

**MONITORING SYSTEM TO DETECT THE MATURITY OF AGRO-INDUSTRIAL
PRODUCTS THROUGH OF AN ELECTRONIC NOSE****SISTEMA DE MONITOREO PARA DETECTAR LA MADUREZ DE PRODUCTOS
AGRO-INDUSTRIALES A TRAVES DE UN SISTEMA DE OLFATO ELECTRONICO****PhD. Cristhian Manuel Durán Acevedo, Ing. Daniel Ramón Baldovino Mercado****Universidad de Pamplona**

Ciudadela Universitaria. Pamplona, Norte de Santander, Colombia.

Tel: 57-7-5685303, Fax: 57-7-5685303 Ext. 156

E-mail: {cmduran, dbaldovino}@unipamplona.edu.co

Abstract: A low-cost system has been designed to detect different types of volatiles. The instrument was originally designed and built to work as a system of electronic nose to detect volatile compounds in agro-industrial products, such as the detection of the degree of maturity “Mores” and “Potatoes” in different times of concentration. The system is composed basically in a concentration chamber, a chamber sensor type gas sensors TGS and FIS, and a data acquisition system provided by a PIC 16F877 along with a complete software suite for pre-processing and Patterns recognition such as PCA and Artificial Neural Networks for proper classification of the samples.

Resumen: Un sistema de bajo coste ha sido diseñado para detectar diferentes tipos de volátiles. El instrumento inicialmente ha sido diseñado y construido para trabajar como un sistema de olfato electrónico para la detección de compuestos volátiles en productos agroindustriales; como es el caso de la detección del grado de madurez de Moras tipo “castilla” y Patatas tipo “pastusa” en diferentes tiempos de concentración. El equipo básicamente lo componen una cámara de concentración, una matriz de 6 sensores de gases de tipo TGS y FIS, y un sistema de adquisición de datos provisto por un PIC 16F877 junto con un completo software para el pre-procesado de datos y reconocimiento de patrones, tales como PCA y Redes Neuronales Artificiales para una correcta clasificación de las muestras.

Keywords: Ga sensor, Pattern Recognition, PCA, Neural Networks, Quality Control.

1. INTRODUCCION

Los sistemas de olfato electrónico, popularmente conocidos como “narices electrónicas”, tienen una historia muy reciente. Aunque sus orígenes se remontan a los primeros sistemas ideados en los sesenta, el término “nariz electrónica” y los primeros sistemas inteligentes de olfato electrónico

no aparecieron hasta la segunda mitad de la década de los ochenta. Algunos de estos primeros sistemas fueron publicados por Julian Gardner (de la Universidad de Warwick) a partir de 1988. Sin embargo Persaud & Dodd fueron los primeros en demostrar que una matriz de sensores permiten discriminar entre distintos olores. Los primeros sistemas de olfato electrónicos comerciales

aparecieron en los años 90, destacando los conocidos sistemas de AlphaMOS (1993), Neotronics y Aromascan (1994). Otros modelos como la Cyranose 320 y La Znose (2000), fueron introducidas comercialmente para fines diferentes. Algunos de estos equipos han sido desarrollados específicamente para una aplicación determinada.

Para dar un concepto de un Sistema de Olfato Electrónico (SDOE), la definición más comúnmente aceptada es la que lo describe como “un instrumento que comprende una matriz de sensores químicos con sensibilidades solapadas y un avanzado sistema de reconocimiento de patrones, capaz de reconocer aromas simples o complejos”.

De una manera coloquial se podría afirmar que a este tipo de instrumentos se les denomina de olfato electrónico por dos motivos:

- Porque su configuración y funcionamiento emulan al del sistema de olfato humano.
- Porque pretende realizar funciones tradicionalmente atribuidas al sistema de olfato biológico.

Una de las formas de definir a este tipo de sistemas es diferenciarlos de la instrumentación química tradicional ya que la filosofía de análisis es la que diferencia a ambos tipos de instrumentos. Mientras que en instrumentos tradicionales, como en un cromatógrafo de gases, se caracteriza una muestra identificando y cuantificando cada componente por separado, los sistemas de olfato electrónico valoran la muestra en su conjunto, sin preocuparse por los componentes individuales que conforman la mezcla gaseosa a caracterizar.

