COLECCIÓN INVESTIGACIONES 91

Universidad Tecnológica de El Salvador

Sistema telemático de monitoreo de calidad del aire en zonas remotas, utilizando técnicas IoT y *big data*. Fase I

Investigadores:
Omar Otoniel Flores Cortez
Ronny Adalberto Cortez Reyes
Verónica Idalia Rosa Urrutia

Universidad Tecnológica de El Salvador

Sistema telemático de monitoreo de calidad del aire en zonas remotas, utilizando técnicas IoT y *big data*

FASE I –Estación IoT automatizada para el monitoreo de calidad del aire por contaminantes PM2.5 y PM10

Investigadores:
Omar Otoniel Flores Cortez
Ronny Adalberto Cortez Reyes
Verónica Idalia Rosa Urrutia

Esta investigación fue subvencionada por la Universidad Tecnológica de El Salvador. Las solicitudes de información, separatas y otros documentos relativos a este estudio pueden hacerse a la siguiente dirección postal: Universidad Tecnológica de El Salvador, edificio *Dr. José Adolfo Araujo Romagoza*, Vicerrectoría de Investigación y Proyección Social, Dirección de Investigaciones, calle Arce y 19.a avenida Sur, 1045, o a omar.flores@utec.edu.sv.

BY NC SA

San Salvador, 2019
© *Copyright*
Universidad Tecnológica de El Salvador

363.739 269 728 4
F634s Flores Cortez, Omar Otoniel, 1978-
Sistema telemático de monitoreo de calidad del aire en zonas
slv remotas, utilizando técnicas IoT y big data. Fase I / Omar Otoniel
Flores Cortez, Ronny Adalberto Cortez Reyes, Verónica Idalia Rosa
Urrutia. -- 1ª ed. -- San Salvador : Universidad
Tecnológica de El Salvador (Utec), 2019.
89 p. : il. ; 23 cm. -- (Investigaciones ; v. 91)

URI : http://hdl.handle.net/11298/1144
ISBN 978-99961-86-23-3

1. Contaminación del aire-Control- El Salvador. 2. Calidad del
aire-Control. 3. Calidad ambiental-El Salvador. I. Cortez Reyes,
Ronny Adalberto, 1987-. II. Rosa Urrutia, Verónica Idalia, 1976-.
III. Titulo.

BINA/jmh

Autoridades Utec

Dr. José Mauricio Loucel
Presidente Utec y Rector Honorario Vitalicio

Dr. Carlos Reynaldo López Nuila
Vicepresidente

Dr. Nelson Zárate Sánchez
Rector

Sistema telemático de monitoreo de calidad del aire en zonas remotas, utilizando técnicas IoT y *big data*

FASE I –Estación IoT automatizada para el monitoreo de calidad del aire por contaminantes PM2.5 y PM10

Omar Otoniel Flores Cortez • Ronny Adalberto Cortez Reyes • Verónica Idalia Rosa Urrutia

---

Vicerrectoría de Investigación y Proyección Social

Dra. Noris Isabel López Guevara
Vicerrectora de Investigación y Proyección Social

Dra. Camila Calles Minero
Directora de Investigaciones

Noel Castro
Revisión y corrección

Mauricio Gálvez
Diseño de carátula

Fotografía de carátula: Shutterstock.com

Licda. Evelyn Reyes de Osorio
Diseño y diagramación

PRIMERA EDICIÓN
150 ejemplares
Diciembre, 2019

Impreso en El Salvador
Por Tecnoimpresos, S.A. de C.V.
19 Av. Norte, nº. 125, San Salvador, El Salvador
Tel.:(503) 2275-8861

Índice

Índice de figuras 5

Resumen 9

1. Introducción 11
1.1 *Problema investigado* 11
1.2 *Justificación* 12
1.3 *Objetivos del estudio* 13
1.3.1 *Objetivo general* 13
1.3.2 *Objetivos específicos* 14

2. Estado de la técnica 14
2.1 *Calidad del aire* 14
2.1.1 *Material particulado* 17
2.1.2 *Efectos sobre la salud de los contaminantes atmosféricos* 20
2.1.3 *Índice centroamericano de calidad del aire* 22
2.2 *Internet de las cosas* 24
2.2.1 *Arquitectura de un sistema IoT* 26
2.2.2 *Ciudades inteligentes* 29
2.3 *Sensores de material particulado* 32
2.3.1 *Sensor PMS5003* 32
2.4 *Controlador electrónico para IoT* 33
2.4.1 *Tarjeta de desarrollo LoPy* 33
2.4.2 *Lenguaje de programación Micropython* 35
2.5 *Plataforma de* software *para IoT* 37
2.5.1 *Google App Script* 37
2.5.2 *Google Sheets* 38
2.5.3 *Google Sites* 38

3. Metodología 40
3.1 *Tipo de estudio* 40
3.2 *Conjetura inicial* 40
3.3 *Diseño de estación IoT para monitoreo de contaminación ambiental PM* 40
3.3.1 *Propósito y requerimientos del sistema* 42
3.3.2 *Especificación del proceso del sistema* 43
3.3.3 *Especificación del modelo de dominio* 44
3.3.4 *Especificación del modelo de información* 45
3.3.5 *Especificación de servicios* 46
3.3.6 *Especificación de nivel IoT* 47
3.3.7 *Especificación funcional* 47
3.3.8 *Especificación operacional* 48
3.3.9 *Integración dispositivos y componentes* 49
3.3.10 *Desarrollo de aplicaciones* 50

4. Resultados 54
4.1 *Estación remota monitoreo PM* 54
4.2 *Pruebas de campo* 57
4.2.1 *Campus central Utec* 57
4.2.2 *Estación temporal Alicante* 59
4.2.3 *Colaboración con proyecto espectrofotometría UES* 61

5. Conclusiones y trabajos futuros 62
6. Referencias 63
7. Anexos 66
7.1 *Listado del código para microcontrolador LoPy* 66
7.2 *Listado del código para Google Script App* 70
Breve hoja de vida de los investigadores 72
Colección investigaciones 2003-2019 74

Índice de figuras

Figura 1.
Dos de las tres estaciones de monitoreo de contaminación ambiental operadas por el MARN, San Salvador Centro y San Salvador Oriente (Salguero, 2014) 12

Figura 2.
Niveles medios de PM2,5 y PM10 por diferentes regiones del mundo (Fenosa, 2018)..... 18

Figura 3.
Mortalidad prematura anual atribuible a la contaminación en aire ambiente por PM2,5, y costes anuales relativos de la contaminación del aire ambiente por PM2,5 y O3 en diferentes regiones del mundo (Fenosa, 2018) 19

Figura 4.
Comparación del tamaño de las partículas de PM (MARN, 2016).. 20

Figura 5.
Valores para el índice de calidad del aire (MARN, 2016) 23

Figura 6.
Representación de la funcionabilidad de la arquitectura IoT (Ray, 2018)..... 27

Figura 7.
Esquema de las diversas funciones en una ciudad inteligente 30

Figura 8.
Vista física del sensor PMS5007 (Yong, 2016) 33

Figura 9.
Tarjeta microcontrolador LoPy (Pycom, 2017)..... 34

Figura 10.
Logo del lenguaje de programación MicroPython (Mit, 2017).....35

Figura 11.
Etapas de la metodología de referencia arquitectural
de un sistema IoT (Bahga, 2014) 41

Figura 12.
Esquema del proceso funcional del sistema.
Fuente: diseño propio.....44

Figura 13.
Diagrama del modelo de información
para el sistema IoT desarrollado.....46

Figura 14.
Esquema general de los bloques funcionales
del sistema de IoT desarrollado 48

Figura 15.
Esquema general de los bloques operacionales
del sistema de IoT diseñado 49

Figura 16.
Esquema de integración de los componentes
electrónicos del sistema IoT desarrollado.
Fuente: diseño propio.....50

Figura 17.
Flujograma general del firmware de control del dispositivo
para el sistema desarrollado. Fuente: diseño propio 51

Figura 18.
Flujograma general del script para la plataforma IoT
del sistema desarrollado 52

Figura 19.
Diseño de la hoja de cálculo en Google Sheets
configurada para el sistema IoT desarrollado.
Fuente: diseño propio 53

Figura 20.
Diseño del sitio web en Google Sites
para el sistema IoT desarrollado 53

Figura 21.
Componentes electrónicos que integran el *hardware*
del nodo IoT del sistema implementado.
Fuente: diseño propio 54

Figura 22.
Vista al interior de la carcasa
del nodo Iot del sistema diseñado.
Fuente: diseño propio 55

Figura 23.
Vista externa completa del nodo IoT
del sistema diseñado.
Fuente: diseño propio 55

Figura 24.
Estación o nodo IoT operando en exteriores.
Fuente: diseño propio. 56

Figura 25.
Nodo IoT instalado en fachada de edificio en la Utec.
Fuente: diseño propio 57

Figura 26.
Pantalla de gráficos del sitio web de monitoreo
para experimento en campus central Utec.
Fuente: diseño propio 58

Figura 27.
Pantalla de gráficos del sitio web de monitoreo
para experimento en campus central Utec.
Fuente: diseño propio.....58

Figura 28.
Montaje exterior para experimento
en ciudad de Alicante, España.
Fuente: diseño propio.....59

Figura 29.
Pantalla de gráficos del sitio web de monitoreo
para experimento en ciudad de Alicante, España.
Fuente: diseño propio.....60

Figura 30.
Pantalla de datos del sitio web de monitoreo
para experimento en ciudad de Alicante, España.
Fuente: diseño propio.....60

Figura 31.
Póster de resultados de las mediciones realizadas
en proyecto de colaboración UES-Utec.
Fuente: diseño propio.....61

Resumen

La contaminación ambiental es un factor que afecta la salud del ser humano, especialmente en las zonas densamente pobladas o urbanas. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), la contaminación del aire representa un importante riesgo medioambiental para la salud. En El Salvador, el ente encargado del monitoreo de la calidad del aire es el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN), que actualmente solo cuenta con tres estaciones para desarrollar esa labor en todo el país, debido a eso no se puede conocer la calidad del aire de la mayor parte del territorio nacional, a esto se suma una serie de inconvenientes que se presentan con dichas estaciones: alto costo de adquisición inicial y del mantenimiento o reparación; son voluminosas y difíciles de movilizar; a lo largo del tiempo han perdido características a tal grado que al día de hoy solo reportan medición de una variable contaminante; alta logística de instalación y puesta en marcha y poco o nulo personal capacitado para poder utilizar adecuadamente el equipo.

