

Aspectos relevantes para el diseño de una lengua electrónica

Relevant aspects for the design of an electronic tongue

Ing. Ana María Gómez Torres, Ing. Paulo Andrés Velez Angel, MsC, Ing. Carlos Diego Ferrin, Msc, Ing. Esteban Correa Agudelo, Msc, Ing. Luis Eduardo Vélez, Ing. Alexander Ramirez.

Centro de Bioinformática y Biología Computacional de Colombia (CBBC), Manizales, Colombia.

Correo-e: ana.gomez@bios.co, paulo.velez@bios.co, carlos.ferrin@bios.co, esteban.correa@bios.co, luis.velez@bios.co, Alexander.ramirez@bios.

Resumen—Las exigencias de la industria alimentaria están creciendo de manera exponencial, por lo que competir con la calidad de los productos se está volviendo un tema primordial para los pequeños y grandes empresarios. Para este fin se usan paneles de cata que presentan un sinnúmero de limitaciones, lo que ha llevado a buscar nuevas alternativas que complementen este tipo de análisis, una de las más novedosas es el diseño de dispositivos electrónicos que emulen el sentido del gusto llamados lenguas electrónicas que reproducen de manera artificial las sensaciones del sabor. Este proceso se da mediante un aprendizaje de máquina que reúne la información químico-analítica de los diferentes sabores, la información de los paneles de cata y la caracterización electroquímica a través del descubrimiento de regularidades entre los datos usando algoritmos computacionales y desencadena en la toma de decisiones como la clasificación de los datos. El presente artículo pretende realizar una extensa revisión bibliográfica acerca de los aspectos a tener en cuenta en el diseño de una lengua electrónica y su importancia a nivel industrial.

Palabras claves— panel de cata, lengua electrónica, sabor, aprendizaje de máquina, químico- analítica, electroquímica, algoritmo, clasificación de datos

Abstract—The demands of the food industry are growing exponentially, so to compete with the quality of products is becoming a major issue for small and large businesses, for this purpose are used tasting panels but present a lot of constraints, this has led to looking for new alternatives that complement this analysis. One of the newest is the design of electronic devices that emulate the taste sense called electronic tongues that reproduce artificially the taste sensation, this process is achieved by machine learning that related the chemical-analytical information on the different flavors, information tasting panels and electrochemical characterization through the discovery of regularities among the data using computational algorithms and ends in the decision making like the data classification. The present article has as purpose to make an extensive review on the aspects to consider in the design of an electronic tongue and industrial importance.

Keywords—tasting panel, electronic tongue, taste, machine learning, analytical chemist, electrochemistry, algorithm, data classification

I.INTRODUCCION

Uno de los sectores más dinámicos y competitivos en el país es el de consumo masivo a pesar de algunas coyunturas negativas como la caída del precio del petróleo o las inclemencias de los fenómenos ambientales (fenómeno del niño, fenómeno de la niña). Dentro de la industria, y según lo reportado por el departamento nacional de planeación (DNP), la industria de alimentos es uno de los sectores con mayor expectativa de crecimiento, representando actualmente cerca del 20% de la industria total. [1]

La calidad de los alimentos es el conjunto de cualidades que los hacen aceptables a los consumidores y entraña muchos aspectos (calidad sensorial, nutritiva, sanitaria, tecnológica, económica) donde uno de los más importantes actualmente es la calidad sensorial; en un análisis químico, los estímulos sensoriales se usan como complemento del análisis e identificación de una muestra dada, este aspecto está ligado a las propiedades organolépticas, produciendo cierto grado de aceptación o de rechazo. Hoy en día, con el fin de realizar las pruebas de control de calidad, se usa un panel de cata que es un grupo de personas (entre 8-12) seleccionadas por tener una mayor sensibilidad olfato-gustativa y entrenadas para evaluar

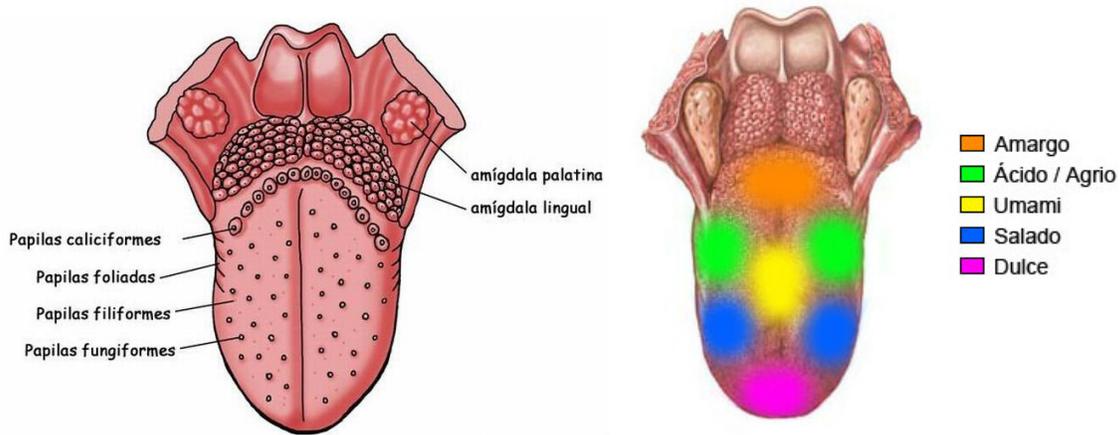


Figura 1 a) Papilas gustativas que conforman la lengua humana b) Regiones especializadas de la lengua para recibir cada tipo de sabor

sensorialmente un determinado producto [2], este método presenta algunos inconvenientes, pues depende de muchos factores que pueden afectar la percepción humana, haciéndolo muy subjetivo, es por esto que se están implementando nuevas tecnologías que complementan estos paneles con técnicas de medición analíticas como las lenguas electrónicas, los principales países donde se ha desarrollado la lengua electrónica son Japón, Italia, Rusia, España, Brasil y Colombia aplicando esto a diversas muestras de té, vino, zumos, vodka, aceite de oliva, café, entre otras. [3]

II. MATERIALES Y METODOS

A. Sentido del gusto

Con el fin de determinar caracteres organolépticos, los estímulos sensoriales de interés son: sentido del gusto, olfato, visual, dactilar y en algunos casos el auditivo. Desde el punto de vista científico, el sentido del gusto muestra un especial interés por su papel en la selección, reconocimiento y aceptación de los distintos tipos de alimentos, inicia por el contacto con las papilas gustativas presentes en la superficie de la lengua y las regiones adyacentes de la boca y garganta.