Bajo este concepto, la configuración genérica que responde funcionalmente a la definición anteriormente presentada comprende un sistema de muestreo, un sistema de medición provisto de sensores químicos y un sistema informático que controla el proceso de medición y permite aplicar técnicas de pre-procesado de datos y reconocimiento de patrones para la detección, identificación o cuantificación de cualquier compuesto volátil o aroma.

En la última década los SDOE se han utilizado de forma experimental en un buen número de aplicaciones, como la monitorización de la contaminación ambiental, las aplicaciones biomédicas o el control de calidad de los productos alimenticios.

Como se había mencionado anteriormente el instrumento de medición fue basado en un sistema de olfato electrónico, implementado para detectar muestras de productos agroalimentarios, en este caso: Moras y patatas en distintos grados de maduración.

Los siguientes son los componentes utilizados para el desarrollo del equipo:

- 1) Una cámara de muestreo
- 2) Un conjunto de 6 sensores de gases químicos comerciales para la detección de compuestos volátiles.
- 3) Un sistema de adquisición de datos
- 4) Una interface gráfica al usuario con técnicas de reconocimiento de patrones tales como el Análisis de Componentes Principales (PCA) y Redes Neuronales como la la Fuzzy Artmap) y la perceptrón Multicapa ó MLP.

2. MATERIALES

El sistema desarrollado está compuesto básicamente por los bloques funcionales que se muestran en la siguiente figura:

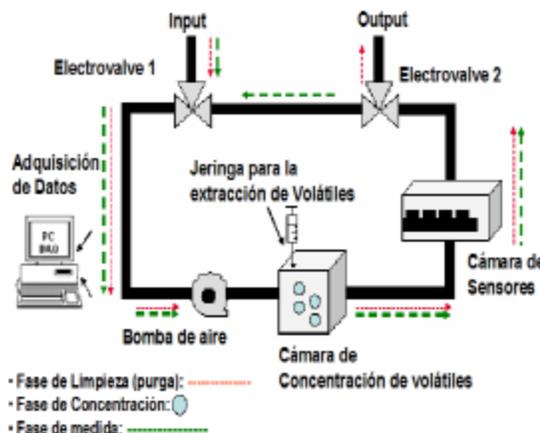


Fig. 1. Diagrama de Bloques del sistema multisensorial de olfato electrónico

A continuación se explica la función de cada parte del Sistema de Olfato Electrónico (SDOE) y sus principales características, así como datos del diseño e implementación del prototipo.

2.1. Cámara de Concentración de volátiles

La cámara de concentración fue construida en metacrilato el cual da forma a un recipiente hermético que permite introducir la muestra que se

desea analizar. La finalidad de la cámara es servir como medio para la acumulación de los volátiles emitidos por las muestras tanto sólidas y líquidas que se encuentran en su interior.

La cámara de concentración posee dos orificios, el de entrada y el de salida de aire que permiten transportar los volátiles hasta la cámara de sensores en la etapa posterior de medición.

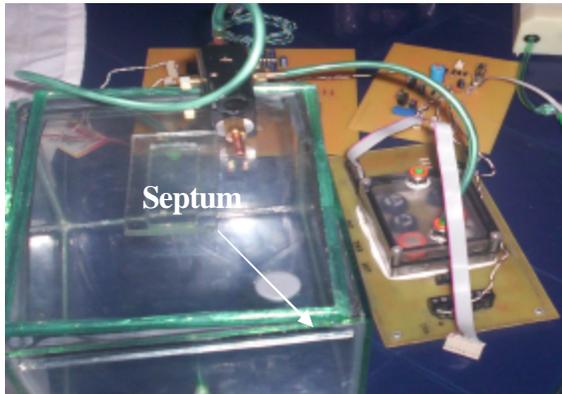


Fig. 2. Cámara de concentración
(Lado Izquierdo)

