

# Integración de estaciones KNARIO con un sistema de información geográfico para el monitoreo de la calidad del aire en la zona metropolitana de La Laguna

H. Coto-Fuentes<sup>1</sup>, F. Valdés-Perezgasga<sup>2</sup>, K.V Guevara-Amatón<sup>2</sup>, K. Limones-Ríos<sup>2</sup>, C.I Calderón-Ibarra<sup>1</sup>

**Resumen**—La mala calidad del aire es un riesgo invisible para las ciudades y el medio ambiente. Para disminuir los niveles de contaminación en el aire es preciso primero tener mediciones, de preferencia en tiempo real. Una vez medida la contaminación se pueden diseñar acciones de políticas públicas que ayuden a reducir dichos valores, actualmente en ascenso a nivel mundial.

Principalmente en zonas urbanas, el aire contiene partículas, gases y agentes biológicos nocivos. La utilización de las estaciones KNARIO, integradas a un Sistema de Información Geográfico y un diseño de rutas ciudadanas, permite un mapeo dinámico de los contaminantes criterio, facilitando la recolección, gestión y análisis de los datos recopilados en la zona metropolitana de la Laguna. La información obtenida es publicada haciendo uso de las APIs de Google, permitiendo su consulta desde cualquier navegador WEB.

**Palabras claves**— calidad del aire sistema de información geográfica,

**Abstract**—Bad air quality is often an invisible risk for the health of the population and for the environment. To improve air quality in urban areas precise and abundant measurements are needed, in real time if possible. Measurements are a prerequisite for the design of adequate public policy actions regarding air quality.

In urban areas, the air we breathe contains particles, gases and harmful biological agents. The use of KNARIO air-quality stations, integrated to a geographic information system (GIS), in a specially designed set of routes and points allows for the dynamic mapping of pollutants. Information thus collected will be published using Google's APIs allowing for its display using any web navigator.

**Keywords**— air quality, geographic information system

## I. INTRODUCCIÓN

La mala calidad del aire es un riesgo grande para la salud [1][2]. Para disminuir los niveles de contaminación del aire es preciso primero tener mediciones, de preferencia en tiempo real. Una vez medida la contaminación, se pueden diseñar acciones de política pública que ayuden a reducir el número de crisis cardiorrespiratorias, accidentes

cerebrovasculares, cánceres de pulmón y patologías respiratorias crónicas y agudas, como el asma [3].

En la actualidad pocas zonas urbanas de México cuentan con sistemas de monitoreo efectivos que comuniquen a la población la manera de conducir sus vidas ante eventos de contaminación. La mayoría de los sistemas de medición de la calidad del aire (SMCAs) que existen, se encuentran dispersas en 30 de las entidades federativas (Quintana Roo y Baja California Sur no tienen), y son de tipo estacionaria, por lo que a pesar de encontrarse integradas al Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire (SINAICA), la información que se obtiene de ellas es insuficiente, o no muestra una perspectiva más dinámica y abarcadora de la situación de los contaminantes en el aire [1][4].

Principalmente en zonas urbanas, el aire contiene contaminantes en forma de partículas, gases o agentes biológicos, muchos de ellos con potenciales efectos nocivos para la salud. Como resultado de una mayor conciencia de la importancia de la calidad del aire, los gobiernos y la presión social han obligado a la industria y a los fabricantes de automóviles a tomar medidas para disminuir la carga de contaminantes emitidos a la atmósfera. Sin embargo, en países subdesarrollados o en vías de desarrollo, estas medidas son más flexibles, por lo que la sobrepoblación, junto a otros factores, han incidido para que la disminución de la calidad del aire en sus ciudades vaya en ascenso.

### A. Antecedentes

Desde inicios de 1950 se observó en América Latina y el Caribe un incremento de la preocupación por la calidad del aire. En 1965 la Organización Panamericana de la Salud (OPS) recomendó el establecimiento de programas de investigación orientados a determinar la contaminación en las aguas y el aire, con el objetivo de colaborar con los gobiernos en el desarrollo de políticas adecuadas de control. En junio de 1967, la Red Panamericana de Muestreo Normalizado de la Contaminación de Aire (REDPANAIRES) inició sus operaciones con la recolección mensual de polvo sedimentable (PS), muestras diarias de partículas totales en suspensión (PTS) y de SO<sub>2</sub> en ocho estaciones. Para finales

<sup>1</sup> Instituto Tecnológico Superior de Lerdo, Av. Tecnológico 1555 Sur, Periférico Gómez-Lerdo, Ciudad Lerdo, Durango C.P. 35150.