El proyecto de investigación principal, del cual es parte este trabajo, busca implementar una nueva red de monitoreo de contaminantes ambientales utilizando herramientas de tecnología vigente, eficiente y de bajo costo, la cual se proyecta como un apoyo primordial al sistema de monitoreo actual del MARN. Es en el marco de esta línea general de investigación que se planteó la ejecución de una primera fase, la cual se muestra en el presente documento.

La propuesta central de esta etapa, denominada Fase 1, fue la aplicación de técnicas de internet de las cosas (IoT, siglas en inglés), sistemas embebidos y sensores electrónicos en el diseño e implementación de una estación de monitoreo remoto de contaminación por material de partículas en el aire circundante.

El desarrollo metodológico de esta investigación se basó en el modelo de referencia arquitectural IoT, que tiene como fundamento el desarrollo de prototipos de sistemas basándose en la correcta elección de componentes disponibles y adecuados al entorno o aplicación específica. Para este prototipo, se utilizaron como insumos para el *hardware* o los componentes electrónicos un controlador LoPy Esp32, cuyas ventajas son la disponibilidad de conectividades en el mismo encapsulado

y que su programación se realiza en lenguaje Python. Por el lado del *software* para la plataforma o nube de IoT, se adecuó a las herramientas predisponibles en el entorno de desarrollo para aplicaciones del Google Suite, las cuales tiene la ventaja de ser ampliamente utilizadas en el entorno; y se dispone de experiencia en la configuración de estas para sistemas de IoT como el desarrollado.

El principal resultado obtenido en esta primera fase es un prototipo IoT de estación electrónica que permite monitorear los niveles de contaminación por material de partículas en el ambiente, cuyos datos son accesibles desde cualquier dispositivo conectado a internet a través de un sitio web. Otro de los resultados fruto de este trabajo es la configuración de una plataforma o nube de IoT para la conexión inalámbrica con la estación electrónica, el almacenamiento de los datos producidos por esta y para una etapa de visualización web.

Los datos producidos por las estaciones de monitoreo remoto, han sido comparados con los reportados por estaciones cercanas propiedad del MARN, con lo cual se ha verificado que el desempeño es similar.

Los resultados obtenidos son un paso fundamental en el estudio de comportamiento, impactos, acciones y cuido de medio ambiente. Se ha aportado conocimiento científico nuevo, de manera que se muestran técnicas innovadoras de uso de componentes de *hardware* y *software* en la implementación de sistemas de IoT. Estas pueden ser aplicadas en nuevos desarrollos, lo que permitiría la creación de prototipos de forma rápida y eficiente.

1. Introducción

1.1 *Problema investigado*

A lo largo de la historia, el monitoreo del medio ambiente ha sido primordial para el ser humano; el conocer en tiempo real el comportamiento de aspectos como la temperatura, humedad, presión atmosférica, velocidad del viento, contaminación del aire, etc. La importancia de conocer el comportamiento del medio ambiente viene desde muchos aspectos de la vida: agricultura, transporte, comunicaciones, salud, etc.

Específicamente en el área de la salud pública y cómo se ve afectada por aspectos ambientales, en El Salvador, el ente encargado del monitoreo de la calidad del aire es el MARN.

Actualmente este Ministerio cuenta con tan solo tres estaciones para el monitoreo de la calidad del aire en todo el territorio del país, denominada Red de Monitoreo de Calidad del Aire (REDCA). Cabe destacar que estas estaciones solo de concentran en la ciudad capital, San Salvador (MARN, 2018).

A partir de una reestructuración en la división de Monitoreo Ambiental del MARN, se determinó que las mencionadas estaciones adolecen de diversas desventajas que a la larga las llevarán a quedar inoperantes.

Algunos de los problemas de las estaciones actuales son: alto costo de adquisición inicial y de mantenimiento o reparación, son voluminosas, a lo largo del tiempo han perdido características a tal grado que hoy solo reportan medición de una variable contaminante, alta logística de instalación y puesta en marcha y poco o nulo personal capacitado experto.

Figura 1.
Dos de las tres estaciones de monitoreo de contaminación ambiental operadas por el MARN, San Salvador Centro y San Salvador Oriente (Salguero, 2014)

1.2 *Justificación*

La contaminación ambiental es un factor que afecta la salud del ser humano, más en las zonas densamente pobladas o urbanas de El Salvador (Salguero, 2014). Por lo que el monitoreo de esta contaminación es sumamente importante en las sociedades modernas como la nuestra, ya que según estudios las enfermedades derivadas por respirar aire contaminado van en aumento en la región (Dominici, 2012). Conocer de primera mano y en tiempo real la calidad del aire que respiramos es un tema que nos debe importar a todos, por lo cual la Organización Panamericana de la Salud (OPS), dentro de la Comisión Centroamericana de Ambiente y Desarrollo, en la "Guía para la calidad del aire ambiental inmisiones atmosféricas", ha adoptado la "Propuesta de Índice Centroamericano de la Calidad del Aire", el cual es un indicador numérico adimensional sobre la contaminación del aire (MARN, 2018).

El Salvador es uno de los países que es catalogado por la OPS con nula capacidad de monitoreo de calidad del aire (Korc, 1999). La investigación aplicada es una forma de llevar soluciones de alto nivel científico a los problemas de la sociedad actual, y más cuando su implementación permite brindar beneficios colaterales. Proporcionar soluciones a bajo

costo y con tecnología de punta es una necesidad imperiosa en regiones como la nuestra. Se requiere un salto desde la tecnología obsoleta hasta la tecnología actual en la realización de procesos de monitoreo de la calidad del aire. Además, está la importancia de potenciar el capital humano local y la puesta en marcha de proyectos con ideas surgidas por académicos salvadoreños.

Dentro de los beneficios del presente proyecto de investigación están los siguientes:

- Disponer de una herramienta tecnológica de bajo costo en apoyo a las labores de monitoreo en tiempo real de la calidad del aire.
- Reducción de costos de producción, mantenimiento y reparación de estaciones de monitoreo.
- Extender la cobertura actual de la red de monitoreo del MARN de El Salvador.
- Potenciar el desarrollo científico tecnológico local.
- Proponer nuevo conocimiento científico, métodos y técnicas en el área de las tecnologías de la información y la comunicación (TIC).
- La expansión a otras áreas de aplicación de los conocimientos frutos de este proyecto.
- El fortalecimiento de lazos entre la academia y el sector público salvadoreño.

1.3 *Objetivos del estudio*

En el desarrollo de esta investigación se plantearon los objetivos siguientes:

1.3.1 *Objetivo general*

Implementar una estación de IoT para monitoreo que permita capturar información sobre el estado de la calidad del aire y mostrar una visualización en tiempo real.

1.3.2 *Objetivos específicos*

- Aplicar técnicas de IoT en el diseño y construcción de una estación electrónica con sensores para la captura de diversos gases que se encuentran en el aire circundante.
- Implementar, en entornos reales de prueba, una estación base para la recolección de los datos remotos, y que sea capaz de trasmitir estos a una plataforma IoT.
- Utilizar los servicios del Google Suite Apps en la configuración de plataforma en la nube para tener acceso a los tableros de visualización desde cualquier equipo conectado a internet.
- Aportar y divulgar nuevo conocimiento científico, teórico y práctico sobre el diseño e implementación de sistemas de IoT eficientes y de bajo costo en la automatización de tareas.

2. Estado de la técnica

A continuación, se describe el estado actual de la técnica sobre los sistemas de monitoreo IoT, así como los conceptos relacionados con la calidad del aire y sus parámetros de medición. El diseño de sistemas de IoT es un área aplicada que constantemente está en evolución, por lo que el estudio de estos avances en las técnicas de diseño e implementación es de suma importancia, para así brindar soluciones con tecnología actual, eficientes y asequibles.

2.1 *Calidad del aire*

Según la OMS, la contaminación del aire representa un importante riesgo medioambiental para la salud. Son constantes sus mensajes e informes alertando del incumplimiento de los valores límite de protección a la salud de contaminantes atmosféricos en el aire que respiramos. Dos informes de la OMS de 2014, ratificados en 2016, exponían que el 92 % de la población mundial vive en lugares donde no se respetan los valores guía de calidad del aire; y estimaban que la contaminación atmosférica local a nivel troposférico, tanto en las ciudades como en las zonas rurales

de todo el mundo, provoca cada año tres millones de defunciones prematuras (Fenosa, 2018).

El problema es grave, pero muchos países no le dan la importancia que amerita o no buscan soluciones viables, sino que constantemente se reportan muchas enfermedades originadas por la contaminación que se recibe a diario; y esto trae muchas consecuencias económicas al Estado y, en el peor de los casos, pérdidas humanas. Lo importante de todo esto es que motiva a tomar conciencia y a analizar las causas para poder diseñar políticas que ayuden a mitigar la emisión de contaminantes y así gozar de una mejor calidad de vida por el aire que respiramos.

América es el continente más urbanizado del mundo (UN, 2019). El 79 % de la población de América Latina y el Caribe vive en pueblos y ciudades con más de 20.000 habitantes (Eclac, 2015).

Esto representa una importante demanda de energía, incluyendo la provisión de servicios, la producción y el consumo de materiales y bienes, el transporte y la movilidad, todo lo cual contribuye a la contaminación del aire. El transporte de mercancías y la movilidad humana se basan principalmente en soluciones individuales, que exigen un alto consumo de energía con baja eficiencia. Además, los vertederos de la ciudad, en gran parte no regulados para residuos sólidos, o la ausencia de políticas públicas para el sector representan no solo una fuente de emisiones de metano y sitios de reproducción de vectores, sino también grandes cantidades de partículas finas por incendios accidentales y no accidentales, con aportaciones potenciales a la contaminación atmosférica en entornos urbanos. La quema de cultivos sigue siendo legal y se practica ampliamente en muchos países, lo que también puede contribuir a la mala calidad del aire. Globalmente, la energía doméstica es una fuente importante de contaminación del aire exterior. La contaminación del aire en los hogares, que proviene principalmente de cocinar en cocinas tradicionales a fuego abierto, es responsable del 12 % de la contaminación global por partículas finas ambientales [PM2.5] (WHO, World Health Organization, 2016).

Antes de definir qué es la calidad del aire, es necesario conocer en qué consiste la contaminación atmosférica, que puede definirse como el aumento o la disminución de ciertos componentes de la atmósfera, hecho que no se habría producido sin la actividad humana. Este tipo de contaminación es la presencia de sustancias en la atmósfera que resultan

de la actividad del hombre o de procesos naturales y que producen efectos negativos en el hombre y en el medio ambiente (Elsom, 1990).