En las etapas de limpieza, concentración y medida las electro-válvulas conmutan en un momento dado, aislando de esta forma la ubicación de la muestra en su interior con la entrada de aire, lo cual se está concentrando gran cantidad de volátiles. Llegado un tiempo se crea una concentración de volátiles que posteriormente serán arrastrados por un flujo de aire a través de la activación de una bomba de aire de bajo costo, que los transporta hasta la cámara de sensores. La cámara tiene una cubierta que permite introducir gran variedad las muestras sólidas de pequeño y mediano tamaño, y un septum para el suministro de muestras líquidas. Las dimensiones de la cámara de concentración fueron las siguientes: Ancho: 15 cm, Alto: 15 cm y Largo 20 cm. La figura 2 muestra el diseño de la cámara de concentración (lado izquierdo) junto con la cámara de sensores.

Para el suministro de los volátiles básicamente se trata de disponer de un mecanismo para transportar la muestra a analizar a la cámara de sensores. Para el desarrollo del equipo el suministro de volátiles se realizó automáticamente, extrayendo los volátiles desde la zona en la que se encuentra la muestra a través de la inyección del aire exterior que su vez son transportadas a la cámara de medida.

El suministro de volátiles lo conforman básicamente 2 electro-válvulas de 3 vías y una bomba de aire de bajo costo. El control de la activación de los actuadores fueron comandados por un PIC16F877A de Microchip.

2.2. Etapas del Proceso de Medición

Observando la figura 1 se identifican claramente las 3 etapas de medida: Concentración, Medición y Reposo.

- **Concentración:** La etapa de concentración como su nombre lo indica consiste en concentrar los volátiles de una muestra (ej. Aromas de Frutas) a través de la cámara de concentración. Esto se consigue aislando las muestras en su interior con el ambiente externo por medio de la conmutación de las 2 electro-válvulas. La bomba de aire se activa simultáneamente dirigiendo el flujo hacia el exterior y con el propósito de limpiar y expulsar los residuos de volátiles almacenados.

- **Medida:** En esta etapa del proceso de medición se realiza la adquisición de las señales de los sensores de gases, por lo tanto se deben activar las 2 electro-válvulas y la bomba de aire simultáneamente para dirigir el flujo de aire desde la bomba hacia la cámara de concentración, arrastrando los volátiles desprendidos de la muestra hacia la cámara de sensores.

- **Reposo:** En la última etapa del proceso de medición se busca limpiar y expulsar los residuos de los volátiles de la medida realizada anteriormente, para ello se desactivan las 2 electro-válvulas y se activa la bomba. Es importante abrir la cubierta de la cámara de concentración para retirar la muestra, para evacuar los volátiles concentrados en medidas anteriores.

2.3. Cámara de Sensores de Gases ó de medida

La cámara de medida fue diseñada para la ubicación de 6 sensores de gases químicos de óxidos metálicos de dos importantes fabricantes a nivel mundial, FIS inc y Figaro Sensor. Estos sensores responden ante la presencia de volátiles en su capa activa (ej. SnO₂) de óxido de estaño lo cual es el material más comúnmente empleado para la fabricación de estos dispositivos.

Para la fabricación de la cámara de sensores se utilizó el material metacrilato con un espesor de 8 milímetros. Las dimensiones fueron: Largo: 12 cm, Ancho: 6 cm y Alto: 5 cm.

La cámara de sensores posee dos orificios, uno como entrada y el otro como salida, los cuales permiten la circulación de un flujo de aire constante. La cámara de sensores posee dos empaques inoloros tanto en la parte posterior como en la inferior, los cuales ejercen presión sobre la cubierta y el cuerpo de la misma. Esta cubierta descansa sobre una junta de goma que asegura el cierre hermético.

Para el funcionamiento de los sensores de gases se utilizaron dos fuentes de voltaje constantes de 5 y 10 VDC. La Figura 3 muestra la cámara de sensores construida.

