

SISTEMA PORTÁTIL DE SENSORES INTELIGENTES (LENGUA ELECTRÓNICA) PARA EL ANÁLISIS DE ALIMENTOS

Álvaro Arrieta^{*†}, Oscar Fuentes^{}, Andrés Jaramillo^{*}**

** Grupo de investigación DANM / Desarrollo y Aplicación de Nuevos Materiales; Centro de ciencias básicas.*

*** Grupo de investigación GIE / Grupo de Investigación en Electrónica; Facultad de Ingeniería Electrónica.*

Universidad Pontificia Bolivariana, Km. 8 vía Cereté, Montería, Colombia.

Recibido 06 Noviembre 2013; aceptado 10 Marzo 2014

Disponible en línea: 30 Julio 2014

Resumen: Las exigencias en la industria de los alimentos crecen a diario, por esta razón los productores se ven obligados a fomentar la utilización de métodos para el análisis y control de calidad de sus productos cada vez más eficientes y precisos. Por lo anterior, se vienen desarrollando sistemas de sensores que son capaces de analizar las propiedades organolépticas de los alimentos (Narices y lenguas electrónicas). En este proyecto se busca desarrollar un prototipo portátil de lengua electrónica que permita discriminar y clasificar la calidad de algunas bebidas como vino, café, cerveza y leche.

Palabras clave: Lengua electrónica, sensores inteligentes, polímeros conductores, bebidas

SMART PORTABLE SENSING SYSTEM (ELECTRONIC TONGUE) FOR FOOD ANALYSIS

Abstract: Requirements in the food industry are becoming more stringent daily; the growing demand by customers about food quality makes the inspection and approval of products more rigorous every day, therefore, sensors system have been developed that are able to analyze food organoleptic properties (electronic nose and electronic tongue). This project seeks to develop a portable electronic tongue that would be able to discriminate and classify different samples of food, especially liquids such as wine, coffee, beer and milk.

Keywords: Electronic tongue, smart sensors, conductive polymers, drinks

[†] Autor al que se le dirige la correspondencia:

Tel. (+574) 7860146-7860661 ext 154.

E-mail: alvaro.arrieta@upb.edu.co (Álvaro Ángel Arrieta Almarío).

1. INTRODUCCIÓN

El éxito comercial de un producto está determinado entre otros factores por su aspecto, olor y sabor. La creciente demanda de los consumidores hace que cada día sea más rigurosa la aceptación de un alimento en cuanto a su calidad. Es entonces cuando los productores emplean herramientas de análisis y control cada vez más avanzadas que les permiten evaluar la calidad de sus productos. Por lo anterior, se vienen desarrollando propuestas tecnológicas encaminadas a mejorar el control de calidad de alimentos, siendo el análisis de algunas bebidas un primer acercamiento aportado por el grupo de investigación Desarrollo y aplicación de nuevos materiales (DANM) de la Universidad Pontificia Bolivariana – Montería, donde se logró avanzar en el análisis de vino ([Rodríguez, et al., 2006](#)), café ([Arrieta y Tarazona, n.d.](#)) y cerveza ([Arrieta, et al., 2010](#)).

Siguiendo la misma línea de investigación, actualmente el grupo centra su atención en el análisis de leche. Teniendo en cuenta que la industria de los lácteos es un sector económico de mucha importancia a nivel mundial, y principalmente en Colombia al ser este un país de vocación agroindustrial. Uno de los principales productos del sector pecuario es la leche y sus derivados, siendo por tanto un campo de gran actividad económica y con potencial para los mercados internacionales. Por ello, la vigilancia de la calidad e inocuidad de la leche como alimento y materia prima, es una de las principales preocupaciones de los productores y consumidores debido a que este producto puede ser alterado y/o adulterado.

Para evaluar la calidad de la leche, se utilizan métodos químicos, físico-químicos y sensoriales, de los cuales los primeros caracterizan la composición molecular del producto a partir de técnicas instrumentales, mientras que los sensoriales se basan en la caracterización de un producto haciendo uso de los órganos de los sentidos, estas características son conocidas como organolépticas ([Lindemann, 1996](#)).