\* hesnercf@itslerdo.edu.mx

<sup>2</sup> Instituto Tecnológico de la Laguna, Blvd. Revolución y Av. Instituto Tecnológico de La Laguna, Torreón, Coahuila, C.P. 27000.

de 1978 ya contaba con 88, distribuidas en 26 ciudades de 14 países.

En 1980 REDPANAIRE desapareció, integrada al Programa Global de Monitoreo de la Calidad del aire, proyecto iniciado por la Organización Mundial de la Salud (OMS) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). En la década del 1980 varias ciudades importantes operaron redes de monitoreo de la calidad del aire, midiendo principalmente SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO, ozono, PTS y plomo, siempre consientes de la cantidad insuficiente de estaciones debido a la escasez de recursos [5].

El monitoreo de la calidad del aire es el resultado del diseño e instalación de redes de estaciones, los procedimientos de muestreo y el análisis de los contaminantes atmosféricos. Entre los contaminantes atmosféricos más importantes que se monitorean están: SO<sub>2</sub>, CO, PST, PM10, ozono y óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>). A este grupo de elementos se les conoce como contaminantes criterio, para los cuales existen normas de calidad del aire. La finalidad de las normas es proteger la salud humana, así como el bienestar de los ecosistemas.

La única forma de saber con certeza si existe, si se están generando, o si se están empeorando los problemas de la contaminación del aire es mediante la medición de los mismos. México cuenta con ciudades con buena capacidad de monitoreo, pero existe una diferencia notable entre las capacidades de monitoreo de cada ciudad y/o estado. Siendo la mayoría de las estaciones disponibles estacionarias y de gran volumen, encontrándose algunas de tamaño medio, pero aún grandes para poderlas considerar móviles.

La existencia de un sistema que integre varias estaciones portátiles (fáciles de trasportar), sienta las bases para realizar interpolaciones mediante un sistema de información geográfica (SIG), obteniendo como resultado la distribución probable de los contaminantes en toda un área a partir de las mediciones puntuales de cada estación. Las estaciones KNARIO son un prototipo de estación portátil con las capacidades de medición de contaminantes criterio, además de conectividad con la nube vía Wifi y GSM, permitiendo la actualización de los datos mientras son adquiridos y geolocalizados.

## II. PARTE TÉCNICA DEL ARTÍCULO

Para la integración de las estaciones KNARIO y el Sistema de información geográfica la metodología propuesta fue:

- Valoración y selección de los contaminantes criterio a medir de acuerdo a las normas oficiales mexicanas: NOM-020-SSA1-2014, NOM-021-SSA1-1993, NOM-022-SSA1-2010, NOM-023-SSA1-1993, NOM-025-SSA1-2014, NOM-026-SSA1-1993.

- Valoración y selección de los sensores para la medición de los contaminantes criterio seleccionados.
- Valoración y selección de los componentes necesarios para el posicionamiento geográfico.
- Valoración y selección de servicios para operación en la nube del Sistema de Información Geográfica.
- Integración de la estación portátil de calidad del aire.

### A. Estaciones KNARIO

Teniendo en cuenta las premisas fundamentales: pequeño tamaño, sencillas de utilizar, con conectividad y geolocalización, a continuación, se relacionan las distintas partes que conforman las estaciones KNARIO.

Para la medición de los contaminantes criterio se seleccionó el módulo ZPHS01B, el cual integra elementos de medición para la mayoría de los gases y partículas, además de otros que podrían considerarse de importancia, como compuestos orgánicos volátiles en el aire, temperatura y la humedad. La Tabla I muestra un resumen del módulo en cuestión.

TABLA I. CARACTERÍSTICAS DEL MÓDULO ZPHS01B

Modelo	ZPHS01B	
Señal de salida	UART (TTL)	
PM2.5	Rango	0~1000 µg/m3
	Rango de tamaño de partículas	0.3-10µm(PM1.0, PM2.5, PM10)
CO <sub>2</sub>	Rango	0~5000 ppm
	Precisión	±(50ppm+5% of reading value)
O <sub>3</sub>	Rango	0~10 ppm
	Resolución	0.01 ppm
	Precisión	± 0.1ppm, para concentraciones ≤1ppm; ±20% rango completo, para concentraciones sobre 1ppm;
NO <sub>2</sub>	Rango	0.1~10 ppm
	Resolución	0.05ppm

Para el control de los distintos elementos, así como para el procesamiento de todos los datos y su subsecuente transmisión a la nube, se evaluaron dos plataformas diferentes de procesadores: PSoC y ESP32. Ambas

plataformas cuentan con entradas y salidas programables, además de módulos internos de conversión análogo - digital y vice versa. Cuentan con puertos UART para interacción con periféricos y pueden equiparse con electrónica para garantizar la comunicación WiFi y Bluetooth.