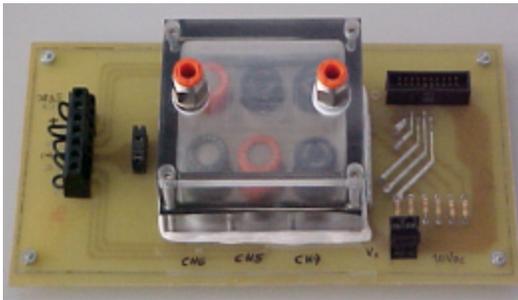


Fig 3. Cámara de sensores de gases

Sensores de Gases:

Como habíamos mencionado anteriormente, los sensores de gases utilizados fueron de óxido de estaño de la casa Figaro sensor (Taguchis) y FIS de las series SP. Los sensores pueden ser ubicados fácilmente para constituir la matriz de sensores y a su vez sus resistencias de carga (Ej: 4.7 K Ω). La tabla 1 detalla los sensores empleados para el acondicionamiento de la cámara de sensores.

Tabla 1: Sensores de gases

Cantidad	Sensor	Aplicación
	Taguchi (Serie-8)	
1	TGS-800	Gases combustibles
1	TGS-822	Dissolvents orgànics (benzeno)
1	TGS-813	Gases combustibles
	FIS (Serie-SP)	
1	SP-11-00	Propòsit general. Vapors inflamables
1	SP-31	Hidrocarburs
1	SP-AQ2-00	Qualitat de l'aire, VOC's

Todos los sensores fueron ubicados en la cámara de medida partiendo del número de entradas ó canales análogos proporcionados desde el Microcontrolador con un previo acondicionamiento de la señal.

2.4 Sistema de monitoreo y adquisición de datos

Todas las señales provenientes de los sensores de gases fueron adquiridas por el Microcontrolador. La tarjeta de adquisición fue especialmente diseñada para establecer un enlace entre el software de monitoreo, control y el almacenamiento de las señales provenientes de los 6 sensores de gases. Debido a que las señales de los sensores de gases pueden tener niveles de voltaje superiores a 5 Voltios DC fue necesario acondicionar las señales de los sensores a los niveles permitidos por el microcontrolador. Para el monitoreo de las señales en tiempo real se desarrollo una interface gráfica al usuario, mediante un software realizado en Visual Basic 7.0. En la interfaz se realizan las configuraciones de los tiempos de cada proceso (concentración, medida y reposo), y se almacenan los datos de medición en el directorio correspondiente bajo la plataforma Windows. En ella se pueden visualizar las señales capturadas por los sensores en tiempo real.

2.5 Sistema de control

Como se indico la tarjeta de adquisición y control esta basada en un microcontrolador PIC16F877A, la cual tiene las siguientes funciones para el control de los elementos actuadores del sistema de olfato electrónico:

- Control y activación de las electroválvulas mediante dos señales digitales de 5 VDC.
- Control y activación de la Bomba de aire

2.6 Software de procesamiento de datos

Para el desarrollado de la interfaz gráfica de procesamiento de datos fue utilizado el software Matlab R2006a con las aplicaciones de PLS_Toolbox 3.0 y *Neural Network Toolbox* que incorporan los algoritmos necesarios para el procesamiento de datos y reconocimiento de patrones. La aplicación esta conformada básicamente por un conjunto de ventanas (Ver Figura 4), de las cuales se ejecutan cada una de las técnicas de pre-procesado de datos (Ej: Centrado de Datos, Autoescalado de Datos, Normalización por columna y Normalización por matriz), y los

métodos de procesado y/o reconocimiento de patrones (Análisis de Componentes Principales (PCA), y las redes neuronales MLP y Fuzzy Artmap). La interfaz proporciona al usuario un gran número de posibilidades para la discriminación ó clasificación de los volátiles de Patatas y Moras, con una completa información gráfica sobre el porcentaje de acierto en la clasificación de las muestras.

Para obtener un procesado eficiente y confiable, el programa proporciona al usuario los pasos necesarios que se deben seguir para obtener un buen resultado.