Dentro de la contaminación atmosférica, es importante hablar del concepto de *contaminante aéreo*. *Contaminación del aire ambiental exterior* es un término más amplio usado para describir la contaminación del aire en ambientes al aire libre. La mala calidad del aire ambiental exterior ocurre cuando los contaminantes alcanzan concentraciones lo suficientemente altas como para afectar negativamente la salud humana y/o el medio ambiente. *Contaminación del aire urbano al aire libre* es un término más específico que se refiere a la contaminación del aire ambiental exterior en áreas urbanas, por lo general en las ciudades o en sus alrededores (OPS, 2018).

Existe también el concepto de *inmisión*, que se define como la recepción de contaminantes en el medio ambiente (aire, suelo, agua) procedentes de una fuente emisora. Frecuentemente este término se utiliza como sinónimo de niveles de inmisión, que indican la concentración de sustancias contaminantes en un medio determinado (MARN República Dominicana, 2017).

Según lo anterior, la calidad del aire es una forma de medir las condiciones del aire en espacios interiores. El dióxido de carbono es una magnitud objetiva para determinar la calidad del aire. El ser humano respira este gas incoloro e inodoro que se muestra más activo en proporción directa con la edad y la corpulencia.

En El Salvador, la calidad del aire ha venido deteriorándose con altos niveles de polución, debido a diversos factores como el crecimiento poblacional, aumento de flota vehicular, hábitos de quema agrícola, quema de desechos sólidos, entre otros. Desde el año 1997, los datos del monitoreo de la calidad del aire efectuados por la Fundación Salvadoreña para el Desarrollo Económico y Social (FUSADES), muestran que la concentración de la mayoría de los contaminantes ya sobrepasaba los valores guía de la OMS. Y en lo que respecta a la salud de la población, la Unidad Epidemiología del Ministerio de Salud reporta que las enfermedades respiratorias son la primera causa de morbilidad desde el mismo año de referencia a la fecha. En el año 2012 se realizó el "Inventario de emisiones de contaminantes criterio del aire de El Salvador: 2009", por el MARN en coordinación interinstitucional, con el objetivo de identificar los sectores prioritarios (fuentes fijas y móviles) para la intervención del

control de las emisiones contaminantes criterio, como el monóxido de carbono (CO), partículas PM10, partículas PM2.5, óxido de nitrógeno, dióxido de azufre y ozono, entre otros, que permita asegurar una adecuada calidad del aire en el país (Ministerio de Salud, 2017).

Entre algunos de los resultados por contaminantes estuvieron los siguientes: que la generación por partículas PM10 y PM2.5 se debe principalmente a la combustión residencial, comercial e industrial de leña que forma parte de las fuentes de área, representando el 40 % del total de este contaminante; la quema de basura a cielo abierto y agrícola, el 16 %. Asimismo, la flota vehicular representa un porcentaje significativo (Ministerio de Salud, 2017).

Con respecto al resultado de las fuentes identificadas por el contaminante de CO, la combustión residencial, comercial e industrial con leña representa el 19,1 %; las camionetas a gasolina, el 34,7 %; y los automóviles particulares y motocicletas, el 22,3 y el 12,3 %, respectivamente. Estas emisiones se generan debido a la combustión incompleta del combustible en los vehículos. Por otra parte, determinando las emisiones por fuentes fijas anuales, los resultados fueron alrededor de 58 a 178 % toneladas al año contaminantes criterio, de las cuales el 69,2 % son emisiones de SO2, el 21,3 % de gases orgánicos reactivos y el 7,4 % de óxidos de nitrógeno (Ministerio de Salud, 2017)

2.1.1 *Material particulado*

Se define como material particulado [PM] (también llamado *contaminación por partículas*) una mezcla de partículas liquidas y sólidas, de sustancias orgánicas e inorgánicas, que se encuentran en suspensión en el aire. Algunas partículas, como el polvo, la suciedad, el hollín o el humo son lo suficientemente grandes u oscuras para ser vistas a simple vista; otros son tan pequeños que solo se pueden detectar mediante el uso de un microscopio electrónico.

Por su dimensión, las partículas se dividen, entre otras, en las siguientes categorías:

- Partículas de diámetro menor a 2.5 μm.
- Partículas gruesas de diámetro arriba de 2.5 μm.

- Partículas de humo, que tienen un diámetro de 0.001 – 1 μm: son formadas por la condensación, sublimación o reacciones químicas, y algunas veces son designadas como humo.
- Partículas de vapor que tienen un diámetro entre 0.1 – 10 μm: están comprendidas de partículas líquidas formadas mediante condensación, y son bastante más largas en su diámetro en comparación con las partículas de humo.

La contaminación del aire representa un importante riesgo medioambiental para la salud, ya sea en países desarrollados o en desarrollo. Se estima que la contaminación ambiental del aire, tanto en las ciudades como en las zonas rurales, es la causa de 4.2 millones de muertes prematuras en todo el mundo por año; esta mortalidad se debe a la exposición de partículas pequeñas de 2.5 micrones o menos de diámetro (PM2.5), que causan enfermedades cardiovasculares, respiratorias y cáncer. Algunas muertes pueden atribuirse a más de un factor en riesgo al mismo tiempo. Por ejemplo, tanto el consumo de tabaco como la contaminación del aire pueden provocar cáncer de pulmón. Algunas de las muertes por esta causa podrían haberse evitado con la mejora de la calidad del aire o con la reducción del consumo de tabaco (Fenosa, 2018).

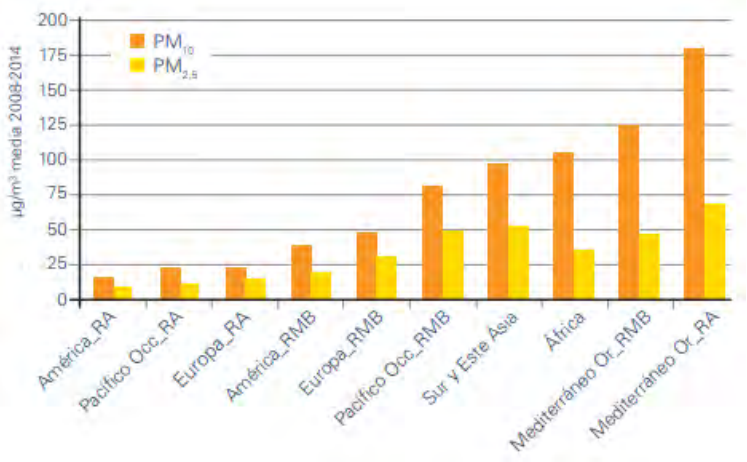

Figura 2.
Niveles medios de PM2,5 y PM10 por diferentes regiones del mundo (Fenosa, 2018)

La contaminación por partículas incluye lo siguiente:

- PM10: Son partículas inhalables que tienen diámetros generalmente de 10 micrómetros o menos. Las fuentes de emisión de estas partículas pueden ser móviles o estacionarias, destacando que 77,9 % de la cantidad total emitida de PM10 procede del polvo suspendido existente en la atmósfera. Como fuentes minoritarias de contaminación, es importante señalar que el 3,7 % del total procede de quemas agrícolas; y un 3,3 % es de origen doméstico.
- PM2.5: Partículas inhalables finas que tienen diámetros por lo general de 2.5 micrómetros o menos. Las partículas finas pueden provenir de diversas fuentes, incluyendo centrales eléctricas, vehículos motorizados, aviones, quema de madera residencial, incendios forestales, quema agrícola, erupciones volcánicas y tormentas de polvo; algunas se emiten directamente al aire, mientras que otras se forman cuando los gases y las partículas interactúan entre sí en la atmosfera.

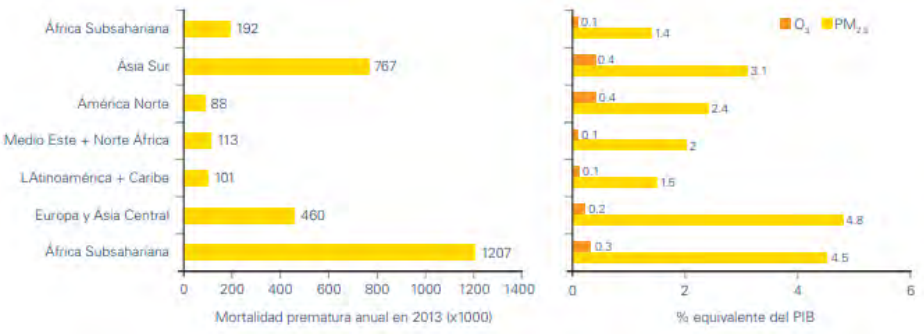

Figura 3.
Mortalidad prematura anual atribuible a la contaminación en aire ambiente por PM2,5, y costes anuales relativos de la contaminación del aire ambiente por PM2,5 y O3 en diferentes regiones del mundo (Fenosa, 2018)

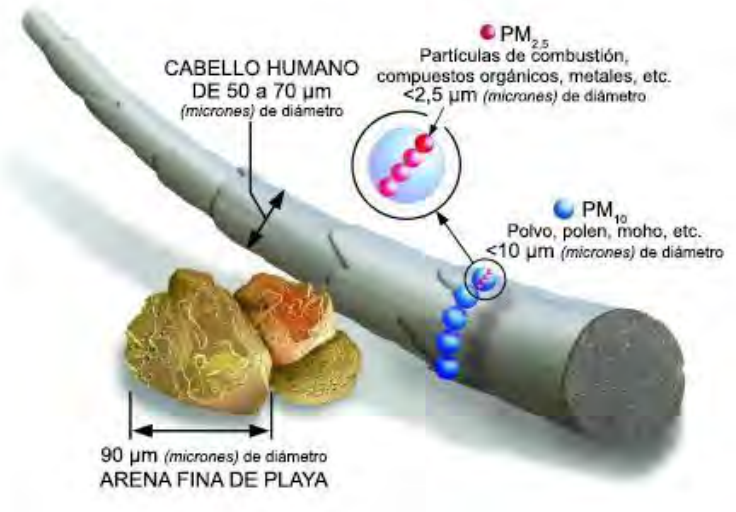

Figura 4.
Comparación del tamaño de las partículas de PM (MARN, 2016)

2.1.2 *Efectos sobre la salud de los contaminantes atmosféricos*

En general, los contaminantes atmosféricos causan efectos adversos a la salud humana, ya sea a corto o largo plazo.

Los efectos causados a corto plazo son los siguientes:

- Mortalidad diaria.
- Admisiones hospitalarias por problemas de respiración y cardiovasculares.
- Visitas del departamento de emergencias por problemas de respiración y problemas cardiovasculares.
- Uso de medicamentos para la respiración y cardiovasculares.
- Días de reposo.
- Absentismo al trabajo y a la escuela.
- Síntomas agudos (mareos, tos, producción de flema, infecciones respiratorias).
- Cambios fisiológicos [funciones de los pulmones] (WHO, Air quality guidelines - Global Update 2005, 2009).