Hasta el momento, una de las técnicas más rigurosas para evaluar el gusto de una bebida, es mediante un panel de cata, conformado por un grupo de personas cuidadosamente preparadas y entrenadas capaces de evaluar de manera fiable, el sabor y olor de un alimento. Esta valoración es

un método que puede resultar costoso en dinero y tiempo, teniendo en cuenta que el proceso tiene que hacerse en condiciones ideales, los panelistas solo pueden realizar determinado número de análisis por día, se requieren óptimas condiciones de salud, los expertos resultan costosos, etc. En este sentido, para el caso particular de la leche, según el decreto 616 de 2006 ([Ministerio de protección social Republica de Colombia, 2006](#)), debe hacerse una inspección físico-química y organoléptica de la leche cruda durante su recolección, por lo que se hace necesario entrenar a los recolectores, con el riesgo a que estén expuestos a distorsión sensorial por enfermedad, consumo de alcohol, cigarrillo o fatiga. Además, la legislación colombiana y algunas legislaciones internacionales prohíben el análisis organoléptico gustativo realizado por el recolector debido al riesgo de adquirir enfermedades zoonóticas y por la posible contaminación de la muestra.

Por lo anterior, en la presente investigación se propone desarrollar un prototipo de lengua electrónica portátil conformada por una red de sensores electroquímicos basados en polímeros conductores miniaturizados (superficies menores de 3,5 mm²), un sistema electrónico multicanal de medida y acondicionamiento de señales y un sistema de cómputo portátil tipo Tablet o Smartphone equipado con un software de procesamiento matemático avanzado que pueda ser capaz de discriminar y clasificar muestras de leche cruda, y de esta manera ofrecer una alternativa tecnológica con menor riesgo de adquisición de enfermedades por parte del personal recolector, menor probabilidad de contaminación de leche por parte del transportador y la posibilidad de tener una valoración inmediata que evite la mezcla de leche de mala calidad con lotes enteros.

A través de esta investigación se espera implementar una tecnología que aporte soluciones a problemas presentes en el sector alimentario, estudiando los sistemas de sensores que emulan o imitan órganos del sistema humano como lenguas electrónicas o también llamados dispositivos analíticos bioinspirados. Esto surge por la preocupación presente debido a los actuales métodos de control de calidad, donde se pone en riesgo la salud de un ser humano al momento de hacer el control organoléptico. Se espera asegurar la calidad química y sensorial de algunos alimentos que a diario se consumen, generando la confianza en estos al reducir las probabilidades de

intoxicación, buscando aportar al control de calidad de ciertos productos, evitando su falsificación y adulteración, y en consecuencia cooperar con una mejor calidad de vida de las personas.

2. EXPERIMENTACIÓN

El fundamento de los sistemas electrónicos para la detección de sabores está inspirado en los principios de funcionamiento del sistema gustativo humano, por lo tanto es importante comprender cómo el ser humano puede distinguir y reconocer los sabores.

El sentido del gusto, en torno al cual se centra esta investigación, responde a estímulos producidos por células gustativas de la lengua expuestas a diferentes sustancias, dicha interacción produce la sensación de sabor. El mecanismo usado para detectar los sabores aún no se ha determinado en su totalidad, pero es sabido que las células gustativas generan una serie de impulsos eléctricos que son transmitidos al cerebro, donde finalmente se identifica el sabor ([Lindemann, 1996](#)). A continuación se puede apreciar una analogía entre el sistema gustativo humano y un desarrollo artificial, ver [Fig. 1](#).

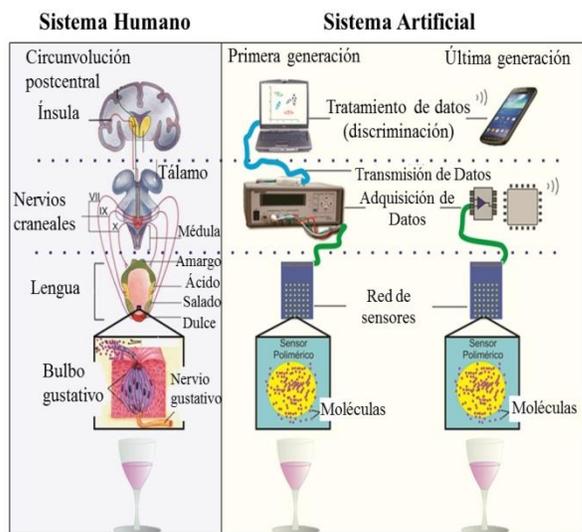


Fig. 1. Analogía funcional entre el sistema gustativo humano y un sistema electrónico para la detección de sabores.