La lengua es un órgano que cumple funciones como la hidratación de la boca y los alimentos mediante salivación, la deglución, el lenguaje. En la parte superior se encuentran las papilas gustativas (receptoras del gusto), cada una de estas especializada en recibir un tipo de gusto específico

como se muestra en la figura 1, el gusto puede clasificar un sinnúmero de calidades, pero todas son solo combinaciones de cinco calidades fundamentales: Dulce, ácido, salado, amargo, umami [4] [5][6]

Las células del gusto están en el interior de unas estructuras especializadas denominadas “botones del gustativos”, las sustancias químicas de la comida se disuelven en la saliva y entran en contacto con esas células a través del poro gustativo donde interactúan con receptores del gusto y con proteínas G desencadenando cambios eléctricos en las células gustativas a través de diferentes mecanismos, en reposo, estas células presentan una carga neta negativa en su interior y una carga neta positiva en su exterior, una vez se da la interacción se suprime esta diferencia de cargas liberando neurotransmisores que desencadenan la transmisión de mensajes eléctricos en las neuronas.

Sin embargo, diversos estudios han diferido acerca del “mapa del gusto” que se presentó en la Figura 1 demostrando que todas las variedades del gusto pueden detectarse en todas las regiones de la lengua que contengan botones gustativos debido a que las neuronas gustativas responden de manera característica ante más de un tipo de estímulo, es decir, la distinción neuronal entre estímulos de diferentes modalidades depende de la activación simultánea de los diferentes tipos de células y no de una región especializada del órgano del gusto. [7]

Tabla 1 Compuestos químicos que dan la sensación de los diferentes tipos de sabores [4]

Sensación de sabor	Composición química
Dulce	Típicamente producida por productos azucarados o endulzados (sacarosa, glucosa). La pueden producir un sinnúmero de compuestos como hidroxí-alifáticos no ionizados (alcoholes, glicoles, azúcares), aminoácidos
Acido	Producida por sustancias acidas, aunque no todos los ácidos producen esta sensación como es el caso de los aminoácidos y el ácido pícrico
Salado	Producida por el cloruro de sodio o por la presencia de cloruros, bromuros, yoduros, nitratos, sulfatos de potasio (K) y litio (Li)
Amargo	Es un estímulo típico producido por los alcaloides como la quinina, cafeína, estricnina y por algunos ácidos como al ácido pícrico.
Umami	Glutamato monosódico (MSG), inosinato disódico (IMP), guanilato disódico (GMP)

B. Química del sabor

La química del sabor se puede definir como el estudio desde el punto de vista químico de los procesos e interacciones que existen entre los componentes cuando se manipula un alimento. El sabor es bastante complejo de entender por ser la sensación que producen los alimentos y otras sustancias en el sentido del gusto [8], implica una percepción global integrada por excitaciones de diversos sentidos como el gusto, olor, visión, tacto, auditivo y se ve afectado por factores externos como la temperatura, la edad, el consumo excesivo de medicamentos o diversas implicaciones que puedan alterar la composición química de la saliva, la disminución del flujo salival o atrofiar las papilas gustativas.

Los compuestos responsables del aroma y del sabor son los que constituyen la menor concentración en los alimentos pero son primordiales en la calidad y aceptación de los mismos, una de las características fundamentales es la naturaleza quiral de dichos compuestos, es decir la superposición de las moléculas sobre su imagen especular. Se dice que una molécula es quiral cuando no existe esta superposición[9], los receptores químicos del aroma y del sabor son capaces de distinguir diversas formas enantioméricas.

Es por esto que conocer la composición química de los sabores resulta de vital importancia para entender los factores involucrados en la generación de la estabilidad de aroma y sabor y así desarrollar nuevos productos. La química del sabor es una de las ciencias que da la capacidad de reproducir casi cualquier sabor y ponerlo en las preparaciones determinando las sustancias que están disueltas en los alimentos y que dan origen a sabores que pueden ser agradables o desagradables para quienes lo perciben. [10]

Las sustancias no tienen en general un sabor único, lo que se percibe es una sensación compleja originada por uno o más de los sentidos básicos ya mencionados anteriormente. Diversos estudios, reportados en la literatura, han demostrado el carácter variable de las

correlaciones entre las características químicas de las sustancias y las modalidades gustativas. Por ejemplo, los sabores salados y ácidos, actúan sobre canales iónicos directamente, por su parte, los sabores dulce y amargo, se unen a los receptores de la superficie que desencadenan una cascada de señales en el interior de las células dando como resultado la apertura y el cierre de los canales iónicos. Cada compuesto tiene una determinada capacidad de provocar diferentes sensaciones y son percibidas de distintas maneras, los compuestos no volátiles son percibidos en los receptores del gusto, mientras que los volátiles son transportados desde la saliva a la fase de vapor en la cavidad bucal que después es conducido a la garganta por los receptores del olfato. La liberación de los compuestos de aroma y sabor dependen del grado de unión y la afinidad física-química de los compuestos como macromoléculas dentro del alimento. Algunas macromoléculas resultan de vital importancia para entender lo que se ha denominado la química del sabor, entre estas se encuentran los lípidos que sintetizan un gran número de compuestos volátiles, además, aumentan la persistencia de los compuestos de carácter hidrofóbico por su mayor tiempo de residencia y exposición ante los receptores del sentido del gusto haciéndolos más estables; lo que explica que los alimentos bajos en grasa tengan sabores de rápida desaparición, los carbohidratos, envuelven una gran cantidad de compuestos responsables del aroma y del sabor y son producidos mediante reacciones de oscurecimiento no enzimáticas que serán estudiados más ampliamente en el transcurso de este documento. En la tabla 1 se resumen algunos de los compuestos responsables de cada uno de los sabores.