Los efectos a la salud a largo plazo son estos:

- Mortalidad debido a enfermedades cardiovasculares y respiratorias.
- Enfermedades respiratorias crónicas incidentes y prevalentes.
- Cambios crónicos en las funciones fisiológicas.
- Cáncer de pulmón.
- Enfermedades cardiovasculares crónicas.
- Restricciones del crecimiento intrauterino [bajo peso al nacer, retraso en el crecimiento intrauterino, pequeño para edad de gestación] (WHO, Air quality guidelines - Global Update 2005, 2009).

Los tipos de efectos generados a la salud por material particulado son los siguientes:

En los pulmones, debido a una exposición aguda y/o crónica, genera efectos adversos tales como:

- Tos.
- Dificultad para respirar.
- Presión en el pecho.
- Irritación de ojos.
- Pérdida de capacidad pulmonar.
- Desarrollo de enfermedades respiratorias en infantes.
- Agravamiento de las enfermedades respiratorias existentes.
- Muerte precoz de las personas que padecen de enfermedades pulmonares.

La contaminación debido a material particulado también puede afectar al corazón, pasando de los pulmones al torrente sanguíneo, afectando así el sistema cardiovascular. Es así como, debido a la exposición aguda y crónica, se generan efectos adversos a la salud a corto y largo plazo, respectivamente. La contaminación atmosférica afecta mayormente a los grupos más sensibles, tales como los que se presentan a continuación:

- *Niños:* Debido a que sus pulmones aún se están desarrollando. Además, dedican más tiempo a actividades vigorosas (Huff, 2009). Al dedicarse más a actividades físicas, respiran más rápida

y profundamente, de tal manera que inhalan más material particulado. Además, algunas enfermedades como el asma y las respiratorias agudas se pueden agravar cuando el nivel de contaminación por material particulado aumenta. Los niños son los más perjudicados, ya que tienen mayor probabilidad de padecer este tipo de enfermedades.

- *Adultos mayores:* Pueden padecer de enfermedades cardíacas o pulmonares no diagnosticadas (Huff, 2009).
  Estudios han determinado que, al subir los niveles de contaminación por material particulado, se incrementa el índice de hospitalización de los adultos mayores, en donde algunos pueden fallecer al agravarse su estado de salud si estos padecen de una enfermedad cardíaca o pulmonar.
- *Personas con enfermedades cardíacas o pulmonares existentes:* estas enfermedades se agravan debido a la contaminación atmosférica (Huff, 2009). Ejemplos de estas enfermedades son: enfermedad coronaria arterial, insuficiencia cardíaca congestiva, asma o enfermedad pulmonar obstructiva crónica.
- *Personas que ejercitan o trabajan al aire libre:* respiran más rápida y profundamente en comparación con los adultos sedentarios, inhalando así más partículas (Huff, 2009).

2.1.3 *Índice centroamericano de calidad del aire*

Es un índice para la notificación de la calidad del aire a diario. Indica el grado de pureza o contaminación atmosférica y los efectos para la salud; gira en torno a los efectos en la salud que se pueden sufrir en unas cuantas horas o días tras respirar aire contaminado.

El índice de calidad del aire es una regla que va de 0 a 500. Cuando más alto es el valor del índice, mayor es el nivel de contaminación atmosférica y mayor la preocupación para la salud; se divide en sus niveles de preocupación por la salud, según la imagen que se muestra a continuación.

Valores del índice de calidad del aire (AQI)	Niveles de preocupación de salud	Colores
0 - 50	Bueno	Verde
51 - 100	Moderar	Amarillo
101 - 150	No saludable para grupos sensibles	naranja
151 - 200	Insalubre	rojo
201 - 300	Muy poco saludable	Púrpura
301 - 500	Peligroso	Granate

Figura 5.
Valores para el índice de calidad del aire (MARN, 2016)

Cada categoría corresponde a un nivel diferente de preocupación por la salud:

- *Bueno.* El valor de AQI para su comunidad está entre 0 y 50. La calidad del aire es satisfactoria y representa poco o ningún riesgo para la salud.
- *Moderado.* El AQI está entre 51 y 100. La calidad del aire es aceptable; sin embargo, la contaminación en este rango puede representar un problema de salud moderado para un número muy pequeño de personas. Las personas que son inusualmente sensibles al ozono o la contaminación por partículas pueden experimentar síntomas respiratorios.
- *No saludable para grupos sensibles.* Cuando los valores de AQI están entre 101 y 150, los miembros de grupos sensibles pueden experimentar efectos en la salud, pero es improbable que el público en general se vea afectado.
- *Insalubre.* Todos pueden comenzar a experimentar efectos en la salud cuando los valores de AQI están entre 151 y 200. Los miembros de grupos sensibles pueden experimentar efectos en la salud más graves.
- *Muy poco saludable.* Los valores de AQI entre 201 y 300 activan una alerta de salud, lo que significa que todos pueden experimentar efectos de salud más graves.

- *Peligroso.* Los valores de AQI de más de 300 activan advertencias sanitarias de condiciones de emergencia. Es más probable que toda la población se vea afectada por graves efectos en la salud.

2.2 *Internet de las cosas*

Internet de las cosas (IoT, por sus siglas en inglés) es un sistema de dispositivos de computación interrelacionados, maquinas mecánicas y digitales, objetos, animales o personas que tienen identificadores únicos y la capacidad de transferir datos a través de una red sin requerir de interacciones humano a humano o humano a computadora (Radic, 2015).

La información es la clave, el corazón, de esta tecnología. Su potencial es casi infinito, ya que todo puede ser medido. La cantidad de datos generados es inmensa y está en permanente crecimiento, de ahí que la conectividad deba acompañar y permitir que el denominado *camino del IoT* sea ágil, dinámico y, por supuesto, seguro. Se calcula que actualmente existen aproximadamente 8.400 millones de dispositivos conectados en el mundo; y para 2020 la cifra ascenderá a 20.400 millones (Telefónica, 2018).

El IoT cada vez estará más presente en nuestra vida, incluso en ámbitos que no podemos imaginar. Las posibilidades se abren a casi cualquier área, sector de actividad e incluso en el hogar. ¿Semáforos que se activan según la cantidad tránsito en tiempo real? ¿Autorregulación de las farolas a partir del nivel de la luminosidad del momento? ¿Más eficiencia en el transporte público? ¿Medir la humedad en los jardines para regarlos en consecuencia? Todo esto, y mucho más, ya está configurando las nuevas ciudades, en las que vivimos y en las que dentro de muy poco tiempo lo único analógico será caminar por sus calles (Telefónica, 2018).

Según el Grupo de soluciones empresariales basadas en internet (IBSG, Internet Business Solutions Group), de Cisco, IoT es sencillamente el punto en el tiempo en el que se conectaron a internet más "cosas u objetos" que personas (Cisco, 2011).

En 2003, había aproximadamente 6.3 mil millones de personas en el planeta, y había 500 millones de dispositivos conectados a internet. Si dividimos la cantidad de dispositivos conectados por la población

mundial, el resultado indica que había menos de un dispositivo (0.08) por persona. De acuerdo con la definición de Cisco IBSG, IoT aún no existía en 2003 porque la cantidad de cosas conectadas era relativamente escasa, dado que apenas comenzaba la invasión de los dispositivos omnipresentes, como los *smartphones.*

El crecimiento explosivo de los *smartphones* y las Tablet PC elevó a 12.5 mil millones en 2010 la cantidad de dispositivos conectados a internet, en tanto que la población mundial aumentó a 6.8 mil millones, por lo que el número de dispositivos conectados por persona es superior a 1 (1.84 para ser exactos) por primera vez en la historia. Si se desglosan aún más estas cifras, Cisco IBSG estima que IoT "nació" en algún punto entre 2008 y 2009. Actualmente, IoT está firmemente encaminado según lo demuestran el avance de iniciativas como Planetary Skin de Cisco, la matriz inteligente y los vehículos inteligentes (Dave Evans, 2011).

Dentro el área de aplicación del IoT, se encuentran múltiples y diversos campos en los cuales sus sistemas encuentran cabida, sin embargo, se mencionan los siguientes, entre otros, según una publicación realizada por Intel (Intel, 2017):

- *Automotriz:* Cuando se lo vincula con IoT, el automóvil convierte los datos en una perspectiva que permite actuar, tanto en su interior como en el mundo que lo rodea.
- *Energía:* Mediante IoT, los innumerables dispositivos de la red eléctrica pueden compartir información en tiempo real para distribuir y manejar la energía en forma más eficiente.
- *Atención médica:* Desde dispositivos en ropas de uso clínico hasta tabletas para servicios de emergencia y equipos quirúrgicos sofisticados, IoT está transformando los servicios de salud.
- *Fabricación inteligente:* La tecnología de IoT permite que las fábricas de hoy liberen la eficacia operacional, optimicen la producción y aumenten la seguridad de los trabajadores.
- *Comercio minorista:* Para los comerciantes minoristas, IoT ofrece oportunidades ilimitadas que aumentan la eficacia de la cadena de suministro, desarrollan nuevos servicios y rediseñan la experiencia del cliente.
- *Edificios inteligentes:* IoT está dando respuesta a los costos crecientes de la energía, la sustentabilidad y la conformidad

con códigos, conectando, administrando y asegurando los dispositivos que recopilan datos de los sistemas centrales.

- *Casas inteligentes:* Desde reconocer su voz hasta saber quién está en la puerta principal, la tecnología IoT está convirtiendo en realidad el sueño de una casa inteligente segura.
- *Transporte inteligente:* Desde automóviles conectados o de autoconducción hasta sistemas de logística y transporte inteligentes, IoT puede salvar vidas, reducir el tráfico y minimizar el impacto de los vehículos en el ambiente.

2.2.1 *Arquitectura de un sistema IoT*

Un sistema de IoT consta de una serie de bloques funcionales para facilitar varias utilidades al sistema, tales como detección, identificación, actuación, comunicación y administración (Ray, 2018). A continuación, se describen cada uno de estos bloques.

- Un sistema IoT completo está compuesto por cuatro componentes: sensores/dispositivos, conectividad, procesamiento de datos y una interfaz de usuario.
- Un sistema IoT completo necesita *hardware*, como sensores o dispositivos. Estos recopilan datos del entorno (por ejemplo, un sensor de humedad) o realizan acciones en el entorno (por ejemplo, cultivos de riego).
- Un sistema IoT completo necesita conectividad. El *hardware* necesita una forma de transmitir toda esa información a la nube (por ejemplo, enviar datos de humedad), o necesita una forma de recibir comandos de la nube (por ejemplo, regar los cultivos ahora). Para algunos sistemas IoT, puede haber un paso intermedio entre el *hardware* y la conexión a la nube, como una puerta de enlace o enrutador.
- Un sistema IoT completo necesita *software.* Este está alojado en la nube y es responsable de analizar los datos que recopila de los sensores y toma decisiones (por ejemplo, saber a partir de datos de humedad que simplemente llovió y luego decirle al sistema de riego que no se encienda hoy).