En la Figura 1 se muestra una comparativa entre ambos microcontroladores. El PSoC destaca por sus capacidades analógicas y de comunicación cableada, mientras que el ESP32 por sus ventajas en cuanto a comunicación inalámbrica, tamaño y pantalla.

Criterio	PSoC (CY8CKIT-059)	ESP32 (Core2)
Conversores DAC	8	2
Comparadores	4	0
OPAMP's	4	0
GPIO's	62	20
Puertos serie físicos	Hasta 15	2
Bluetooth (LE)	No	Si
WiFi	No	Si
Tamaño	24 x 55 mm	55 x 55 mm
Pantalla	No	Si

Figura 1. Características de tablas de desarrollo

La comunicación inalámbrica, particularmente el Wifi, fue el determinante para la selección del ESP32 sobre los PSoC. Más era necesario también, dentro de los fabricantes que lo utilizan, seleccionar una plataforma que permitiera un desarrollo rápido, robusto y flexible.

Dentro de la variedad de opciones que existen en el mercado utilizando como núcleo el ESP32, se propuso la plataforma M5Stack "Core2 for AWS", por su versatilidad, concepto modular y comunidad de desarrollo. El mismo cuenta con 2 puertos UART para comunicación con dispositivos externos, es capaz de alimentar el módulo de medición de gases previamente seleccionado y además cuenta con una pantalla LCD con capacidad táctil integrada, útil para la interacción con el usuario. En la Figura 2 se muestra un resumen de los elementos que incluye el módulo seleccionado, a los que se agregan su tamaño reducido y el integrar el chip ATECC608A, el cual maneja el encriptado de datos para la comunicación con los servidores de *Amazon Web Services*, para la conexión con la nube y la publicación de datos en línea.



Figura 2. Especificaciones del módulo Core2 for AWS

Para la comunicación con internet se optó por la utilización del módulo COM.X NB-IoT (SIM7020G), integrante de la plataforma M5Stack con todas las características necesarias para el desarrollo de aplicaciones de Internet de las Cosas. La Figura 3 muestra el aspecto apilable del módulo NB-IoT con el CORE2.



Figura 3. Módulo NB-IoT SIM7020G.

Las etiquetas de geolocalización se obtienen a partir del módulo GPS u-blox NEO-M8N, también apilable, cuenta con antenas interna y externa, facilitando la obtención de la hora, fecha, longitud y latitud de las mediciones.

La Figura 4 muestra una representación 3D de toda la estación KNARIO, encargada de la adquisición, geolocalización y transmisión de las variables de calidad del aire a la nube. Se puede apreciar también la disposición del módulo de medición en un canal de aire forzado (uso de

ventilación), junto a las baterías de litio 18650 y el centro de carga correspondiente.

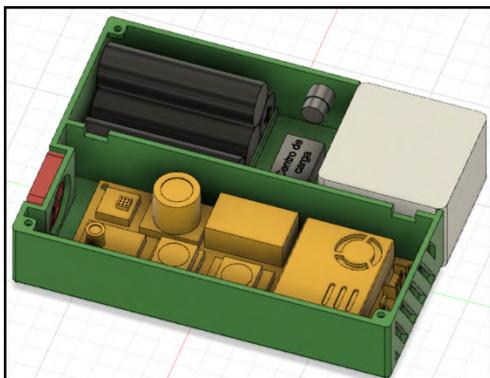


Figura 4. Representación 3D del ensamble de las partes de KNARIO.

### B. Comunicación entre módulos y con la nube

La comunicación entre el CORE2 y el módulo multisensor se realiza a través de UART, utilizando un protocolo maestro-esclavo basado en comandos. La Figura 5 muestra la estructura de la trama de datos enviada por el módulo ZPHS01B por cada medición solicitada, mientras que la Tabla 2 relaciona cada byte recibido con el cálculo del valor de su variable correspondiente.