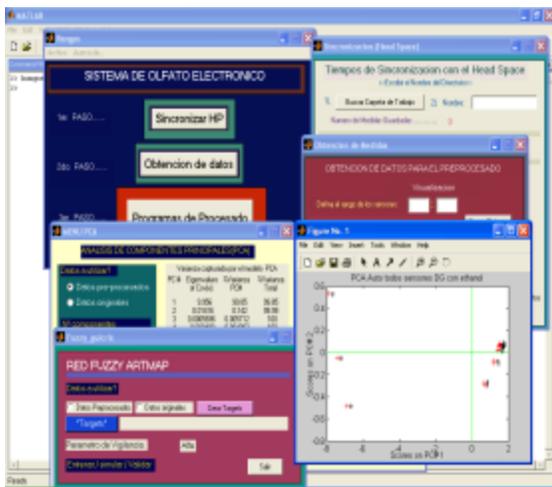


Fig 4. Ventana inicial de la interfaz grafica para el pre-procesado y procesado de datos

3. PRUEBAS Y RESULTADOS

Para realizar las pruebas preliminares con el sistema de olfato electrónico, se obtuvieron muestras de frutas y tubérculos. Para este caso se escogieron las Moras y patatas, las cuales son originarias de Pamplona (N.S) Colombia y distribuidas una vez escogidas a una plaza de mercado. Para este caso fueron evaluados diferentes tiempos de concentración (óptimo estado y mal estado) para la evaluación del equipo.

Tabla 2: Parámetros de medida

Item	Producto	Tiempo de Concentración	No. de medidas
1	Moras (Óptimo)	2 días	6
2	Moras (Mal estado)	8 días	9

3	Patatas (Óptimo)	2 días	5
4	Patatas (Mal Estado)	8 días	5

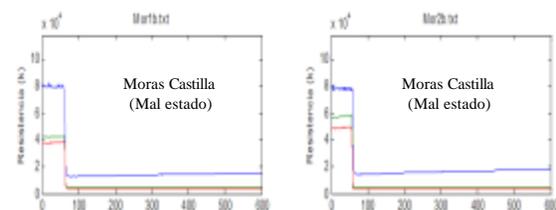
En total se realizaron 21 medidas distribuidas de la siguiente forma: Como se puede observar en la tabla 2 se describen los parámetros de medida, en donde los tiempos de concentración fueron tomados después del arribo del producto a la plaza de mercado y el cual existe una diferencia de la concentración de 6 días para las dos categorías.

Los tiempos empleados para la realización de cada medida fueron 20 minutos para la concentración, 10 minutos para la etapa de medida y 10 minutos para la etapa de reposo, para un total de 50 minutos por cada proceso de medición.

3.1 Resultados con los métodos de reconocimiento de patrones (PARC)

Antes de aplicar los métodos de reconocimiento de patrones PCA y redes neuronales Artificiales, se obtuvieron las Matrices de datos generadas desde los dos conjuntos de medidas de las muestras de Moras (Castilla) y Patatas (Pastusa).

Previamente se procedió a evaluar las respuestas de los sensores de gases en forma visual con el objetivo de comprobar que los sensores respondieran adecuadamente ante la presencia de los gases. De esta forma es posible verificar en forma rápida la estabilidad y repetitividad de los sensores. En la figura 5 se puede observar un ejemplo ilustrativo del comportamiento típico de los sensores de gases ante la presencia de Moras en óptimo estado y mal estado. Es posible observar que para las moras en mal estado hay una mayor variación de la resistencia ($K\Omega$) con respecto a las Moras en óptimo estado. En las gráficas el tiempo de adquisición para cada medida fue de 10 minutos (600 segundos) correspondiente al eje de la abscisa. De igual forma se hizo esta misma prueba para las patatas en óptimo y mal estado.



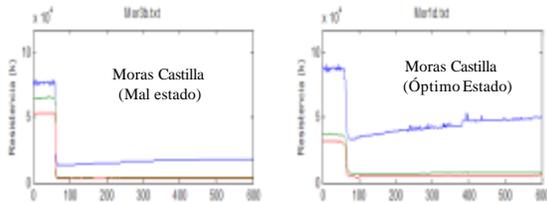


Fig 5. Respuestas típicas de sensores de gases en la detección de compuestos volátiles (Ej: Moras Castilla en mal estado y en óptimo estado)

Para facilitar la labor de los algoritmos de procesamiento es posible utilizar 4 métodos de normalización: Auto-escalado, Centrado, Normalización por columna y Normalización por matriz. Los métodos se pueden seleccionar desde las opciones de las ventanas de programas de pre-procesado, por lo tanto, para las pruebas posteriores el método “Centrado de Datos” está seleccionado por defecto.