- Finalmente, un sistema IoT completo necesita una interfaz de usuario. Para hacer que todo esto sea útil, es necesario que los usuarios interactúen con el sistema IoT (por ejemplo, una aplicación web con un tablero que muestre tendencias de humedad y permita a los usuarios activar o desactivar manualmente los sistemas de riego).

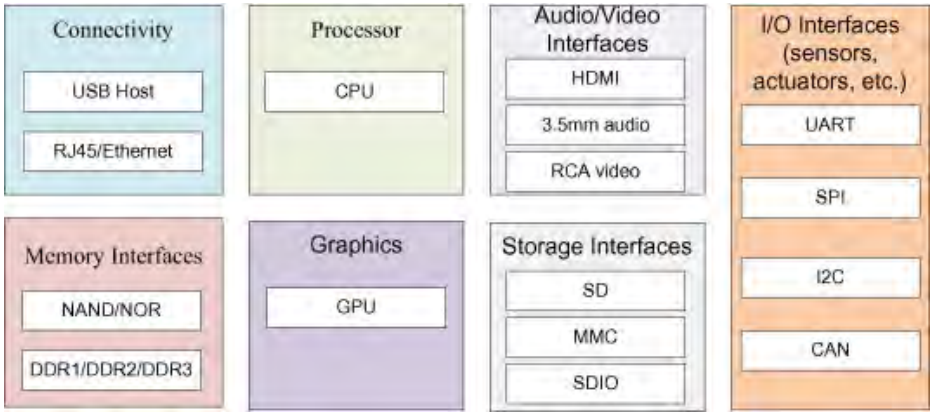

Figura 6.
Representación de la funcionabilidad de la arquitectura IoT (Ray, 2018)

Las plataformas IoT son el *software* de soporte que conecta todo en un sistema IoT, facilitan la comunicación, el flujo de datos, la administración de dispositivos y la funcionalidad de las aplicaciones. Cuando varios dispositivos envían estos pequeños datos, a través de una red a la nube, se pueden monitorizar, y así, con el tiempo, la cantidad de datos será más grande. Con frecuencia esto se describe como *big data*; y es aquí cuando el IoT se hace inteligente. Los *big data* permiten analizar miles o millones de puntos de datos con el fin de aprender, entender o controlar algo mucho mejor.

Dispositivo: Un sistema IoT se basa en dispositivos que proporcionan actividades de detección, actuación, control y monitoreo. Los dispositivos IoT pueden intercambiar datos con otros dispositivos y aplicaciones conectados, o recopilar datos de otros dispositivos y procesar los datos localmente, o enviar los datos a servidores

centralizados o aplicaciones basadas en la nube para procesar los datos, o realizar algunas tareas localmente y otras dentro de la infraestructura de IoT basadas en restricciones temporales y de espacio (es decir, memoria, capacidades de procesamiento, latencias de comunicación y velocidades y fechas límite). Un dispositivo IoT puede constar de varias interfaces para comunicaciones con otros dispositivos, tanto cableados como inalámbricos.

Estos incluyen:

- Interfaces de E/S para sensores
- Interfaces para conectividad a Internet
- Interfaces de memoria y almacenamiento
- Interfaces de audio/video

Los dispositivos IoT también pueden ser de varios tipos, por ejemplo, sensores portátiles, relojes inteligentes, luces LED, automóviles y máquinas industriales. Casi todos los dispositivos IoT generan datos de alguna otra forma que, cuando son procesados por los sistemas de análisis de datos, generan información útil para guiar acciones locales o remotas, por ejemplo, datos de sensores generados por un dispositivo de monitoreo de humedad del suelo en un jardín; cuando se procesan, pueden ayudar en la determinación de los horarios óptimos de riego.

Comunicación: Realiza la comunicación entre dispositivos y servidores remotos. Los protocolos de comunicación de IoT generalmente funcionan en las capas de enlace de datos, de red, de transporte y de aplicación.

Servicios: Un sistema IoT puede servir como servicios para modelado de dispositivos, control de dispositivos, análisis de datos, publicación de datos y descubrimiento de dispositivos.

Administración: El bloque de administración proporciona diferentes funciones para gobernar un sistema de IoT para buscar el gobierno subyacente del sistema de IoT.

Seguridad: El bloque funcional de seguridad protege el sistema de IoT al proporcionar funciones tales como autenticación, autorización, privacidad, integridad del mensaje, integridad del contenido y seguridad de los datos.

Aplicación: La capa de aplicación es la más importante en términos de usuarios, ya que actúa como una interfaz que proporciona los módulos necesarios para controlar y monitorear diversos aspectos del sistema IoT. Las aplicaciones permiten a los usuarios visualizar y analizar el estado del sistema en la etapa actual de acción, y en algunas ocasiones también permite la predicción de perspectivas futuristas.

2.2.2 *Ciudades inteligentes*

Son aquellas ciudades que se caracterizan por el uso intensivo de las TIC en la creación y mejoramiento de los sistemas que las componen. Una ciudad se considera inteligente cuando adopta soluciones intensivas en TIC y desarrolla la capacidad de crear, recopilar, procesar y transformar la información para hacer sus procesos y servicios mejores y más eficientes, permitiendo mejorar la calidad de vida mediante el uso eficiente de sus recursos.

Figura 7.
Esquema de las diversas funciones en una ciudad inteligente.
(Telefónica, 2018)

La dinámica actual de las ciudades requiere aumentar la eficiencia en el uso de los recursos productivos, con el fin de mejorar la calidad de vida de los habitantes y la implementación de las TIC en los sistemas que componen una ciudad permite mejorar la sostenibilidad y competitividad de la ciudad, y la calidad de vida de los ciudadanos.

Las ciudades inteligentes impulsan el crecimiento económico sustentable y la prosperidad para sus ciudadanos. Una ciudad inteligente (*smart city*) se sostiene con el uso de las TIC. Mediante estas, sus dirigentes tienen las herramientas para analizar los datos y tomar mejores decisiones, anticiparse a los problemas a fin de resolverlos de manera proactiva y coordinar los recursos para funcionar eficazmente. La visión *smart* ('inteligente') ofrece a las ciudades una serie de beneficios no solo asociados con el fomento de una mejor calidad de vida, sino también con el desarrollo del talento de sus ciudadanos y el progreso empresarial de la ciudad. Una ciudad que quiera aspirar a ser realmente *smart* tiene que desarrollar todas sus áreas claves (transportes, energía, educación, salud, gestión de residuos, vigilancia, economía...) de manera

transversal y simultánea. En resumen, estas ideas establecen las bases que diferencian a una ciudad inteligente (Márquez, 2015).

Algunos ejemplos de ciudades inteligentes: Río de Janeiro, Barcelona, Niza, Ámsterdam y Chicago son excelentes ejemplos de ciudades que toman la iniciativa para generar cambios sociales y económicos usando IoT. En cada uno de estos casos, los datos masivos o *big data* se están convirtiendo en datos abiertos (*open data*) listos para ser usados por los ciudadanos. La transformación de datos estáticos en información activa permite a los líderes de las ciudades, ya sea en la administración de un gobierno, una universidad, un hospital o una red de transporte, entender mejor las decisiones que toman los ciudadanos en sus vidas cotidianas.

En Canadá, la ciudad de Toronto está renovando su zona costera para convertirla en un "laboratorio viviente" sostenible. Mediante el uso de la arquitectura Smart y las Comunidades *Connected City* de Cisco, los promotores y administradores de Waterfront Toronto han aprovechado la red como una plataforma para crear un ecosistema comunitario dentro del segmento creciente de su ciudad. Ese ecosistema se está ampliando para brindar valor adicional dentro de este proyecto de desarrollo urbano sostenible. Las metas son claras: impulsar el crecimiento de forma que aumenten la sostenibilidad socioeconómica y aumentar los beneficios creados por los servicios inteligentes para ciudadanos (Márquez, 2015).

Otros ejemplos de ciudades inteligentes son:

Singapur: La ciudad tiene desplegada una inmensa red de sensores conectados a internet que recopila datos en tiempo real del funcionamiento de la ciudad. El objetivo es utilizar la información para llevar a cabo iniciativas que mejoren la vida de los ciudadanos.

Tokio: Cuenta con proyectos de mejora de la gestión energética, urbanización inteligente, movilidad, etc. Llama la atención el despliegue de tecnología NFC (Near Field Communication) en medios de transporte público como el metro, o en superficies comerciales para realizar el pago de productos o servicios con el teléfono móvil.

Santiago de Chile: La capital chilena ha puesto en marcha el primer prototipo de ciudad inteligente en el Parque de Negocios Ciudad

Empresaria. Entre las virtudes de ciudad inteligente está la gestión inteligente de la red eléctrica, aumentando la eficiencia energética del sistema y el cuidado del medio ambiente.

2.3 *Sensores de material particulado*

Cuando se desea tomar lectura del contaminante PM presente en el ambiente circundante, se dispone de diversas opciones de sensores para hacer esta tarea, desde los sensores ópticos, químicos, electroquímicos, de peso y, recientemente, hasta electrónicos. Cada uno con sus ventajas y desventajas. Sin embargo, en este trabajo se enfocó el uso de sensores electrónicos por su novedad, su eficiencia relativamente alta, su costo y por la experiencia que se tiene sobre el control electrónico e informático de estos.

2.3.1 *Sensor PMS5003*

Es un sensor de concentración de partículas digital y universal, que se puede utilizar para obtener el número de partículas suspendidas en el aire, es decir, la concentración de partículas que luego es representada en forma digital. Este sensor se puede insertar en instrumentos variables relacionados con la concentración de partículas suspendidas en el aire o en otros ambientes (Yong, 2016).

Figura 8.
Vista física del sensor PMS5007 (Yong, 2016)

Características principales

- Tasa de rango de falsa alarma.
- Respuesta en tiempo real.
- Datos correctos.
- Diámetro mínimo de partícula distinguible: 0.3 micrómetros.
- Alto rendimiento anti-interferencia debido a la estructura de patente de blindaje de seis lados.
- Dirección opcional de entrada y salida de aire para adaptarse a diferentes diseños.

2.4 *Controlador electrónico para IoT*

2.4.1 *Tarjeta de desarrollo LoPy*

Es una placa de desarrollo WiFi, Bluetooth y LoRa con MicroPython diseñada específicamente para aplicaciones de IoT. En su núcleo se encuentra el sistema en chip (SoC) Espressif ESP32 que dispone de un

microcontrolador de núcleo doble, WiFi, Bluetooth, LoRa y 512 KB de RAM. Toda esta potencia integrada en una placa que mide tan solo 55 x 20 x 3.5 mm (Pycom, 2017).