- Sabor dulce

Está asociada con los grupos hidroxilo (-OH) por su presencia característica en los azúcares, aunque los compuestos poli hidroxilo varían su capacidad edulcorante y en muchos aminoácidos. La estereoquímica es la encargada de provocar una

determinada sensación, la estructura dulce esta geoméricamente situada de modo triangular para todas las unidades por lo que cambios de esta estructura conducen a una pérdida del sabor ácido y una posible inducción al sabor amargo, como es el caso de la L-glucosa y la D-glucosa, la primera es ligeramente salada, por el contrario la segunda es dulce, también pasa con algunos aminoácidos D y L

Aminoácido	L-isómero	D-isómero
Acido glutámico	Único	Sin sabor
Aspargina	Insípido	Dulce
Fenilalanina	Ligero	Dulce con resabio
Histidina	amargo	amargo
Isoleucina	Sin sabor-	amargo
Leucina	amargo	Dulce
Metionina	Muy	Dulce
Serina	amargo	Muy dulce
Valina	Ligero	Dulce
	amargo	Muy dulce
	Sin sabor	Muy dulce
	Ligero	
	dulce	
	Ligero	
	dulce	

como se observa en la

Tabla 2. Sabor de algunos aminoácidos en sus formas isométricas [11]

Aminoácido	L-isómero	D-isómero
Acido glutámico	Único	Sin sabor
Aspargina	Insípido	Dulce
Fenilalanina	Ligero	Dulce con resabio
Histidina	amargo	amargo
Isoleucina	Sin sabor-	amargo
Leucina	amargo	Dulce
Metionina	Muy	Dulce
Serina	amargo	Muy dulce
Valina	Ligero	Dulce
	amargo	Muy dulce
	Sin sabor	Muy dulce
	Ligero	
	dulce	
	Ligero	
	dulce	

- Sabor ácido

Es causado por sustancias en solución que generan iones hidrógeno (H^+), depende de la naturaleza de la molécula, del pH, acidez, y del efecto amortiguador que pueda tener la saliva. La intensidad de la

percepción del sabor ácido es proporcional a la suma de la concentración molar de todos los ácidos orgánicos con al menos un grupo carboxilo protonado y la concentración de los iones hidrógeno libres. [11]

- Sabor salado

Se da por las interacciones entre los cationes y aniones con respecto a los receptores en la superficie de la lengua, los cationes causan el gusto salino y los aniones lo inhiben, en este caso el diámetro iónico juega un papel muy importante, se trata del diámetro que hay entre los núcleos de dos átomos una vez este ha donado o recibido electrones, las sales inorgánicas de sodio y de litio (cloruro de sodio, cloruro de litio) con diámetros inferiores a 6.5 Å pueden producir un sabor único salino mientras que otras sales con diámetros iónicos mayores como el potasio reducen el sabor salado e incrementan el sabor amargo. [11]

- Sabor amargo

La percepción del sabor amargo es similar a la del sabor dulce, varía por la orientación de las moléculas como se mencionaba anteriormente, si la molécula puede ubicarse para ambos lados puede darse una respuesta dulce-amargo. La mayor parte de las sustancias responsables del sabor amargo son compuestos orgánicos que contiene hidrógeno, alcaloides, cadenas laterales de péptidos y presencia de aminoácidos básicos. Para determinar el amargor de los péptidos basta con dividir la energía libre por el número de aminoácidos de la cadena de péptidos, si esta excede 1350 se puede decir que se trata de un sabor amargo. [11]

- Sabor umami

Es un sabor parecido al de la carne, se encuentra en alimentos que son ricos en proteínas y tiene un mecanismo de acción aún desconocido e inexplorado. Se sabe que actúa de manera sinérgica para aumentar la percepción del sabor, por lo que se usa como potencializador de sabor en muchos alimentos comercializados, se asocia su sensación a la presencia del glutamato monosódico que es el encargado de promover la mayor ingesta de los productos al hacerlos más sabrosos y palatables, sin embargo se ha asociado con diversas afecciones en la salud por lo que su uso se está haciendo cada vez más restringido obligando a las diversas empresas que componen la industria alimentaria a buscar sustitutos para dicho compuesto. [11][12]

Tabla 3 Características de los mecanismos de generación de aroma y sabor

Nombre	Mecanismo	Características del sabor
Biosintético	Metabolitos secundarios sintetizados de manera natural durante el desarrollo normal de los tejidos	Terpenos y esteres, cítricos, pimienta y plátano
Acción enzimática directa	Se forman los sabores por acción de las enzimas sobre las moléculas precursoras del sabor directamente	Cebolla por la acción de aliinasa sobre sulfoxidos
Acción enzimática indirecta (oxidación)	Los sabores se forman por la oxidación de los precursores del sabor mediante agentes oxidantes generados enzimáticamente	Presencia de grupos ácidos y carbonilos
Pirólítico	Los sabores se forman de precursores al someter el alimento a tratamientos térmicos	Presencia de pirazinas, derivados furánicos y otros.

- Otros factores influyentes en el sabor

La percepción del aroma y sabor se da precisamente por la interacción de los componentes activos con las proteínas de los centros receptivos y depende en gran medida de factores como pH, temperatura, porcentaje de disociación, textura, condiciones ambientales, interacciones entre las cinco categorías anteriormente mencionadas, modificadoras del sabor y fuerza iónica que afectan la conformidad de la cadena polipeptídica.

Los extremos de temperatura rebajan de manera temporal la sensibilidad a los sabores, la concentración mínima de una sustancia que se puede determinar varía con la textura, por lo que para cada uno de los sabores básicos se requiere una cantidad mínima que es menor en los alimentos líquidos, un poco mayor si es en forma de espumas y mucho mayor si el sabor es en forma de gel, con respecto a la interacción entre los sabores básicos, en muchos casos algunos componentes poseen efectos mutuos enmascarantes, la sal tiende a disminuir el dulzor de la sacarosa, la sacarosa reduce el amargo de la cafeína, el sabor amargo se intensifica con el etanol pero disminuye con la sal.