Un primer desarrollo en esta línea de investigación fue para el análisis de vino, se contó

con la participación de la Universidad de Valladolid ([Rodríguez, et al., 2006](#)). Este sistema, estuvo constituido principalmente por sensores basados en polímeros conductores de diferente naturaleza, encargados de recoger las señales generadas en la sustancia analizada. Para esto se usó una técnica de medida electroquímica conocida como voltametría cíclica, el uso de esta técnica ha cobrado gran importancia en estos desarrollos por sus buenas prestaciones como técnica de medida en lenguas electrónicas. Se trata de un método donde se analiza la variación de la corriente (I) que fluye a través de una celda electroquímica mientras se aplica una rampa de potencial controlable (E) en función del tiempo a un electrodo expuesto a la sustancia, por lo tanto, la técnica se puede describir como una función de E, I y t, observándose en un gráfico resultante corriente-potencial llamado voltamograma ([Gonzalez, 2005](#)), esta técnica permite la obtención de respuestas ricas en información, alta sensibilidad y versatilidad.

Para realizar esta función se usó un equipo de medida electroquímica llamado potencióstato, encargado de suministrar el voltaje requerido por la técnica, obtener las señales de corriente y generar los datos a partir de las medidas tomadas, estos finalmente fueron procesados en el software Matlab donde fue posible caracterizar las diferentes muestras analizadas con el uso de métodos estadísticos multivariantes.

En la siguiente investigación donde se llevó a cabo el análisis de café, se logró desarrollar otro prototipo, el cual estuvo constituido por tres etapas:

Sensores electroquímicos: de manera similar al trabajo anterior se usaron electrodos basados en polímeros conductores, esta vez se dispuso de una red en forma de matriz con sensores miniaturizados (superficies menores a 3,5 mm²) donde se aplicó la misma técnica electroquímica.

Equipo electrónico de medida: este equipo recibe la señal proveniente del computador, que corresponde a la técnica electroquímica utilizada. Una vez aplicada la señal de voltaje a la celda, se inicia la reacción química y el equipo, a través de un módulo de adquisición de datos, empieza a capturar las señales de corrientes generadas en la reacción, las cuales están en función de las muestras. Las señales de corriente son entregadas al computador para ser almacenadas, con el

voltaje generado de la técnica de voltimetría y el software de aplicación diseñado genera las respectivas gráficas de los voltamogramas para cada electrodo de trabajo.

Software de aplicación: para el almacenamiento, manipulación, procesamiento y presentación de las variables manejadas (voltaje y corriente) se desarrolló un código utilizando el software LabVIEW 2009, que se llevó a cabo por etapas las cuales se fueron uniendo a medida que se lograban realizar y simular correctamente. Seguidamente se procesaron los datos utilizando métodos estadísticos multivariantes, con lo que se logró caracterizar seis muestras de café de distinta procedencia. Adicionalmente, este trabajo, a diferencia de los anteriores se incorporó el análisis de componentes principales con redes neuronales, el cual permite extraer mayor información de los datos suministrados por el dispositivo de lengua electrónica. A continuación se muestra un esquema del sistema prototipo de lengua electrónica desarrollado para el análisis de café, ver [Fig. 2](#).

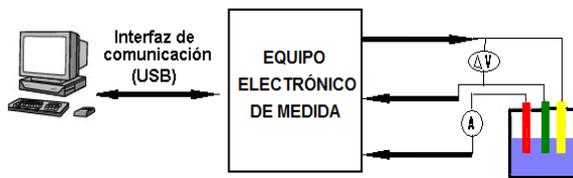


Fig. 2. Diagrama general del sistema multicanal para el análisis de café.

El sistema electrónico propuesto para el análisis de leche estará conformado por tres bloques muy parecidos a los desarrollados en investigaciones anteriores:

Bloque de sensores electroquímicos: se usará una matriz de sensores basados en polímeros conductores o electrodos metálicos como el usado en el análisis de café, con superficies menores a 3,5mm², dispuestos de tal forma que puedan ser conectados con la siguiente etapa.

Bloque de acondicionamiento de señales: no se trabajará con equipos electroquímicos ni tarjetas de adquisición de datos, el procesamiento esta vez no será hecho por un computador si no por un dispositivo móvil tipo tablet o smartphone, por

tanto este bloque será un circuito cuidadosamente diseñado para tratar pequeñas señales de corriente, acondicionarlas y convertirlas en datos que serán transmitidos a la siguiente etapa.