Figura 9.
Tarjeta microcontrolador LoPy (Pycom, 2017)

Características principales:

- SoC integrado con una potente CPU, Bluetooth (Classic y BLE) y WiFi
- Hasta 1 km de alcance WiFi
- El procesador de red gestiona la conectividad WiFi y apilado IPv6, dejando el procesador principal libre para ejecutar la aplicación
- Transceptor Semtech LoRa SX1272 con pila LoRaWAN compatible con dispositivos de clase A y C
- Antena WiFi y Bluetooth interna y conector U. FL de antena LoRa
- Memoria flash de 32 Mbits
- 2x UART, 2 x SPI, I2C, I2S, tarjeta micro-SD, 8 ADC de 12 bits, hasta 24 GPIO

- LED de varios colores RGB WS2812
- Interruptores RF y reajuste
- Placa de expansión (código RS 125-9534) que dispone de un conector micro-USB, botón, LED y conector de batería
- Tamaño: 55 x 20 x 3.5 mm
- Temperatura de funcionamiento: de -40 °C a 85 °C

2.4.2 *Lenguaje de programación MicroPython*

MicroPython es una implementación ágil y eficiente del lenguaje de programación Python 3, que incluye un pequeño subconjunto de la biblioteca estándar de Python y está optimizado para ejecutarse en microcontroladores y en entornos restringidos. MicroPython está repleto de características avanzadas, como un indicador interactivo, enteros arbitrarios de precisión, cierres, comprensión de listas, generadores, manejo de excepciones y más. Sin embargo, es lo suficientemente compacto como para caber y ejecutarse dentro de solo 256k de espacio de código y 16k de RAM. MicroPython pretende ser lo más compatible posible con Python normal, para permitirle transferir código fácilmente desde el escritorio a un microcontrolador o sistema integrado (George Robotics Limited, 2018).

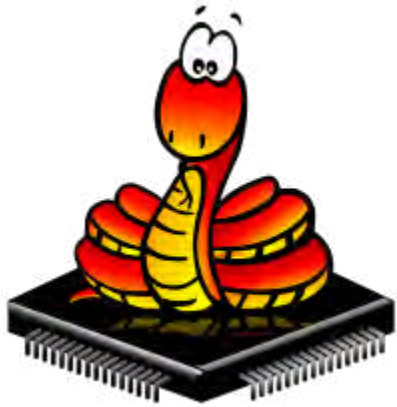

Figura 10.
Logo del lenguaje de programación MicroPython (Mit, 2017)

Algunos de los elementos más notables son:

- Muy configurable debido a muchas opciones de configuración en tiempo de compilación.
- Soporte para muchas arquitecturas (x86, x86-64, ARM, ARM Thumb, Xtensa).
- Amplio conjunto de pruebas, con más de 590 pruebas y más de 18.500 casos de prueba individuales.
- Cobertura de código al 98,4 % para el núcleo y al 96,3 % para los módulos Core Plus Extended.
- Rápido tiempo de inicio; desde el inicio hasta la carga del primer *script* (150 microsegundos para llegar a boot.py, en PYBv1.1 a 168MHz).
- Soporte para ejecutar el código Python en una interrupción de disco duro con una latencia mínima.
- Un compilador cruzado y un *bytecode* congelado para tener *scripts* precompilados que no toman ninguna RAM (excepto los objetos dinámicos que crean).
- Subprocesos múltiples a través del módulo *_thread*, con un bloqueo de intérprete global opcional.
- Ensamblador en línea (actualmente solo conjuntos de instrucciones Thumb y Xtensa).

Esta es la lista de procesadores compatibles con MicroPython:

- pyboard. Esta es la primera placa MicroPython. Tiene soporte directo y para utilizarla simplemente se conecta, pues ya viene configurada directamente para ser utilizada.
- ESP8266 Adafruit. Con esta tarjeta se pueden ejecutar varios proyectos conectados a internet. Una característica especial es que se pueden ejecutar códigos mediante Shell desde un navegador web.
- WiPy. Esta es otra tarjeta que integra WiFi desarrollada por Pycom, ofreciendo un entorno de desarrollo amigable para ejecutar códigos MicroPython en ella.
- BBC micro:bit. Esta tarjeta cuenta con un gran soporte para cargarle códigos en MicroPython, y con herramientas para

programar y acceder a todos sus periféricos como leds, acelerómetro, radio, etc.
- Teensy 3.X. La serie 3.X de Teensy cuenta con un puerto que soporta MicroPython. Para esto hay que tener experiencia en *firmware* y compilación de código activar el funcionamiento del puerto (Morales, 2016).

2.5 *Plataforma de* software *para IoT*

2.5.1 *Google App Script*

Google Apps Script es una plataforma rápida de desarrollo de aplicaciones que facilita y agiliza la creación de aplicaciones empresariales que se integran con G Suite. Se escribe el código en JavaScript y se tiene acceso a las bibliotecas integradas para las aplicaciones favoritas de GSuite como Gmail, Drive y más. No hay nada que instalar: ofrece un editor de código directamente en el navegador y los *scripts* se ejecutan en los servidores de Google (Google, 2018).

Entre las acciones que se pueden realizar con el uso de Google App Script, se encuentran las siguientes:

- Agregar menús, cuadros de diálogo y barras laterales personalizados a Google Docs, hojas de cálculo y formularios.
- Escribir funciones personalizadas y macros para Google Sheets.
- Publicar aplicaciones web, ya sea independientes o integradas en Google Sites.
- Interactuar con otros servicios de Google, incluidos AdSense, Analytics, Calendar, Drive, Gmail y Maps.
- Crear complementos para ampliar Google Docs, hojas, diapositivas y formularios, para publicar en la tienda de complementos.
- Convertir una aplicación de Android en un complemento de Android, para que pueda intercambiar datos con Google Docs o la hoja de un usuario en un dispositivo móvil.

- Optimice los flujos de trabajo de Hangouts Chat mediante la creación de un *bot* de chat.

2.5.2 *Google Sheets*

Google Sheets es una aplicación de hoja de cálculo en línea que permite a los usuarios crear y formatear hojas de cálculo y trabajar simultáneamente con otras personas. Google Sheets no es solo para consumidores: las empresas y las escuelas lo utilizan todos los días para administrar los datos de las hojas de cálculo. Con el nuevo Sheets API v4 y los complementos de Sheets, se puede acceder a esos datos tanto por código como por usuarios (Google, 2017).

Ofrece características típicas de las hojas de cálculo, como la capacidad de agregar, eliminar y ordenar filas y columnas. La aplicación también permite a múltiples usuarios geográficamente dispersos colaborar en una hoja de cálculo en tiempo real y chatear a través de un programa integrado de mensajería instantánea. Los usuarios pueden cargar hojas de cálculo directamente desde sus computadoras.

Las características que hacen que Google Sheets sea tan exitoso están disponibles a través de la API Sheets. Con la API, su código puede acceder y actualizar hojas de cálculo como cualquier otro usuario. La API permite a sus aplicaciones lo siguiente:

- Importar, exportar y formatear datos de hojas.
- Control de formato condicional.
- Construir y editar gráficos incrustados en una hoja.
- Configurar la validación de datos.
- Crear y actualizar rangos con nombre y protegidos.
- Añadir y ajustar vistas filtradas.
- Crear y manipular tablas dinámicas.

2.5.3 *Google Sites*

Google Sites es una plataforma de creación de sitios web de Google. Es una aplicación que forma parte de G Suite de Google, que es un paquete de aplicaciones de Google que han sido optimizadas para el uso de las empresas. Esta aplicación permite crear un sitio web o una intranet de

forma muy sencilla. Con Google Sites, los usuarios pueden reunir en un único lugar y de una forma rápida información variada, como pueden ser videos, calendarios, presentaciones, archivos, etc. (Google, 2017).

El objetivo de Google Sites es que cualquier persona pueda crear un sitio web, permitiendo compartir información con un grupo reducido de personas, con toda su organización o con todo el mundo. Resulta muy útil en la creación de intranets, páginas de empleados, etc. Permite crear sitios web sin tener que saber cómo codificarlo uno mismo. Al igual que otras plataformas, como WordPress y Tumblr, Google Sites tiene características de creación de sitios que hacen que el diseño de su sitio sea fácil e intuitivo de la manera que desee. También puede agregar *gadgets* como calendarios, mapas, hojas de cálculo, presentaciones y más, para que su sitio sea más funcional.

Características del Google Sites:

- Una organización interna lo más eficiente posible es una tarea muy complicada en las empresas e instituciones, ya que algunas veces estas, por su estructura interna, son las que entorpecen la generación de nuevas ideas, limitan la comunicación entre departamentos o ralentizan los procesos. Una manera de mejorar esto es mediante la creación de una intranet que nos ayude a mejorar y organizar nuestra empresa.
- Ahorro de tiempo y costes. Ahorra costes, ya que, por ejemplo, en Google Sites puedes crear la intranet de forma gratuita si utilizas 100 MB de espacio. Y ahorra tiempo para los empleados, por ejemplo, en la búsqueda de información que necesitan, pudiendo dedicar ese tiempo a otras tareas.
- Mejora la rapidez y eficiencia en la comunicación con los empleados. La difusión de la información directamente en la intranet es mucho más rápida que por otras vías de comunicación; y la información queda almacenada para posteriores consultas. Permite difundir una misma información de manera simultánea para todos los empleados.
- Mejora la seguridad. Una intranet bien implantada es totalmente segura para la organización y los empleados. Se puede ocultar información de un departamento a otro.

- Aumenta la colaboración entre los empleados. Puede favorecer la colaboración de forma más rápida y eficiente, y que se creen sinergias entre los empleados mediante foros o redes sociales corporativas.
- Gestión del conocimiento. Dichos foros pueden permitir que los empleados aprendan unos de otros, difundiendo conocimientos.
- Conexión con la base de datos de la empresa y otras aplicaciones.
- Sin limitaciones horarias o de espacio. En caso de que usemos Google Sites, esto es relativo, ya que si usamos la versión gratuita nuestro espacio queda reducido a 100MB.

3. Metodología

3.1 *Tipo de estudio*

La propuesta se clasifica como investigación aplicada o investigación tecnológica. La metodología que se siguió se basó en el método científico aplicado a este tipo de investigaciones.

Este estudio fue del tipo investigación aplicada tecnológica o investigación técnica, la cual "tiende a la resolución de problemas o al desarrollo de ideas, a corto o mediano plazo, dirigidas a conseguir innovaciones, mejoras en procesos o productos, incrementos de calidad y productividad, etc." (Sanchez, 2011).

