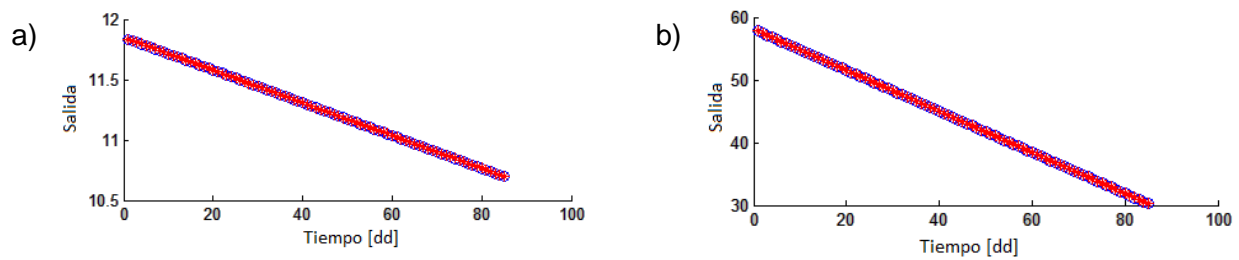


Figura 8. Aproximación obtenida para el parámetro de textura durante el entrenamiento de la estructura ANFIS, a escala piloto para a) la textura y b) el color.

3.1. Validación del Sistema ANFIS con datos obtenidos a escala industrial

En la Figura 9 se observa el resultado de evaluar las estructuras entrenadas con datos obtenidos a escala piloto, con los de escala industrial, para la textura (a) y el color (b) como salidas de las respectivas arquitecturas ANFIS. La curva en azul corresponde al resultado experimental, habida cuenta que se dispone de datos de inicio y final de ambos parámetros, y la interpolación lineal es al sólo efecto gráfico. En rojo el resultado del sistema ANFIS cuando se lo excita con datos obtenidos a escala industrial

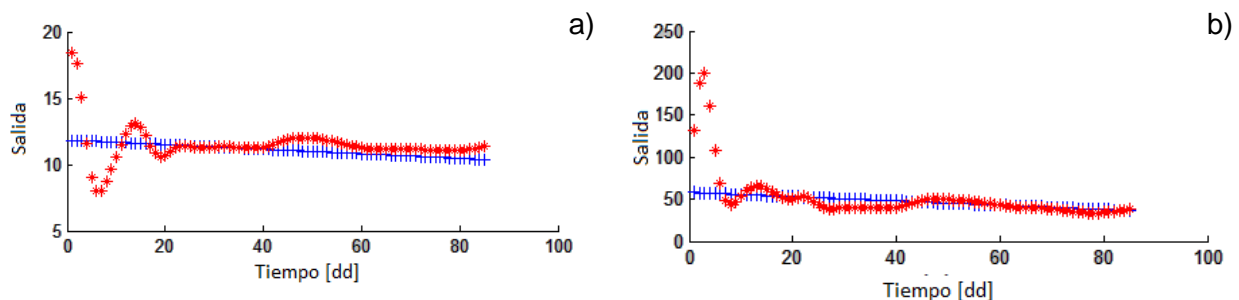


Figura 9. Aproximación lograda al validar la arquitectura ANFIS obtenida a escala piloto, con datos de la escala industrial de a) textura y b) color.

Tal como se observa, las estructuras creadas con datos provenientes de la escala piloto, logran explicar de manera satisfactoria, la relación existente entre los parámetros de entrada y salida empleados para la validación, con posterioridad a los primeros veinte días de fermentación. Esta discordancia podría ser consecuencia de las diferencias existentes entre escalas.

Al analizar los parámetros físico-químicos, se observa que la evolución del porcentaje de acidez y CO_2 fue similar en ambas escalas, a lo largo de los 85 días.

Los azúcares reductores y la temperatura, en tanto, no evidenciaron el mismo comportamiento en ambas escalas, por lo que serían los responsables de la divergencia existente en el modelo, durante los primeros días. En este sentido es de destacar que las diferencias en las temperaturas promedio son consecuencia de la localización geográfica donde se llevaron a cabo las experiencias a escala piloto e industrial (Córdoba y Cruz del Eje). Los diferentes porcentajes de azúcares reductores observados a escalas piloto e industrial, en tanto, podrían deberse a la heterogeneidad de las condiciones de reacción en fermentadores de grandes dimensiones, Schügerl et al. (2000); Gogate et al. (2000), lo que, a su vez, podría ser consecuencia de la

insuficiente transferencia de oxígeno y distribución de componentes, Zhao et al. (1991); Galindo y Nienow (1992); Galindo y Nienow (1993); Flores et al. (1994).

4. Conclusiones

Se han desarrollado estructuras ANFIS que caracterizan la relación multifactorial entre las variables de fermentación con los parámetros de calidad de textura y color de las aceitunas negras naturales del cv. Manzanilla, a escala piloto. Para esto, se probaron diferentes algoritmos y número de iteraciones, a los fines de definir las que mejores desempeños mostraran, en cuanto a capacidad de generalización. Posteriormente, estas arquitecturas se validaron con datos provenientes de la escala industrial.