Los modificadores o potenciadores de sabor son sustancias que aumentan los gustos agradables de los alimentos, son prácticamente carentes de sabor pero cuando se adicionan en muy pequeña porción a los alimentos modifican el sabor, se usan dos grandes compuestos químicos L-aminoácidos y algunos 5' nucleótidos [13]. Los compuestos principales que intervienen en la generación del aroma a carne son moléculas de bajo peso molecular solubles en agua o lípidos

- Mecanismos de generación

Los compuestos del sabor son moléculas que pueden ser o no volátiles, en la actualidad se han reportado más de 10000 diferentes compuestos responsables del aroma y del sabor, en su mayoría volátiles que afectan de manera directa el sentido del olfato pero que por la interacción entre los dos sentidos afectan también el sabor de los alimentos.

Las principales reacciones en la generación de dichos compuestos responsables del aroma y sabor son los descritos en la

Sin embargo, estos cuatro mecanismos de reacción se pueden reunir en dos grandes grupos: biosintético, para todas las transformaciones que ocurren por efectos enzimáticos, teniendo en cuenta los diversos procesos bioquímicos que generan un gran número de compuestos específicos dependiendo del ciclo al que correspondan; térmico, para los mecanismos que se dan por efecto de las altas temperaturas como ocurre en el caso de los productos de origen animal, que

tienen un sabor muy pobre por el mínimo efecto que causan las proteínas en el sabor y solo se desarrolla cuando se expone a este tipo de tratamiento, mejora la textura, aroma y sabor volviéndolo más apetitoso. El papel de la temperatura resulta importante debido a que cada ruta posible tiene una determinada energía de activación que hace que la velocidad de reacción se dé en función de la temperatura y así varíe la vía degradativa y la generación de un determinado compuesto; entre los mecanismos más importantes de tratamiento térmico

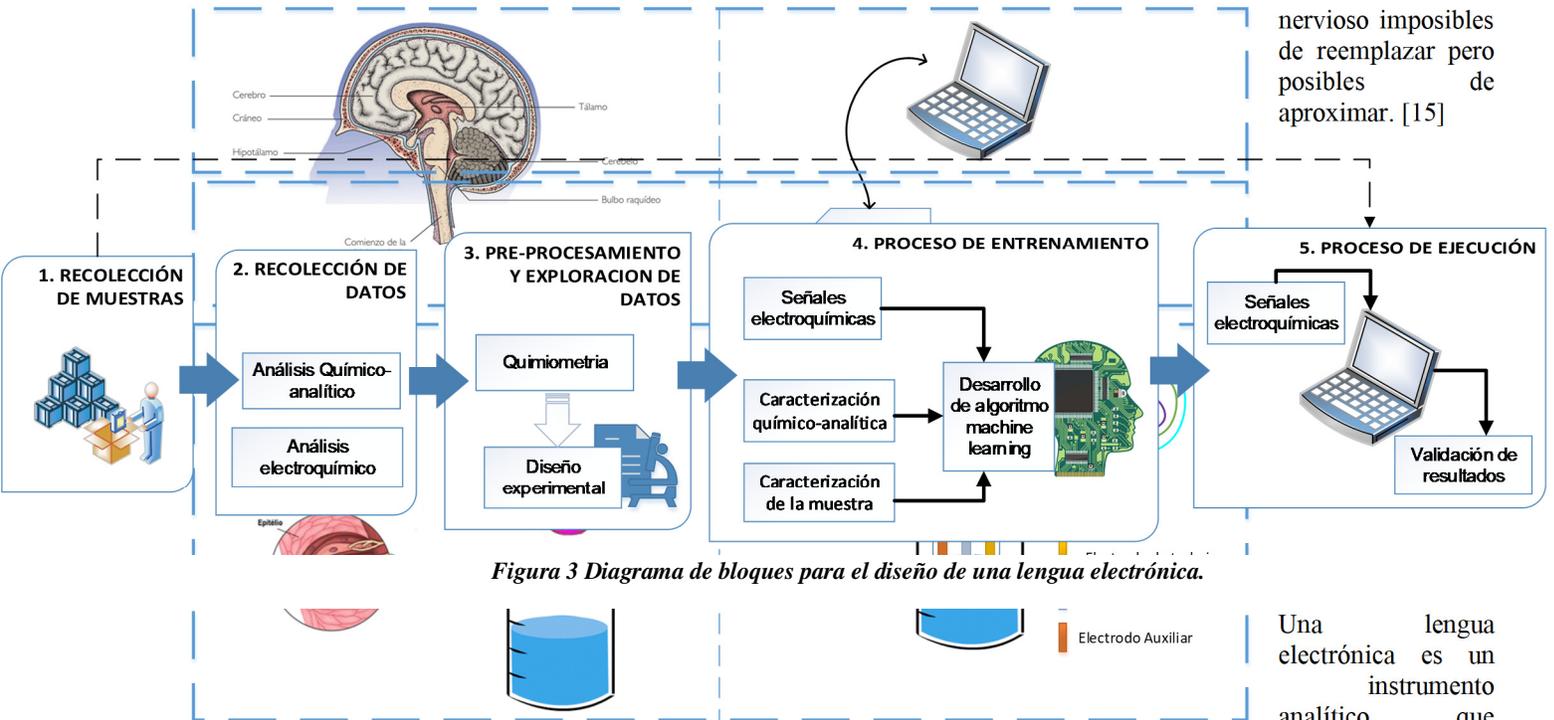


Figura 3 Diagrama de bloques para el diseño de una lengua electrónica.