3.2 *Conjetura inicial*

A partir del análisis de la situación problemática, así como del estado de la técnica, se planteó la siguiente conjetura: ¿Es posible aplicar técnicas de IoT, sistemas embebidos y sensores electrónicos en el diseño e implementación de una estación de monitoreo remoto de contaminante PM?

3.3 *Diseño de estación IoT para monitoreo de contaminación ambiental PM*

Un sistema de IoT comprende múltiples niveles de componentes y despliegue, cada nivel debe estar diseñado para diferente función, por lo que consta de sus propios componentes y configuración. Por lo anterior, el diseño de sistemas de IoT puede ser una tarea compleja y desafiante,

ya que involucra la interacción entre dispositivos electrónicos, recursos de conectividad, servicios web, técnicas de análisis de datos, aplicaciones de visualización y servidores de almacenamiento.

La propuesta central de este trabajo es la implementación de una estación de IoT para el monitoreo de contaminación por material de partículas en el aire circundante. El desarrollo metodológico de esta investigación se basó en el modelo de referencia de arquitectura de un sistema de IoT, cuyas etapas se describen en la figura 11.

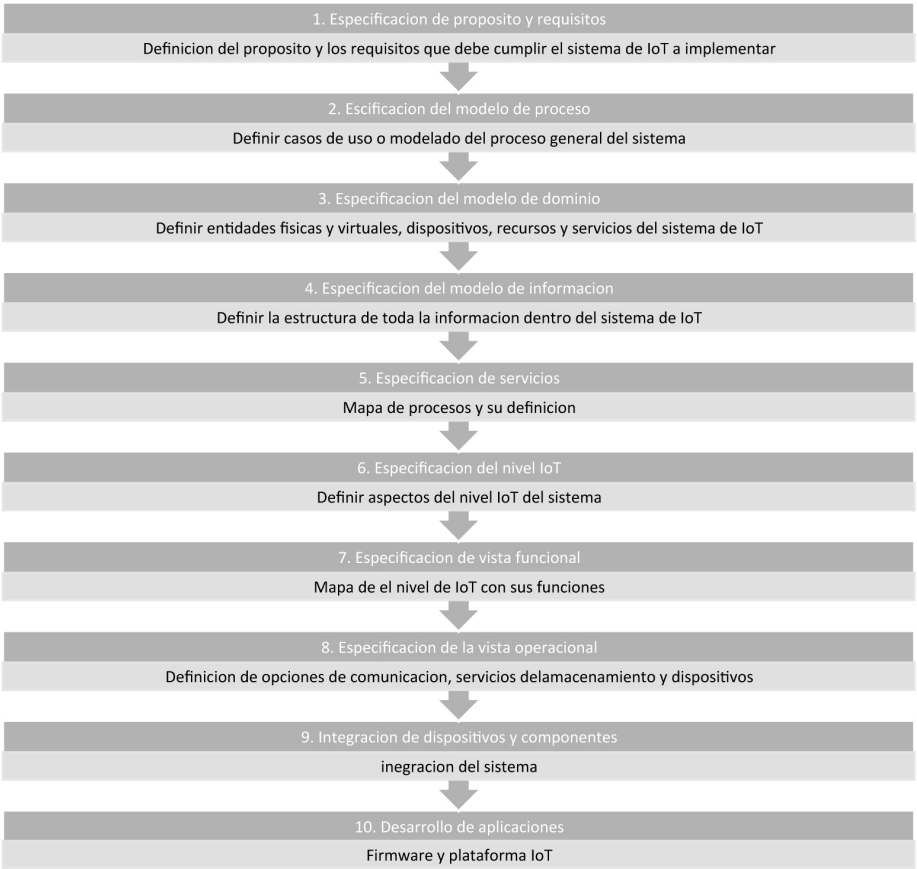

Figura 11.
Etapas de la metodología de referencia arquitectural
de un sistema IoT (Bahga, 2014)

El diseño del sistema se dividió en las etapas siguientes: (1) especificación del propósito y de los requerimientos, (2) especificación del modelo de proceso, (3) especificación del modelo de dominio, (4) especificación del modelo de información, (5) especificación de los servicios, (6) especificación del nivel IoT, (7) especificación funcional, (8) especificación operacional, (9) integración de dispositivos y componentes, (10) desarrollo de aplicaciones (Bahga, 2014).

A continuación, se detallan las decisiones de diseño para cada una de las etapas de la metodología mencionada en el desarrollo del sistema propuesto.

3.3.1 *Propósito y requerimientos del sistema*

Paso 1.

El primer paso en la metodología de diseño de sistemas de IoT consiste en definir el propósito, comportamiento y los requisitos del sistema tanto de *hardware* como de *software.*

- Propósito: Una estación de monitoreo automatizado para contaminante PM dotada de comunicación vía WiFi que permita el reporte y la visualización web de sus mediciones.

- Comportamiento: La estación debe estar dotada de sensores electrónicos capaces detectar el nivel de contaminante PM en el ambiente circundante; tendrá un controlador digital central programado para realizar una lectura periódica del sensor y a su vez transmitir, por medio de un transceptor WiFi, datos hacia un servicio o plataforma en la nube.

- Requerimiento para gestión: El sistema deberá poder ser monitoreado vía web; su gestión de programación y reconfiguración será local mediante un puerto USB dispuesto en la propia estación.

- Requerimiento para análisis de datos: Los procesamientos de los datos recolectados por el sensor serán realizados en la propia estación, y solo se enviarán valores puntuales al servicio en la nube.

- Requerimientos para el despliegue de aplicación: La aplicación, *firmware* o *software* de control será desplegada en la memoria flash del controlador dentro de la estación, pero su monitoreo se realizará desde la plataforma de IoT configurada para tal efecto.

- Requerimientos de seguridad: El sistema debe contar con autentificación básica de usuario para modificación y acceso a la plataforma IoT, sin embargo, será de acceso público para la visualización de mediciones.

3.3.2 *Especificación del proceso del sistema*

Paso 2.

El segundo paso de la metodología consiste en establecer claramente el modelo de proceso de funcionamiento del sistema, derivado de los requisitos de su propósito detallados en la etapa anterior. Se define un diagrama de los pasos por seguir, como se muestra en la figura 12. Solamente se define un caso de uso o de operación de forma repetitiva: al inicio del sistema se realizan acciones de configuración del *hardware* interno y externo del controlador, luego se consultan los sensores y se realiza una lectura del PM2.5, PM10 y temperatura, esta se formatea y se envía al servicio de IoT por medio de la red WiFi. El tiempo en que se repite la rutina puede ser modificado con base en los requerimientos de medición.

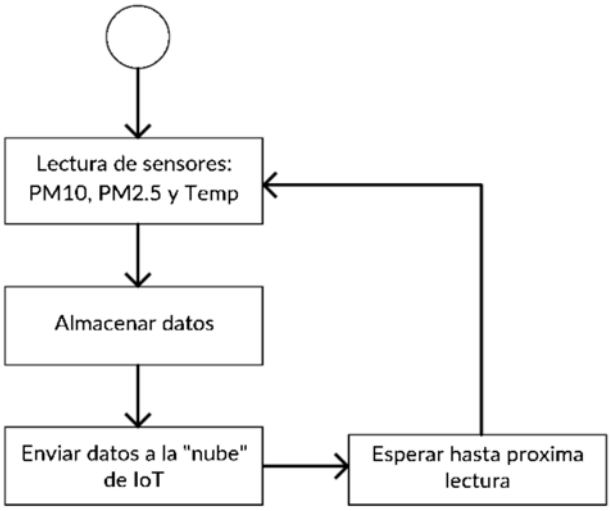

Figura 12.
Esquema del proceso funcional del sistema. Fuente: diseño propio.

3.3.3 *Especificación del modelo de dominio*

Paso 3.

El tercer paso en la metodología de diseño de IoT es definir el dominio del sistema, lo cual consiste en describir los principales conceptos, entidades y objetos en el dominio del sistema de IoT por diseñar. El modelo de dominio define los atributos de los objetos y relaciones entre estos, proporciona una representación abstracta de los conceptos, objetos y entidades en el dominio IoT, independientemente de cualquier tecnología específica o plataforma. Las entidades, objetos y conceptos en el dominio del modelo por especificar en esta etapa son: entidades físicas y virtuales, dispositivos, recursos y servicios del sistema que se diseñará.

- Entidad física: Una entidad física es aquella que es discreta e identificable en el mundo físico. El sistema de monitoreo propuesto tiene una entidad en su entorno físico: el ambiente circundante, al cual se le leerá su nivel de contaminación PM.

- Entidad virtual: Una entidad virtual, es una representación de la entidad física en el mundo digital. Para cada entidad física se determina una entidad virtual. En nuestro caso solamente tendremos una.

- Dispositivo: Los dispositivos proveen un medio para interactuar con las entidades físicas y virtuales. Para el sistema por diseñar se tienen: un dispositivo conocido como controlador programable con sensor de contaminante PM y un sensor de temperatura conectado a este.

- Recurso: Se definen como recursos de *software* los códigos o programas que se almacenan y ejecutan, ya sea dentro del dispositivo o en la red. Para el caso se tienen: un recurso o *firmware* ejecutándose en el dispositivo, y un *script* ejecutándose en la nube de IoT.

- Servicio: Los servicios en un sistema de IoT proveen una interface para interactuar con la entidad física. En el caso de esta propuesta, se tendrá un único servicio, el servicio controlador, ejecutado de forma nativa en el dispositivo, y es el encargado de realizar los procesos definidos anteriormente.

3.3.4 *Especificación del modelo de información*

Paso 4.

El cuarto paso en la metodología de diseño de IoT consiste en definir el modelo de información que define la estructura de toda la información en el sistema IoT, por ejemplo, los atributos de entidades virtuales, relaciones, etc. El modelo de información no describe los detalles de cómo se representan o almacenan los datos. Para definir el modelo de información, primero listamos las entidades virtuales definidas en el modelo de dominio. El modelo de información agrega más detalles a las entidades virtuales al definir sus atributos y relaciones. Para el sistema diseñado, se tiene una única entidad virtual. En la figura 13 se muestra el modelo de información para este sistema.