En el método centrado ó “mean center” se realizan cálculos individuales por columna (es decir, por sensor). El método calcula el valor medio con los valores obtenidos para las medidas por sensor (columna) determinado. A continuación, se le resta el valor medio a todos los datos de dicha columna. Se trata de uno de los métodos de normalización más adecuados para este tipo de aplicaciones y por ello se da como método por defecto.

Una vez obtenido un vector descriptivo a partir de los parámetros estáticos obtenidos por las señales de los sensores y las técnicas de pre-procesado, a continuación se nombran los métodos utilizados para el procesamiento de datos: PCA (Análisis de Componentes Principales), y la Redes Neuronales Perceptron Multicapa ó MLP y la Fuzzy Artmap.

3.1.1 Procesamiento con PCA:

El algoritmo PCA suele ser clasificado como un método no supervisado de reconocimiento de patrones, ya que su uso más extendido en los sistemas de olfato electrónico se limita a representar bidimensionalmente un conjunto de medidas para ver si se pueden determinar agrupaciones (“clusters”) espontáneas entre las diferentes medidas realizadas previamente, también existen modificaciones que permiten aplicar el algoritmo en modo supervisado.

En los resultados obtenidos con el método PCA se puede observar que es posible discriminar entre dos grupos de medidas, con los cuales se puede discriminar entre dos tipos de muestras; para el caso de las medidas de moras se obtuvo un 98.23 % de varianza para el primer componente principal (PC1), por lo tanto se obtiene un buen factor de discriminación. En la Figura 6 se puede observar claramente la ubicación de los clusters de moras de castilla en óptimo y mal estado.

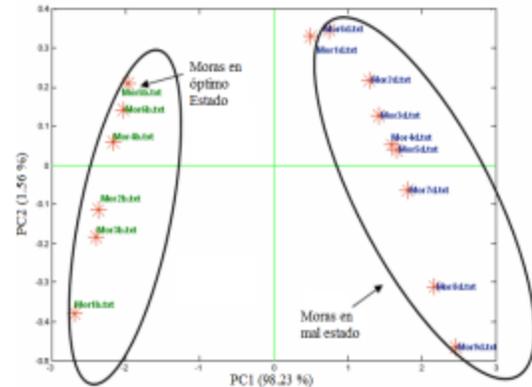


Fig 6. Procesamiento con PCA (Discriminación de clusters de moras castilla en óptimo y mal estado)

En los siguientes resultados obtenidos con el método PCA también se obtiene muy buena discriminación de los dos grupos de medidas de patatas pastusa, para este caso se obtuvo un 78.65 % de varianza para el primer componente principal (PC1). En la Figura 7 se puede observar claramente la ubicación de los clusters de patatas en tiempos de concentración diferentes.

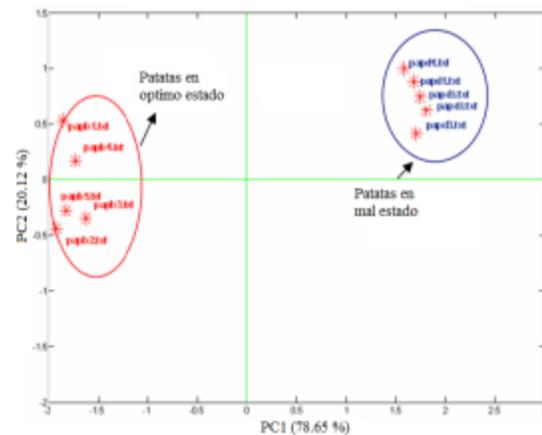


Fig 7. Respuesta a través de PCA (Discriminación de clusters de patatas pastusa en óptimo y mal estado)

Si observamos las figuras 6 y 7 podemos concluir que existe una mejor agrupación en los clusters de las patatas pastusa, esto es debido a que las primeras pruebas fueron realizadas con las Moras castilla y que la calibración del equipo se realizó partiendo de las primeras medidas.

Sin embargo para obtener una mayor repetitividad en la adquisición de las muestras es muy importante que el operario tenga una experiencia previa en la utilización del equipo, sobre todo en las etapas de muestreo y reposo.