Bloque de procesamiento de datos: es un software diseñado y compilado para dispositivos móviles con sistema operativo Android, esta aplicación estará equipada con métodos estadísticos multivariantes, PCA, LDA, RNA, etc., que permitirán el reconocimiento de patrones para determinar finalmente la calidad de la bebida, en este caso la leche. El esquema de lengua electrónica propuesto se muestra a continuación, ver [Fig. 3](#).

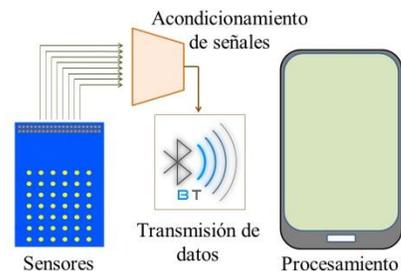


Fig. 3. Esquema del sistema portátil de lengua electrónica para el análisis de leche.

3. RESULTADOS PARCIALES Y DISCUSIONES

3.1. Análisis de vino

Uno de los experimentos hechos en la Universidad de Valladolid – España, fue la aplicación de la voltimetría cíclica a una red de seis sensores expuestos a muestras de vino, con lo que se obtuvo una serie de voltamogramas, ver [Fig. 4](#)., donde cada uno corresponde a un electrodo de naturaleza específica ([Rodríguez, et al., 2006](#)):

Analizando detalladamente la figura anterior, se puede notar que ante esta muestra, la respuesta ofrecida por cada electrodo es única y solo depende de la naturaleza de dicho electrodo, por lo tanto la red de sensores brinda una huella dactilar del vino, describiendo su comportamiento particular.

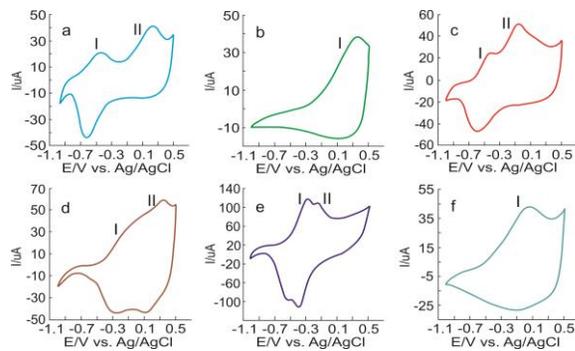


Fig. 4. Señales voltamétricas de la red de sensores en vino: a) PPy/DSA, b) PPy/TSA, c) PPy/AQDS, d) PPy/FCN, e) PPy/PWA y f) PPy/SO4.

Después de este experimento con el que se pudo asegurar la buena conducta de los sensores, se avanzó en la investigación realizando otros ensayos, entre los que cabe resaltar; discriminación de vinos tintos según su denominación de origen, discriminación de vinos tintos elaborados con diferente variedad de uvas, discriminación de vinos tintos de diferente añada y discriminación de vinos tintos envejecidos en barricas de distinta procedencia y tostado. A continuación se muestra el resultado del experimento según su denominación de origen, de donde se obtuvo la gráfica que describe el análisis de componentes principales (PCA), ver [Fig. 5](#).

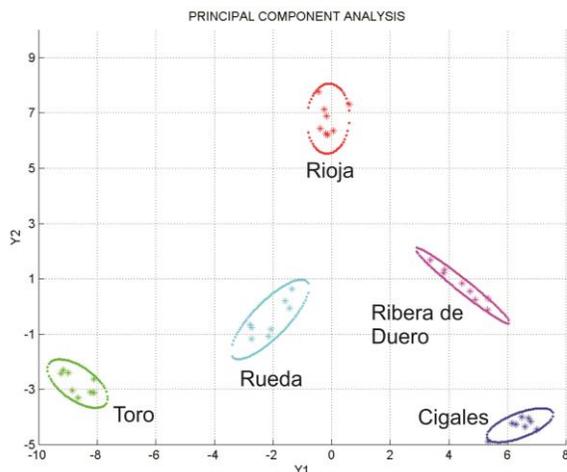


Fig. 5. Análisis de Componentes Principales de los datos obtenidos de muestras de vino de diferente Denominación de Origen elaboradas con variedad de uva tempranillo.