BYTE 0	BYTE 1	BYTE 2	BYTE 3	BYTE 4	BYTE 5	BYTE 6	BYTE 7	BYTE 8	BYTE 9
Start bit	Command	PM1.0		PM2.5		PM10		CO2	
0xFF	0x86	0x00	0x85	0x00	0x36	0x00	0x96	0x01	0x9A
BYTE 10	BYTE 11	BYTE 12	BYTE 13	BYTE 14	BYTE 15	BYTE 16	BYTE 17	BYTE 18	BYTE 19
VOC	Temperatura		Humedad		CH2O		CO		O3
0x00	0x02	0xFD	0x00	0x28	0x00	0x28	0x00	0x05	0x00
BYTE 20	BYTE 21	BYTE 22	BYTE 23	BYTE 24	BYTE 25				
O3	NO2		Reservado	Reservado	Check Sum				
0x20	0x00	0x50	0x00	0x00	0xEA				

Figura 5. Estructura de la trama enviada por el ZPHS01B.

Tabla II.  
Distribución de la trama en Bytes para las variables del módulo ZPHS01B.

PM1.0	Ug/m3	$(\text{Byte}2 * 256 + \text{Byte}3) \text{ug}/\text{m}^3 = 101 \text{ug}/\text{m}^3$
PM2.5	Ug/m3	$(\text{Byte}4 * 256 + \text{Byte}5) \text{ug}/\text{m}^3 = 54 \text{ug}/\text{m}^3$
PM10	Ug/m3	$(\text{Byte}6 * 256 + \text{Byte}7) \text{ug}/\text{m}^3 = 150 \text{ug}/\text{m}^3$
CO2	ppm	$(\text{Byte}8 * 256 + \text{Byte}9) \text{ppm} = 410 \text{ppm}$
VOC	0~3 grade	
Temperature	0.1°C	$((\text{Byte}11 * 256 + \text{Byte}12) - 500) * 0.1^\circ\text{C} = 26.5^\circ\text{C}$ For example: byte11=0x01, byte12=0x59 $((\text{Byte}11 * 256 + \text{Byte}12) - 500) * 0.1^\circ\text{C} = -15.5^\circ\text{C}$
Humidity	%RH	$(\text{Byte}13 * 256 + \text{Byte}14) \% \text{RH} = 40 \% \text{RH}$
CH2O	0.001mg/m3	$(\text{Byte}15 * 256 + \text{Byte}16) * 0.001 \text{mg}/\text{m}^3 = 0.040 \text{mg}/\text{m}^3$
CO	0.1ppm	$(\text{Byte}17 * 256 + \text{Byte}18) * 0.1 \text{ppm} = 0.5 \text{ppm}$
O3	0.01ppm	$(\text{Byte}19 * 256 + \text{Byte}20) * 0.01 \text{ppm} = 0.32 \text{ppm}$
NO2	0.01ppm	$(\text{Byte}21 * 256 + \text{Byte}22) * 0.01 \text{ppm} = 0.80 \text{ppm}$

Para la comunicación de la estación con la nube se seleccionó el protocolo MQTT. El mismo define dos tipos de entidades en su red, un mediador de mensajes (*broker* en inglés) y un número de clientes. El mediador es un servidor que se encarga de recibir todos los mensajes que los clientes envían, y después re enviarlos a su destino apropiado. Los mensajes se estructuran utilizando una jerarquía de temas. Cuando un cliente envía un mensaje al mediador, lo hace bajo un tema y/o uno o más subtemas. Un cliente puede, además de enviar mensajes, suscribirse a uno o más temas. El mediador utiliza estas suscripciones para saber a dónde enviar los mensajes recibidos. La conexión entre el mediador con cada cliente, puede ser unidireccional, solo publicar o solo suscribirse, o puede ser bidireccional, en caso de que publique y lea mensajes.

### C. Sistema de información geográfica

Para la representación de los datos recopilados por las estaciones KNARIO fueron evaluadas varias plataformas. Entre ellas AWS, Adafruit, Ubidots, Pubnub, Thingspeak, Arduino y Google Cloud, todas con capacidades de manejo de mensajería MQTT y bases de datos. También se desarrolló una variante de servicio propio utilizando las APIs de Google orientadas a geolocalización.