Figura 2 Paralelo entre la lengua humana y la lengua electrónica

nervioso imposibles de reemplazar pero posibles de aproximar. [15]

Una lengua electrónica es un instrumento analítico que reproduce de forma artificial la sensación del sabor,

se encuentra la reacción de Maillard que se da por la condensación entre compuestos carbonilos y derivados de aminas o por la degradación de compuestos con enlaces dobles conjugados a grupos carbonilo, implica la presencia de carbohidratos en el alimento, tiene diversas vías que resultan en la formación de un gran número de compuestos de bajo peso molecular como aldehídos, cetonas, dicetonas y compuestos que contienen oxígeno, nitrógeno y azufre principalmente. [14]

C. Lengua electrónica

A raíz de las exigencias que surgen con el crecimiento de la industria alimentaria, las empresas que constituyen este sector industrial deben asegurarse de ofrecer las mejores calidades en sus productos para seguir vigentes, como se mencionó anteriormente, el método actual de control de calidad llamado panel de cata presenta dificultades para expresar los diversos grados en que las personas perciben cada una de las sensaciones lo que hace difícil expresar el sabor de manera cuantitativa así existan escalas para tal fin, además, se debe llevar a cabo el proceso en condiciones ideales, las personas encargadas solo pueden realizar un número limitado de muestras por día, deben estar en condiciones óptimas de salud, entre otras para evitar la variabilidad humana, adaptación, fatiga y subjetividad típicos de este tipo de medición. Es por esto que se están implementando nuevas tecnologías como las lenguas y narices electrónicas, estas no reemplazan los órganos ni sentidos (lengua, nariz, sabor, olor) simplemente lo emulan, pues una persona tiene entre 2000 y 8000 papilas gustativas con numerosas terminaciones nerviosas conectadas al sistema

son sistemas basados en múltiples sensores de baja selectividad o sensibilidad cruzada que combinados con herramientas de reconocimiento o de análisis permiten la clasificación de un número de muestras o la cuantificación de algunos de sus parámetros físico-químicos[16]. Está constituida por un sistema automático de conteo, una batería de sensores electroquímicos de distinta especificidad, un sistema de adquisición de datos y un software con el algoritmo apropiado para el procesamiento de la señal obtenida. Cada uno de los sensores que componen la lengua electrónica mide una propiedad determinada, dando como resultado una respuesta única para cada muestra, es decir una huella característica que permite un patrón de reconocimiento. Las lenguas realizan dos acciones específicas que le permiten emular el sentido del gusto humano, la primera es obtener la información o característica de una muestra, para lo que se usan los sensores electroquímicos, y la segunda es interpretar la información por métodos estadísticos multivariados o redes neuronales artificiales [17]. Como se ha mencionado anteriormente, el fundamento del sistema de lengua electrónica está inspirado en los principios del sistema gustativo humano como se aprecia en la Figura 2

La percepción humana depende de interacciones mutuas entre los compuestos, lo que dificulta correlacionar los resultados de un análisis químico con los de la percepción humana, por el contrario la lengua electrónica califica, cuantifica y detecta de manera rápida y objetiva, sin necesidad de separar sus componentes[18]. Para obtener un dispositivo electrónico análogo al sentido del gusto humano es necesario seguir los pasos ilustrados a continuación en la Figura 3.

- **Recolección de muestras**

Es el primer paso para el diseño del dispositivo electrónico, pues el número de muestras debe ser representativo para disminuir los errores en la medida y garantizar que el modelo realizado se aproxime a la realidad. Para determinar el número de muestras requerido es necesario hacer uso de la fórmula del error estándar [19]:

$$n_o = \left(z_{\alpha/2} \frac{\sigma}{e} \right)^2$$

Donde:

z: nivel de confianza que se desea en el experimento

σ : Desviación estandar de las muestras

e: error en las mediciones (se recomienda entre 0,05 y 0,1)

- **Recolección de datos**

Para lograr una máxima aproximación entre una lengua electrónica y la lengua humana es importante recolectar datos de composición química y comportamiento electroquímico de la muestra que se está estudiando, cada tipo de muestra es completamente diferente por lo que la lengua electrónica tiene la característica de ser específica, es decir, para diseñar una lengua electrónica para el estudio de café, vino o leche, se deben realizar todas las pruebas necesarias que permitan recolectar los datos pues las composiciones y comportamientos de cada una de las soluciones brindara una información diferente para alimentar al sistema.

- **Análisis químico-analítico**

La química analítica es una ciencia cuantitativa que desarrolla y mejora métodos e instrumentos para obtener información acerca de la composición y naturaleza química de la materia, aun cuando se requiere una respuesta cualitativa a menudo se usan métodos cuantitativos para obtenerla[20]. Los alimentos tienen una composición química muy variada y usando esta herramienta química se conocen los componentes presentes que pueden ser relevantes a la hora de generar sabores, facilitando toda la información para ser relacionada con la sensorial humana a través de lo que se denominó "la química del sabor". Dependiendo del tipo de muestra se aplican diferentes técnicas de análisis que generalmente comprenden: Cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas, cromatografía líquida (HPLC), humedad, % sólidos, proteínas, cenizas, proteínas entre otros.

- **Análisis electroquímico**

La electroquímica se dedica a estudiar los procesos y diferentes factores que afectan el transporte de carga a través de la interfaz formada entre un electrodo y una solución que están en contacto[21].

Una celda electroquímica consta de dos conductores llamados electrodos sumergidos en una solución electrolítica. Cuando se aplica una tensión externa (V) entre los electrodos y en determinadas circunstancias se produce la circulación de la

corriente eléctrica debido a la transferencia de carga efectuada por las reacciones químicas derivadas de los procesos electroquímicos [22].

Para llevar a cabo un análisis electroquímico se debe realizar una previa caracterización de sensores electroquímicos que son sensores recubiertos con materiales electroactivos para evaluar la viabilidad de las medidas, cada sensor mide una propiedad o especie determinada cuya respuesta permite generar un patrón de reconocimiento.

Existen diversos métodos de análisis electroquímico basados en las medidas de potencial de celdas electroquímicas como: potenciometría y voltametría. La primera es una técnica de medición estacionaria, se basa en la medida de potencial que se encuentra entre dos electrodos cuando se sumergen en una disolución sin circulación de corriente, el potencial obtenido es la diferencia entre los dos potenciales de cada uno de los electrodos. La segunda tiene como objetivo aplicar una tensión controlada a la interfaz del electrodo de trabajo y la disolución y realizar mediciones de la corriente que circula. Para el diseño de la lengua electrónica se recomienda este último método porque permite variar múltiples parámetros relacionados con el barrido de voltaje, tipo de electrodo de referencia, rango de intensidades que brindan una mejor caracterización de las muestras analizadas.