La gráfica mostrada en la [figura 5](#) fue realizada a partir de los datos tomados en las muestras de vino según su denominación de origen. Para esto se experimentaron cinco muestras preparadas en condiciones similares (Ribera de Duero, Toro, Cigales, Rueda y Rioja), exponiendo la red de sensores a cada una para analizar su capacidad de discriminación. Con este experimento se pudo notar que la red de sensores utilizada fue capaz de discriminar las diferentes muestras de vino a la que fue expuesta. Por tanto, para este caso particular la técnica PCA ofrece una separación clara de la apreciación gustativa de una misma variedad de uva pero con diferente Denominación de Origen.

3.2. Análisis de café

De forma similar al procedimiento realizado durante la caracterización del vino, uno de los primeros experimentos hechos para el análisis de café, fue la aplicación de la voltametría cíclica a una red de seis sensores poliméricos expuestos a una muestra de café Córdoba ([Arrieta & Tarazona, n.d.](#)), a partir de este experimento se obtuvieron los voltamogramas mostrados a continuación, ver [Fig. 6](#).

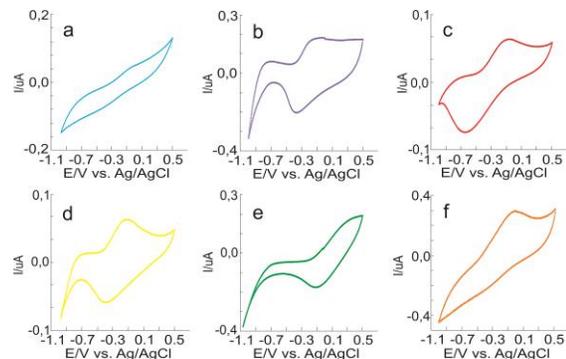


Fig. 6. Señales registradas en una muestra de café Córdoba: a) PPy/AQDS, b) PPy/DBS, c) PPy/FCN, d) PPy/HCF, e) PPy/PWA y f) PPy/PTS.

Los voltamogramas resultantes en este experimento, demuestran que ante la misma sustancia, la red de sensores es capaz de ofrecer curvas únicas según la naturaleza de cada electrodo, se puede decir entonces que esta respuesta es característica de la muestra.

Luego de asegurar experimentalmente la buena labor de la red de sensores, otro experimento consistió en exponerla a diferentes marcas de café (La Bastilla, Córdoba, Almendra Tropical, Universal y Sello Rojo), para observar su capacidad de discriminación, la respuesta se observa a continuación, ver [Fig. 7](#).

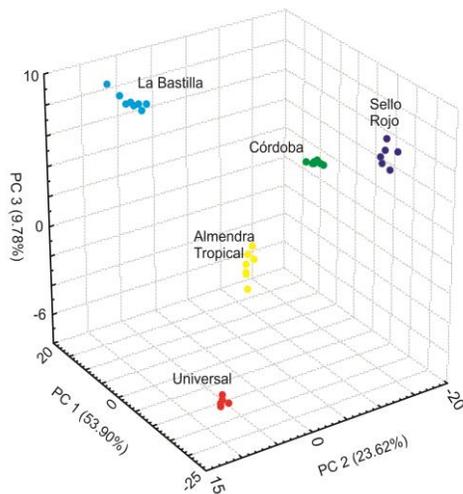


Fig. 7. Análisis NNPC de los datos obtenidos en muestras de diferentes marcas de café.

Se observa que la red de sensores utilizada fue capaz de discriminar las diferentes marcas comerciales de café a la que fue expuesta.

3.3. Primeros voltamogramas con la leche

Para el análisis de leche se realizó una primera prueba en donde se aplicó la técnica de voltametría cíclica a dos sensores de diferente naturaleza (PPy/Índigo y PPy/Platino) expuestos a una muestra de leche cruda, esto arrojó como resultado los siguientes voltamogramas, ver [Fig. 8](#).

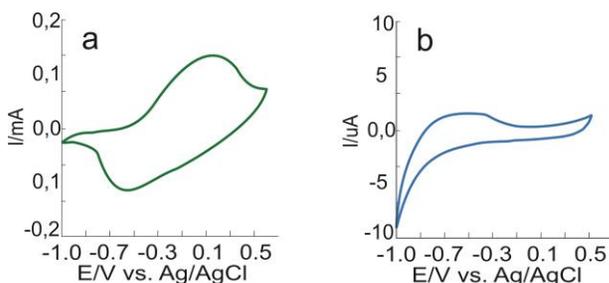


Fig. 8. Señales registradas de una muestra de leche cruda: a) PPy/Índigo, b) PPy/Platino.