Las estructuras logradas demostraron habilidad para predecir la evolución del proceso a escala industrial, a partir de información propia de la escala piloto. En este sentido, se puede afirmar que el Sistema de inferencias difuso basado en redes adaptativas –ANFIS- se constituye en una herramienta de interés a la hora de anticipar, tanto los parámetros relativos a fermentación, como así también los atributos de textura y color de las aceitunas negras naturales del cv. estudiado.

A fin de continuar con el entrenamiento e incrementar la aptitud de las arquitecturas creadas, sobre todo en las instancias iniciales del proceso, sería conveniente probar otros modelos para el tratamiento de los datos, tales como redes neuronales artificiales. Asimismo, sería de utilidad el diseño redes ANFIS referidas a la fermentación de otros cultivares de aceitunas empleadas a nivel regional.

Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento a la Secretaría de Ciencia, Tecnología y Posgrado, Rectorado, Universidad Tecnológica Nacional y la Empresa Cuenca del Sol S.A.

Referencias

- Arkhipov, M., Krueger, E., Kurtener, D. (2008). Evaluation of ecological conditions using bioindicators, application of fuzzy modeling. *Lecture Notes in Computer Science*, 5072, 491–500.
- Cheng, C., Cheng, C., Lee, E. (2002). Neuro-fuzzy and genetic algorithm in multiple response optimization. *Computers and Mathematics with Applications*, 44, 1503–1514.
- Cogate, P., Beenackers, A., Pandit A. (2000). Multiple-impeller systems with a special emphasis on bioreactors: a critical review. *Biochemical Engineering Journal*, 6, 109-143.
- de Castro, A., García, P., Romero, C., Brenes, M., Garrido, A. (2007). Industrial implementation of black ripe olive storage under acid conditions. *Journal of Food Engineering*, 80, 1206-1212.
- Demuth, H., Beale, M. (2012). *Neural Network Toolbox for use with MATLAB. User's Guide Version 8.0 (Revision R2012b)*.
- Federación Olivícola Argentina. (2011). Desarrollo, perspectivas y potencial de la industria olivícola local. *Olivae*, 116, 36-42.

- Fernández Díez, M., de Castro y Ramos, R., Garrido Fernández, A., González Cancho, F., González Pellisó, F., Nosti Vega, M., y col. (1985). *Biología de las aceitunas de mesa*. Instituto de la Grasa y sus Derivados. Sevilla: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC).
- Flores, F., Torres, L., Galindo, E. (1994). Effect of the dissolved oxygen tension during cultivation of *X. campestris* on the production and quality of xanthan gum. *Journal of Biotechnology*, 34, 165-173.
- Galindo, E., Nienow, A. (1992). Mixing of highly viscous simulated xanthan fermentation broths with the lightning A315 impeller. *Biotechnology Progress*, 8, 233-239.
- Galindo E., Nienow A. (1993). Performance of the Scaba 6SRGT agitator in simulated xanthan gum broths. *Chemical Engineering and Technology*, 16, 102-108.
- Garrido, A., Durán, M., García, P. (1987). Fermentación en medio aeróbico de aceitunas negras al natural en salmuera. Efecto de algunas variables sobre la formación de "alambrado". *Grasas y Aceites*, 38, 27-32.
- Hurtado A., Reguant C., Bordons A., Rozès N. (2012). Lactic acid bacteria from fermented table olives. *Food Microbiology*, 31, 1-8.
- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Ministerio de agricultura, ganadería y pesca. Presidencia de la Nación Argentina. (2012). Web: http://intainforma.inta.gov.ar/wp-content/uploads/2012/02/Inta_Informa_123.pdf
- Kiralakis, L., Tsourveloudis, N. (2005) Modeling and optimization of olive stone drying process. *International conference on dynamical systems and control* (pags. 7-9). Venice: WSEAS.
- Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva. Libro prospectiva agroalimentario. (2011). Web: http://www.mincyt.gov.ar/multimedia/archivo/archivos/Libro_Prospectiva_Agroalimentario_2020.pdf.
- Naderloo, L., Alimardani, R., Omid, M., Sarmadian, F., Javadikia, P., Torabi, M., Alimardani, F. (2012). Application of ANFIS to predict crop yield based on different energy inputs. *Measurement*, 45, 1406–1413.
- Nagy, Z. (2007). Model based control of a yeast fermentation bioreactor using optimally designed artificial neural networks. *Chemical Engineering Journal*, 127, 95-109.
- Schugerl, K., Bellgardt, K. (2000). *Bioreaction Engineering, Modeling and Control*. Ed. Springer-Verlag, Berlín, Germany.
- Searles P., Agüero Alcaras M., Rousseaux M. (2011). El consumo del agua por el cultivo de olivo (*Olea europaea* L.) en el noroeste de Argentina: una comparación con la Cuenca Mediterránea. *Ecología Austral, Asociación Argentina de Ecología*, 21, 15-28.
- Ünal K., Nergiz C. (2003). The effect of table olive preparing methods and storage on the composition and nutritive value of olives. *Grasas y Aceites*, 54, 71-76.
- Zhao, X., Nienow, A., Chatwin, S., Kent, C., Galindo, E. (1991). Improving xanthan fermentation performance by changing agitators. En *Proceedings of the 7 th European Conference on Mixing*, Brugge, Belgium. 277 - 283.