Para ser más específicos, el método electroquímico usado se llama voltametría cíclica donde el potencial aplicado se barre primero en una dirección y luego en la otra mientras se mide la corriente, el intervalo de potencial aplicado es variable y depende del material del electrodo y de la composición de la disolución a la que se sumerge, las corrientes anódicas (negativas) corresponden a procesos de oxidación y disminuyen conforme el potencial se hace más negativo. Una vez esta corriente es cero se concluye que ha terminado el proceso de oxidación, las corrientes catódicas (positivas) están asociadas a procesos de reducción.

Para llevar a cabo una medición de voltametría cíclica es necesario contar con tres electrodos de material conductor adecuado, se trata de pequeños discos planos que se introducen a presión en una varilla de material inerte con un contacto de alambre incorporado controlado por medio de un potencióstato, este, regula la diferencia de potencial entre un electrodo de trabajo y uno de referencia, cada uno de los electrodos que componen el sistema tienen una función específica que se describe a continuación:

- Electrodo de trabajo: Es donde ocurre la reacción de interés, donde se oxida o reduce el analito

- Electrodo de referencia: Mantiene un potencial fijo, por tanto cualquier cambio que ocurra en la celda se va a atribuir al electrodo de trabajo

- Electrodo auxiliar: Es donde se inyecta corriente a la celda.

Los resultados obtenidos se ilustran en un voltamograma que grafica la corriente en función del potencial aplicado, un solo voltamograma permitirá la determinación cuantitativa de dos o más especies siempre y cuando exista una diferencia suficiente entre los potenciales de onda medidos para posibilitar la evaluación de las corrientes de difusión de cada especie [23]

- Pre procesamiento y exploración de los datos

La excesiva información puede dificultar el tratamiento de datos, por lo que se debe realizar un pre tratamiento que busca reducir el número de variables sin que esto implique una pérdida de información, para el caso particular de los datos obtenidos en la fase anterior se usan métodos quimiométricos.

- Análisis quimiométrico

La quimiometría es el área de la química que utiliza la matemática y la estadística en la solución de problemas químicos facilitando el manejo de grandes cantidades de datos. Muchos factores afectan los resultados experimentales y pueden necesitarse diseños experimentales bastante complejos, la quimiometría busca la optimización de las condiciones experimentales a través de la selección de procedimientos óptimos, proporcionando la máxima información química relevante a través de análisis químicos y detectar relaciones entre los datos eliminando la información redundante [20].

Tras realizar el análisis quimiométrico se identificaron los factores que más influencia tienen en el resultado del experimento, lo que permite pulir la red de sensores y definir cuáles de las variables estudiadas va a brindar mayor información para el estudio, esto permite diseñar la interfaz física de la lengua electrónica que se compone de tres electrodos descritos anteriormente, el número de electrodos de trabajo depende de los componentes a caracterizar electroquímicamente en la solución y se conectan a un multiplexor que recibe todas estas entradas y envía una sola salida de interés al potenciostato que recibe además las entradas de los electrodos de referencia y auxiliar, se conecta a su vez con una tarjeta de adquisición de datos que se encarga de pasar la señal analógica que proviene de los sensores a una señal digital que se procesará con un software adecuado, la interfaz física de la lengua electrónica descrita anteriormente se observa en la Figura 4