Se puede notar en la [figura 8](#) la capacidad que tienen los sensores de ofrecer una respuesta única ante la misma muestra de leche, esto es importante, debido a que se demuestra que al usar dos sensores de diferente naturaleza, se pueden obtener dos fuentes de información de la misma sustancia, así se espera en los próximos experimentos, el desarrollo de una red de sensores que de manera similar a las investigaciones previas, ofrezca una huella dactilar específica de cada muestra, de tal forma que pueda ser capaz de discriminar entre diferentes matices de leche y de esta forma seguir avanzando en la línea de investigación aportando un prototipo integrado, compacto y portátil capaz de discriminar la calidad de diferentes muestras de leche.

4. CONCLUSIONES

Los prototipos de lengua electrónica basados en polímeros conductores elaborados hasta el momento, han mostrado su capacidad de diferenciar sustancias con distintas propiedades gustativas.

El arreglo de sensores dispuestos en forma de matriz ha mostrado hasta hoy su cualidad de aportar una huella dactilar de las muestras analizadas, aportando información útil para hacer la discriminación con técnicas estadísticas multivariantes.

La técnica electroquímica de medida usada para tomar información química de la sustancia ha mostrado su capacidad de ofrecer respuestas ricas en información. Lo que permite en conjunto con el arreglo de sensores aportarle datos precisos a la etapa de procesamiento reduciendo el costo computacional.

Los métodos estadísticos planteados, ofrecen una excelente discriminación de los datos mostrando su capacidad de proveer respuestas características de las diferentes sustancias analizadas.

Estos logros abren las puertas al avance de esta tecnología y al planteamiento de investigaciones futuras encaminadas a aportar un grano de arena al desarrollo integral del campo en nuestro país.

AGRADECIMIENTO

Los autores agradecen el soporte económico brindado por el Departamento Administrativo de

Ciencia, Tecnología e Innovación – Colciencias y la Universidad Pontificia Bolivariana – Montería.

A los organizadores del evento “XX Feria Internacional de Ingeniería INGENIAR UPB 2013, Septiembre 30 – Octubre 4 de 2013, Medellín – Colombia” por el apoyo brindado.

REFERENCIAS

- Arrieta, Á. y R. Tarazona (n.d.). Electronic tongue and neural networks, biologically inspired systems applied in classifying coffee samples. *American journal analytical chemistry*, (En revisión).
- Arrieta, Á., M. Rodríguez, J. De Saja, C. Blanco y D. Nimubona (2010). Prediction of bitterness and alcoholic strength in beer using an electronic tongue. *Food Chemistry*, **123**: 642–646.
- González, J. M. (2005). *Técnicas y métodos de laboratorio clínico*. Manson S.A., Barcelona.
- Lindemann, B. (1996). Taste reception. *Physiological Reviews*, **76**: 719-766.
- Ministerio de la protección social (2006). Decreto número 616 de 2006, [<http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Normal.jsp?i=21980>], consultado en 2013-09-10.
- Rodríguez, M., Á. Arrieta, J. A. Fernández, V. Parra y J. De Saja (2006). Electronic tongue based on chemically modified electrodes and voltammetry for the detection of adulterations in wines. *Sensors and actuators*, **118**: 719-766.

SOBRE LOS AUTORES

Álvaro Ángel Arrieta Almario

Licenciado en Química y Biología de la Universidad de Córdoba/Montería. PhD. de la Universidad de Valladolid, Estudios en Química Avanzada. Postdoctorado Universidad de Valladolid. Docente interno del centro de Ciencia Básica de la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Montería. Coordinador del grupo de Investigación DANM de la Universidad Pontificia Bolivariana – Montería. Concejero de Colciencias.

Oscar Camilo Fuentes Amín

Ingeniero Electrónico. Joven investigador y miembro de apoyo en los grupos DANM y el

Grupo de Investigación en Electrónica (GIE) de la Universidad Pontificia Bolivariana – Montería. Actualmente con desempeño en la línea de investigación “narices y lenguas electrónicas”.

Andrés Felipe Jaramillo Muñoz

Estudiante de último año de Ingeniería Mecánica. Actualmente finalizando el trabajo de grado en el área de nuevos materiales con el desarrollo de un acumulador electroquímico de carga a partir de un biopolímero de almidón de yuca y polipirrol. Miembro de apoyo del grupo de investigación DANM.