3.1.2 Procesamiento con redes Neuronales: MLP y Fuzzy Artmap.

El objetivo de la red MLP y Fuzzy Artmap es clasificar un determinado número de medidas a partir de un entrenamiento previo (obtención de un modelo). Se tratan de métodos no lineales que permiten tanto la clasificación como la cuantificación de resultados.

A diferencia de métodos como PCA, con las redes neuronales podemos realizar tres tipos de tareas:

- Entrenar una red neuronal utilizando un conjunto de medidas de calibración
- Clasificar nuevas medidas utilizando un modelo de red previamente entrenado
- Evaluar la viabilidad de clasificar medidas mediante el sistema a través de procesos de validación

A partir de los resultados obtenidos a través de las redes MLP y Fuzzy Artmap se obtuvo un porcentaje de clasificación en ambos casos de 100 % de acierto.

La validación de cada una de las redes se realizó con el método de "Leave one out", el cual es un método interactivo que consiste en retirar una de las medidas (Una fila de la Matriz principal) y entrenar con las que quedan, luego al final se valida la red con la que se había retirado previamente. El proceso termina cuando haya transcurrido la totalidad de las medidas en el proceso interactivo.

Tabla 3: Porcentajes de clasificación

Categoría	Número de medidas	Pre-procesado	% Clasificación (MLP y Fuzzy Artmap)
Moras Castilla (Óptimo Estado) & Moras Castilla (Mal estado)	15	Centrado	100 %
Patatas Pastusa (Óptimo Estado) & Patatas Pastusa (Mal Estado)	10	Centrado	100 %

En la tabla se presentan los resultados de clasificación de los diferentes tipos de categorías.

Es importante destacar que para cada categoría (Moras y patatas) se obtuvieron mejores resultado con el método de pre-procesado "centrado de datos". También es útil mencionar que aunque son semejantes las respuestas de clasificación de las medidas para ambas categorías, la diferencia más notable es la capacidad de respuesta de la red Fuzzy Artmap, ya que es mejor en cuanto a velocidad de procesamiento y robustez con respecto a la perceptrón multicapa (MLP).

4. CONCLUSIONES

Este trabajo claramente demuestra que es posible diferenciar y clasificar productos alimenticios (Moras y Patatas) en diferentes concentraciones, usando un sistema multisensorial compuesto básicamente por sensores de gases químicos de óxido metálicos. El análisis de los datos se desarrolló a través de métodos estadísticos y redes neuronales artificiales los cuales permitieron obtener un buen porcentaje de clasificación de los diferentes compuestos volátiles emitidos por los alimentos.

Aunque las pruebas se hicieron con solo dos concentraciones para cada una de las muestras, se ha demostrado que la repetitividad en la adquisición de las medidas es un factor sumamente importante para valorar la eficiencia del instrumento de medida en otras aplicaciones.

REFERENCIAS

- W.F. Wilkens, A.D. Hatman, "An electronic analog for the olfactory processes", *Ann. NY Acad. Sci.*, pp. 116, 608, (1964).
- Persaud, K. C. & Dodd, G, "Analysis of discrimination mechanisms in the mammalian olfactory system using a model nose", *Nature*, pp. 352-355, (1982).
- Vanneste, E. & Geise, H. J, "Commercial electronic nose instruments". In Pearce, T. C., Schiffman, S. S., Nagel, H. T. and Gardner, J. W. (eds.) *Handbook of Machine olfaction*. Wiley-VCH: Weinheim, pp.161-179. (2003).
- Zhang, H, "Using electronic noses to assess food quality". In Tothill, I. E. (ed.) *Rapid On-line instrumentation for food quality assurance*. Woodhead Publishing Limited: Cambridge, pp. 324-338, (2003).
- J. W. Gardner and P. Bartlett, "A brief history of electronic noses", *Sensors and Actuators B*, 18-19, pp. 211-220, (1994).
- G.H. Dodd, P.N. Bartlett, and J.W. Gardner, "Odours--the stimulus for an electronic nose, in *Sensors and Sensory Systems for an Electronic Nose*", (J.W. Gardner), (1999).