## III. RESULTADOS

En la Figura 6 se muestra el aspecto físico del módulo multisensor junto a las mediciones mostradas en la pantalla del CORE2. Para poner a prueba el módulo multisensor, sin llegar a un procedimiento de calibración, se utilizó una campana de vacío, con la que se aisló la estación del medio para garantizar la menor variación de los contaminantes criterio medidos. Bajo estas condiciones los valores obtenidos fueron los esperados, mostrando variaciones por debajo del 1% en todas las variables.



Figura 6. Mediciones realizadas en la etapa de pruebas.

En la Figura 7 se muestra el aspecto final de las estaciones KNARIO. Con un peso considerablemente inferior a los 500g, el tamaño de las estaciones permite su fácil transportación en cualquier medio motorizado o no. La frecuencia mínima de muestreo quedó fijada cada 5 segundos, siendo seleccionable según las condiciones de medición (estacionaria, en bicicleta, medio de transporte motorizado). Es importante destacar que aún falta

experimentación para determinar la mejor frecuencia de muestreo según sea el caso.



Figura 7. Aspecto final de las estaciones KNARIO.

En la Figura 8 se muestra el aspecto básico de la plataforma Ubidots para mostrar datos geolocalizados. Dicha plataforma permite la modificación de la interfaz al público de una manera rápida e intuitiva, sin la necesidad de conocimientos profundos de programación. Característica que se consideró importante teniendo en cuenta que en el futuro la plataforma podría ser utilizada por personal de la dirección de medio ambiente de Coahuila o Durango (operación y mantenimiento).

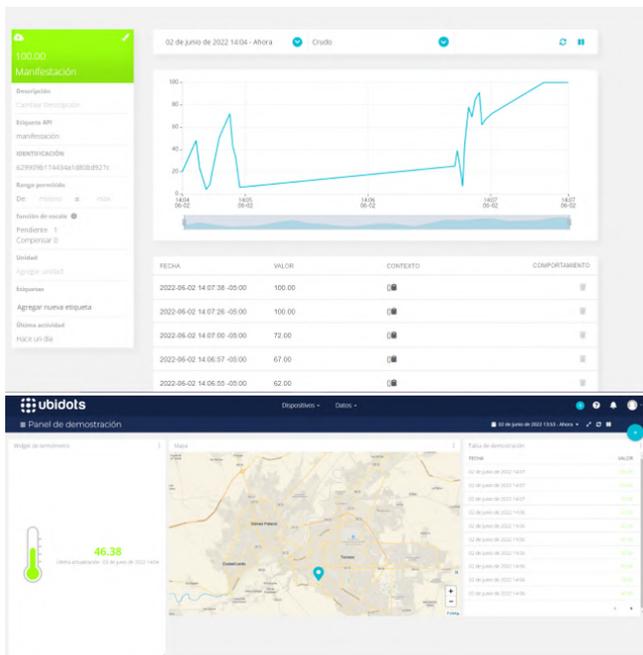


Figura 8. Tablero de la plataforma Ubidots.

#### IV. DISCUSIÓN, CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES

Las estaciones KNARIO en funcionamiento demostraron la viabilidad de los distintos módulos seleccionados, logrando la medición de cinco contaminantes criterio de los 6 normados en México, además de la correspondiente conexión con la nube para el almacenamiento y posterior publicación de las mediciones. El bajo costo de las estaciones, en comparación con las utilizadas hasta el momento por las entidades gubernamentales, junto a su portabilidad y movilidad, permitirán un aumento considerable de la densidad de estaciones, y con ello, del volumen de datos recopilados.

Las dos familias de microcontroladores evaluadas demostraron ser excelentes candidatos para el control de las estaciones, permitiendo grados de acondicionamiento, procesamiento y conectividad acordes a las nuevas tecnologías. El manejo de la energía fue otro punto a favor, garantizando un uso eficiente de las baterías y con ello la portabilidad que se propone.

De las plataformas analizadas para la integración de KNARIO con un SIG destacaron Ubidots y Google Cloud. La primera como la opción más viable para cambiar la interfaz y mantener las funcionalidades del sitio (mantenimiento) con un conocimiento mínimo de programación web, mientras que la segunda destacó al momento de desarrollar desde cero la plataforma, utilizando los principales lenguajes de programación en ambientes web junto a las APIs de google. Desde el punto de vista de costos, falta utilizar más extensivamente el sitio, lo que permitiría evaluar los montos de tráfico, almacenamiento en bases de datos, entre otras.