- Aprendizaje de máquina

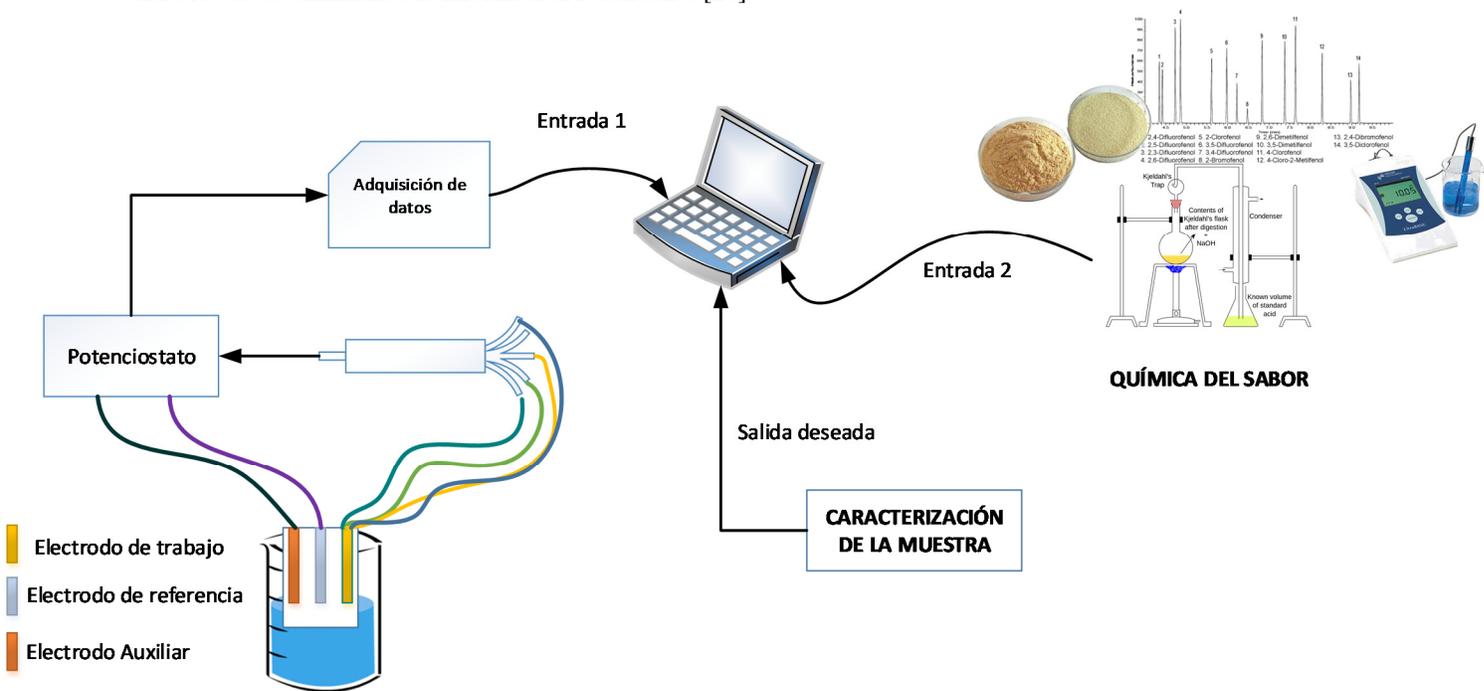


Figura 4 Diseño de la interfaz física de la lengua electrónica, para entrenamiento.

La herramienta estadística normalmente usada es el análisis de componentes principales (PCA) que busca la proyección según la cual los datos quedan mejor representados en términos de mínimos cuadrados, se emplea en la obtención de patrones de clasificación entre muestras porque explica la varianza entre los datos originales, permite encontrar las tendencias de agrupamiento entre los objetos por medio de la visualización de la estructura latente de datos mediante gráficas analizando varias variables de manera simultánea [18].

- Diseño experimental

Debido a la cantidad de sensores que pueden estar presentes en el análisis de una muestra, es necesario identificar de esos sensores cuáles realmente aportan a la caracterización de la misma. Teniendo en cuenta esto, es ideal empezar con un análisis de componentes principales (PCA), el cual tome como entradas las diferentes variables medidas e indique cuáles de esas variables, realmente aportan a la calificación final del producto analizado, ya que es probable que algunas variables puedan agregar ruido a la información procesada y en vez de ayudar a dar una clasificación acertada, puedan llevar a una errónea.

Después de disminuir la cantidad de variables, estas deben pasar por un proceso de aprendizaje de máquina que se utiliza para el reconocimiento de patrones, es decir, con el descubrimiento de regularidades en los datos a través algoritmos computacionales y con el uso de dichas regularidades para tomar acciones tales como la clasificación de datos en diferentes categorías.[24]

permite identificar una salida correspondiente a la variable obtenida.

La interfaz de salida del programa que controla este sistema de inteligencia artificial, va a poder mostrar al usuario de la lengua electrónica, una representación numérica o gráfica que puede tener valores correspondientes a la calificación de las variables

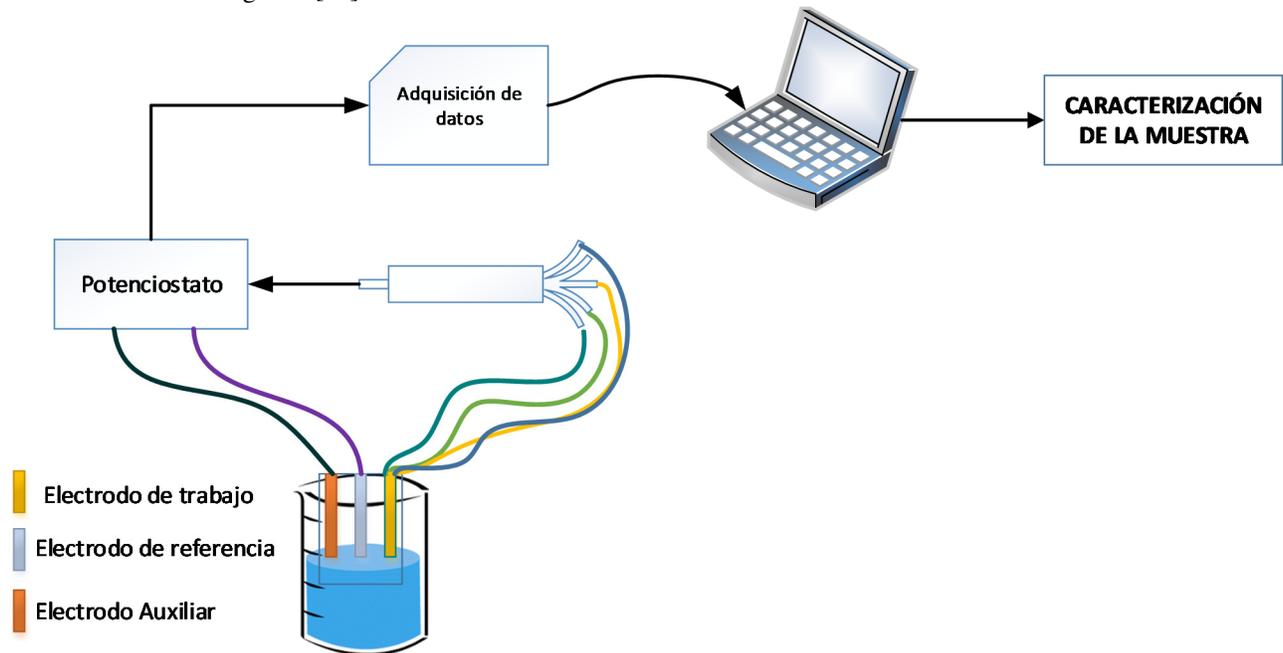


Figura 5 Diseño de la interfaz física de la lengua electrónica, para ejecución

Una de las técnicas más utilizadas en la clasificación de los datos es las redes neuronales artificiales, las cuales se basan en unidades básicas de información llamadas neuronas, la interconexión de las mismas y el peso asociado a dichas interconexiones. Para el entrenamiento de estas redes, se utiliza normalmente un aprendizaje supervisado que toma un conjunto de patrones como referencia para efectuar el entrenamiento y luego se verifica el mismo con otro conjunto de patrones de validación.

III. RESULTADOS.

Una lengua electrónica genérica, corresponde básicamente al sistema mostrado en la Figura 4, este esquema es válido para el proceso de entrenamiento, es decir cuando se utilizan datos de referencia con los que se le va a enseñar al sistema de aprendizaje de máquina las características relevantes a los diferentes sabores asociados con dicho producto.