Actualmente los trabajos continúan en la creación de procedimientos que permitan una calibración rápida y sencilla de las estaciones, así como en la planificación de las principales rutas a mapear en la zona metropolitana de la Laguna, de manera que la información recabada pueda ser utilizada como herramienta para la toma de decisiones por parte de los distintos niveles de gobierno.

#### V. AGRADECIMIENTOS

Este proyecto fue financiado parcialmente por el Tecnológico Nacional de México y la Secretaría de Medio Ambiente de Coahuila de Zaragoza. Uno de los autores (K. Limones-Ríos) recibió una beca del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México.

## VI. REFERENCIAS

- [1]Zuk, M. (2007). “Tercer almanaque de datos y tendencias de la calidad del aire en nueve ciudades mexicanas”, Instituto Nacional de Ecología.
- [2]Martínez, C. A. R., & Izaguirre, J. A. H. (2012). “Sustentabilidad y medio ambiente: Reglamentación de la contaminación atmosférica en México.”, DELOS: Desarrollo Local Sostenible, 5(15), 22.
- [3]Corona-Zambrano, E. A., & Rojas-Caldelas, R. I. (2009) “Calidad del aire y su incorporación en la planeación urbana: Mexicali, Baja California, México”, Estudios fronterizos, 10(20), 79-102.
- [4]Villaseñor, S. Z. H. (2016) “ESTUDIO DE EMISIONES VEHICULARES CON SENSOR REMOTO EN LA CIUDAD DE VICTORIA DE DURANGO, DGO”, 63.
- [5]Korc, M., & Sáenz, R. (1999). “Monitoreo de la calidad del aire en América Latina”, Korc Marcelo E, 1-22.



**Calderón Ibarra Cecilia Inés.** Egresada del Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey Campus Laguna con Licenciatura en Contaduría Pública y Finanzas con Distinción en Impuestos. Maestría en Administración y Doctorado en Educación, ambos por la Universidad Autónoma de la Laguna. Cuenta con 2 Certificaciones Internacionales, la primera como Docente avalado por “Time to teach” por Brandon University y la segunda en Psicoanálisis por la Cámara Internacional de Conferencistas a través del Instituto Inteligente de Profesionalización A.C. Actualmente se desempeña como Docente del Instituto Tecnológico Superior de Lerdo.

## VII. BIOGRAFÍA



**Coto Fuentes Hesner.** Ingeniero en Automática egresado del Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, La Habana, Cuba. Maestro en Diseño de Sistemas Electrónicos por el Centro de Investigaciones en Microelectrónica, La Habana, Cuba, y Doctor en Ciencias en Ingeniería Eléctrica con especialización en Instrumentación Electrónica por el Instituto Tecnológico de la Laguna, Torreón, Coahuila, México. En su trayectoria como docente

- investigador se ha especializado en las áreas de Instrumentación Virtual y desarrollo de sistemas electrónicos aplicados a la medicina, la industria y el medio ambiente.



**Valdés Perezgasga Francisco.** Investigador Titular del Instituto Tecnológico de La Laguna. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores desde 1986, actualmente Nivel II. Doctor en Química por la Universidad de Newcastle upon Tyne, Reino Unido, 1990. Co-autor de más de 50 artículos en revistas internacionales, indizadas y arbitradas, en temas de instrumentación electrónica y electroquímica de aplicación médica, industrial y medioambiental. Ciudadano Distinguido de

Torreón por Méritos Académicos en 2001.



**Guevara Amato Karla Victoria.** Profesora del departamento de Química-bioquímica en el Instituto Tecnológico de la Laguna desde febrero 2010, cuenta con estudios de Ingeniería Química, Maestría en Ciencias en Procesos Sustentables por la Universidad Autónoma de Nuevo León y Doctorado en Ciencias en Ingeniería eléctrica por el Instituto Tecnológico de la Laguna. Los trabajos de investigación en los que ha colaborado están relacionados directamente con la industria

minera-metalúrgica y el medio ambiente.



**Limones Ríos Kristian Azel.** Curso la licenciatura en Ingeniería Electrónica en el instituto tecnológico superior de lerdo, Lerdo, Durango, en 2020. Cursa actualmente la Maestría en ciencias en Ingeniería Eléctrica dentro de la línea de investigación de Instrumentación Electrónica en el Instituto Tecnológico de la Laguna, Torreón, Coahuila. Sus intereses en la investigación están dirigidos hacia la instrumentación electrónica e integración de sistemas geográficos para el monitoreo de

variables.