Una vez que se ha realizado el aprendizaje del sistema de inteligencia artificial, se tiene un sistema como el de la Figura 5 que captura las variables adecuadas desde los sensores de entrada a través del potenciómetro y después de ser digitalizado, pasa al sistema de cómputo alimentado con el sistema de inteligencia artificial, que va a dejar de estar en fase de entrenamiento, para estar en una fase de ejecución, la cual

medidas. El diagrama que representa el sistema ya entrenado, se puede observar en la Figura 5

IV. DISCUSIÓN.

En procesos de control de calidad en la industria de alimentos, pueden ser útiles los sistemas que proporcionen una medida de la calidad de los mismos, teniendo en cuenta que los sensores a utilizar pueden trabajar sobre parámetros volátiles o sobre sustancias solubles que proporcionen la información relevante. Las lenguas electrónicas son útiles en aplicaciones donde se puede trabajar con materiales que se puedan diluir para su medida. Es importante conocer también los atributos de sabor asociados con los mismos, para poder identificar qué tipo de sensores pueden aportar la mayor información sobre la misma. Además, se requiere conocer a través de sistemas de análisis de componentes principales que variables aportan información relevante. Por último, con un módulo de inteligencia artificial se procede a la clasificación de los productos.

V. CONCLUSIONES

- El pleno conocimiento de la química del sabor permite mayores aproximaciones entre el sentido del gusto humano y la lengua electrónica ya que toma en cuenta consideraciones como la correlación existentes entre los diversos sabores.

- Los sensores seleccionados son de vital importancia para los prototipos de lengua electrónica porque de ellos depende la capacidad de diferenciar sustancias con diversas propiedades de sabor, es decir la capacidad de aportar una huella digital de cada una de las muestras estudiadas.
- El estudio quimiométrico optimiza el proceso porque permite pulir la red de sensores discriminando los datos por su capacidad de aportar información característica de las muestras estudiadas.

-

REFERENCIAS

- [1] R. Alimentos, "Las 200 empresas más vendedoras de la industria de alimentos," 2011. [Online]. Available: <http://revistaalimentos.com.co/ediciones/ediciones-2012/edicion-28/especial-28/las-200-empresas-mas-vendedoras-de-la-industria-de-alimentos.htm>.
- [2] O. D. E. Aceite, D. E. O. En, L. A. Comarca, C. D. E. Montiel, E. S. El, E. D. E. Las, P. Organolépticas, and E. D. E. L. O. S. Catadores, "EL PANEL DE CATA :," pp. 1–6, 2002.
- [3] N. Materiales, "Lengua electrónica :," 2011.
- [4] J. duran Vanegas, *Análisis Químico aplicado*. cali: Universidad de San Buenaventura, 2010.
- [5] E. Bash, "Análisis multivariado para la identificación de componentes generadores de sabor y aroma en productos alimenticios," *PhD Propos.*, vol. 1, 2015.
- [6] R. Bibliografica, "La Calidad de los Alimentos," p. 124, 2013.
- [7] D. V. Smith and R. F. Margolskee, "El sentido del gusto.," *Investigación y ciencia*, vol. 296. pp. 4–13, 2001.
- [8] C. Rivera and R. J. Maria, "La química del sabor.," *Universiad de Veracruz*, 2014.
- [9] U. D. E. L. Valle and V. Académica, "Química orgánica general," 2001.
- [10] C. R. Fennema, *Introducción a la ciencia de los alimentos*, S.A, Rever. Madison, Winsconsin.
- [11] S. Badui Dergal, *Química de los alimentos*. 2006.
- [12] M. E. Arteaga Sánchez, "Efectos de la dieta alta en glutamato monosódico sobre el peso corporal, la preferencia de sabores y el aprendizaje contextual en ratas. Universidad Autonoma de Queretaro. Facultada de Ciencias Naturales. Licenciatura en Nutricion.," pp. 0–52, 2012.
- [13] R. I. R. Acero, "Curso Química de alimentos." Universidad nacional abierta y a distancia, Duitama, 2009.
- [14] F. Jousse, T. Jongen, W. Agterof, S. Russell, and P. Braat, "The Maillard Reaction," *Food Sci.*, vol. 67, no. 7, pp. 2534–2542, 2002.
- [15] L. Gutierrez Osuna Ricardo, Marco Colas Santiago, Pardo Martinez Antonio, Perera Lluna Alexandre, Sundic Teodor, "Instrumento y método para el análisis, identificación y cuantificación de gases o líquidos," WO2002077631 A1, 2002.
- [16] Ms. Y. Y. Rios Díaz, P. C. M. Duran Acevedo, and P. (c. M. Cuenca, "Discriminación De Hidromieles a Través De Una Lengua Electrónica," *Rev. Colomb. Tecnol. Av.*, vol. 1, p. 8, 2014.
- [17] R. L. Tarazona and Á. A. Arrieta, "" Sistemas de Medición Multicanal en una Lengua Electrónica utilizando Labview .""
- [18] N. Castañeda, Prieto, "Tesis doctoral: implementación de un sistema de evaluación sensorial electrónico para el control de calidad de vinos.," p. 300.
- [19] W. A. Lozano-rivas, "Determinación del numero minimo de observaciones en investigación, obviando las estimaciones de la varianza de datos," pp. 54–61, 2011.
- [20] J. N. Miller and J. M. Miller, "Estadística y quimiometría para química analítica," *Editorial Prentice Hall.*, p. 296, 2002.
- [21] C. G. Zoski, "Conceptos básicos Electroquímica," *Handb. Electrochem.*, 2007.
- [22] S. W. Holler, "Fundamentos de Química Analítica (8a ed) - Skoog West Holler.pdf." .
- [23] H. H. W. L. L. M. J. J. A. D. F. A. S. Jr, *Metodos instrumentales de analisis*. Michigan: Enrique Fradera T., 1991.
- [24] C. Bishop, *Pattern recognition and machine learning*. Singapore: Springer, 2006.