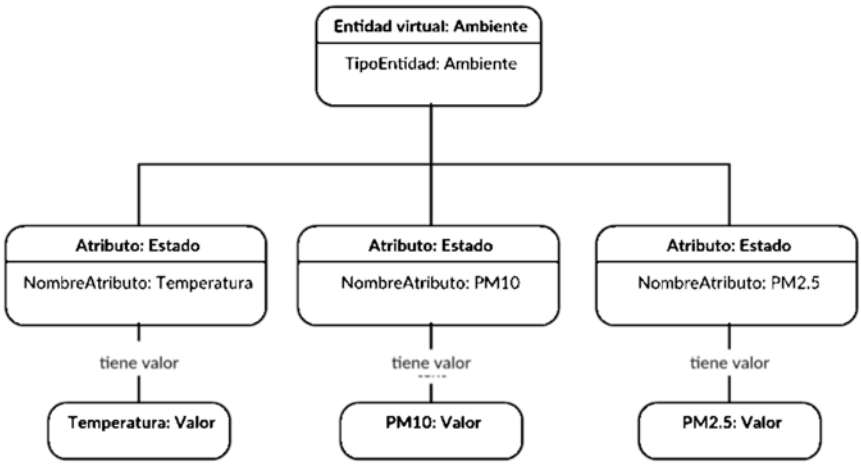

Figura 13.
Diagrama del modelo de información para el sistema IoT desarrollado.
Fuente: diseño propio.

3.3.5 *Especificación de servicios*

Paso 5.

El quinto paso en la metodología de diseño de IoT es definir las especificaciones del servicio, tales como los servicios en el sistema IoT, los tipos de servicio, las entradas /salidas, los puntos finales, los programas, las condiciones previas y los efectos del servicio.

Para el caso, se definió que se tendrá un único servicio: el servicio controlador, ejecutándose de forma nativa en el dispositivo, y está encargado de la toma de lectura de los sensores para los valores de temperatura y contaminantes PM; de una forma periódica según un valor determinado. Además, el servicio controlador está a cargo de conectar, por medio de enlace de internet, a un servicio en la nube, para almacenaje y despliegue de los valores captados por los sensores.

3.3.6 *Especificación de nivel IoT*

Según el estado de la técnica, en este paso se define en qué nivel IoT se clasifica el sistema propuesto. Para el caso se clasifica como Nivel-1, ya que es un sistema que tiene un único dispositivo o nodo, que realiza la lectura de sensores, almacena y envía los datos. Además, es un sistema de bajo costo de modelado y una solución de baja complejidad donde los datos involucrados no son de gran volumen, y no se requiere poder computacional alto para la ejecución de los procesos.

3.3.7 *Especificación funcional*

La vista funcional define grupos funcionales (GF) para las diferentes funciones del sistema de IoT. Cada grupo funcional provee, o bien las funciones para interactuar con las instancias de los conceptos definidos en el modelo de dominio o información relacionada con esos conceptos. En la vista funcional para el sistema IoT de esta propuesta se especifican los siguientes grupos funcionales:

- GF Dispositivo: Incluye el controlador programable, un sensor de material de partículas PM y un sensor de temperatura.
- GF Comunicaciones: Incluye los protocolos de comunicación del sistema IoT, para el caso: Capa de enlace 802.11, capa de red IPv4, capa de trasporte TCP y capa de aplicación HTTP. La comunicación se realiza por medio de una API basada en REST.
- GF Servicios: Solo se tiene un único servicio ejecutando dentro del sistema IoT, el servicio controlador.
- GF Administración: Se realiza por medio del recurso de programa o *firmware.*
- GF Seguridad: El mecanismo de seguridad se basa en credenciales de usuario único.
- GF Aplicación: La interface de monitoreo de los valores producidos por el sistema de IoT se realiza en la nube a modo de página web.

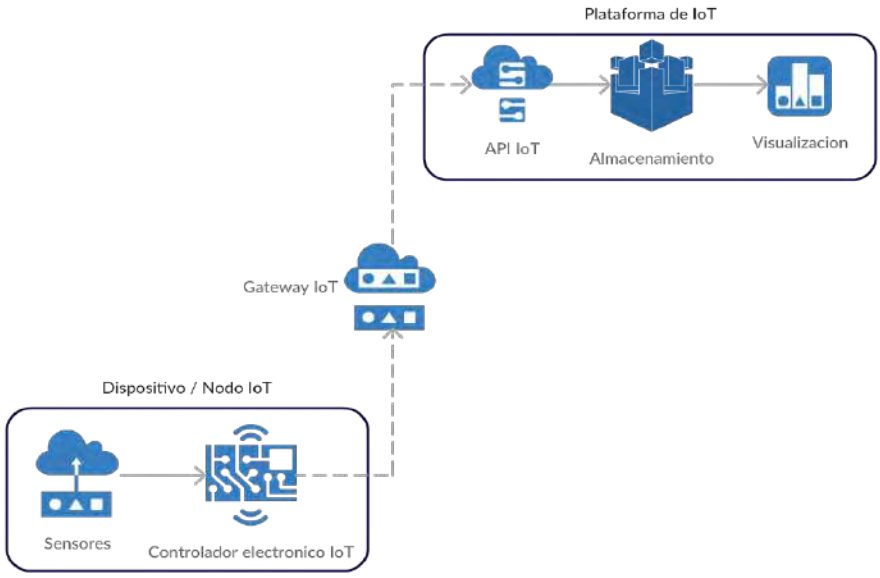

Figura 14.
Esquema general de los bloques funcionales del sistema de IoT desarrollado.
Fuente: diseño propio.

3.3.8 *Especificación operacional*

Se definen las opciones pertinentes al despliegue y la operación del sistema IoT, tales como servicios de alojamiento, almacenamiento, dispositivos, aplicaciones, etc.

- Dispositivo o Nodo IoT: Como controlador electrónico programable, se usa un microcontrolador LoPy Esp32; como elemento sensor de material de partículas, se selecciona el sensor PMS5007; y para la magnitud de temperatura se elige el sensor DS18B20; como actuador, se dispone de una pantalla Oled para despliegue en el dispositivo de los valores captados.
- API de comunicación: Google Script API.
- Protocolos de comunicación: 802.11, IPV4/6, TCP y HTTP.

- Servicios: Servicio controlador – alojado en el dispositivo, implementado en lenguaje MicroPython y ejecutándose como servicio nativo.
- Aplicaciones: Aplicación web – Google Sites, Aplicación de base de datos – Google Sheets y Aplicación de servicio – Google Script App.
- Seguridad: Autenticación – Credenciales de cuenta de Google Suite.
- Administración: Dispositivo – Atom IDE para LoPy, aplicaciones – Google Drive.

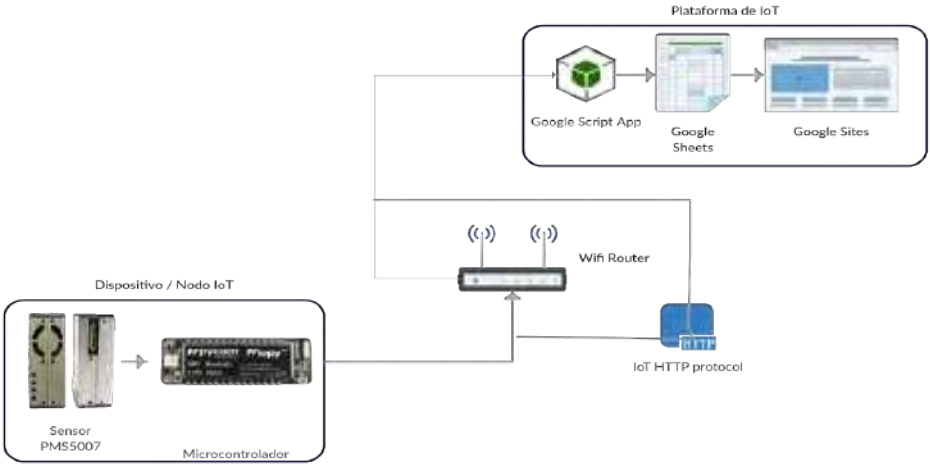

Figura 15.
Esquema general de los bloques operacionales del sistema de IoT diseñado.
Fuente: diseño propio.

3.3.9 *Integración dispositivos y componentes*

En la figura 16 se muestra el diseño del diagrama esquemático o circuito de conexiones eléctricas del dispositivo o nodo de IoT del sistema. Los principales componentes usados son: la tarjeta microcontrolador LoPy Esp32, una pantalla Oled y los sensores PMS5003 y DS18b20.

La conexión entre el sensor de contaminante PM y la tarjeta LoPy se realiza usando el puerto UART, pines P0 y P1 del microcontrolador.

Para conectar el sensor de temperatura, se utilizan los pines del puerto I2C, disponibleS en los pines P9 y P10 del microcontrolador. El mismo puerto se utiliza para la interface con la pantalla Oled.

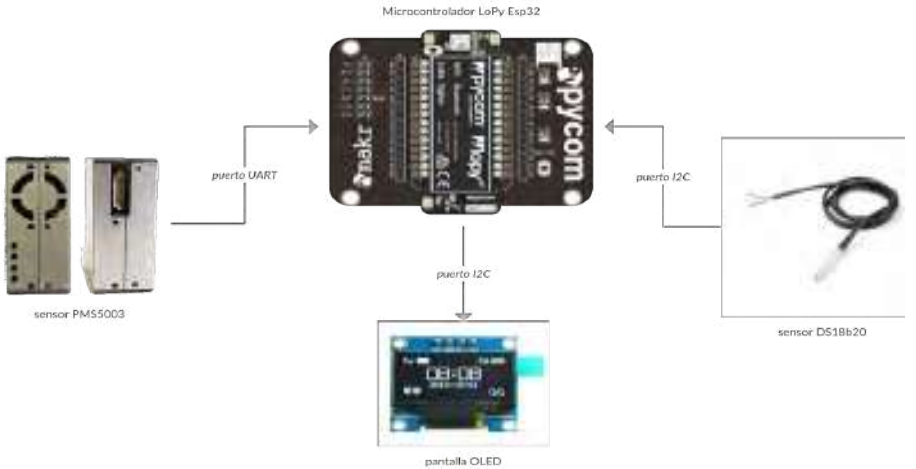

Figura 16.
Esquema de integración de los componentes electrónicos del sistema IoT desarrollado. Fuente: diseño propio.

3.3.10 *Desarrollo de aplicaciones*

Las aplicaciones o programas que se ejecutan en el sistema de IoT desarrollado son:

- *Firmware* del dispositivo: Desarrollado en lenguaje MicroPython; en la figura 17 se puede ver su flujograma de control. El programa sigue una estructura cíclica, basada en tareas bien puntuales: 1. Lectura de los sensores para obtener variables con los valores de PM10, PM2.5 y Temperatura, 2. Almacenar estos valores localmente, 3. Mostrar las lecturas en la pantalla local del dispositivo, 4. Formateo de la trama o paquete por enviar a la nube, 5. Envío a la nube y 6. Esperar por la próxima lectura. El listado del código fuente se incluye en el anexo 1, al final del documento.

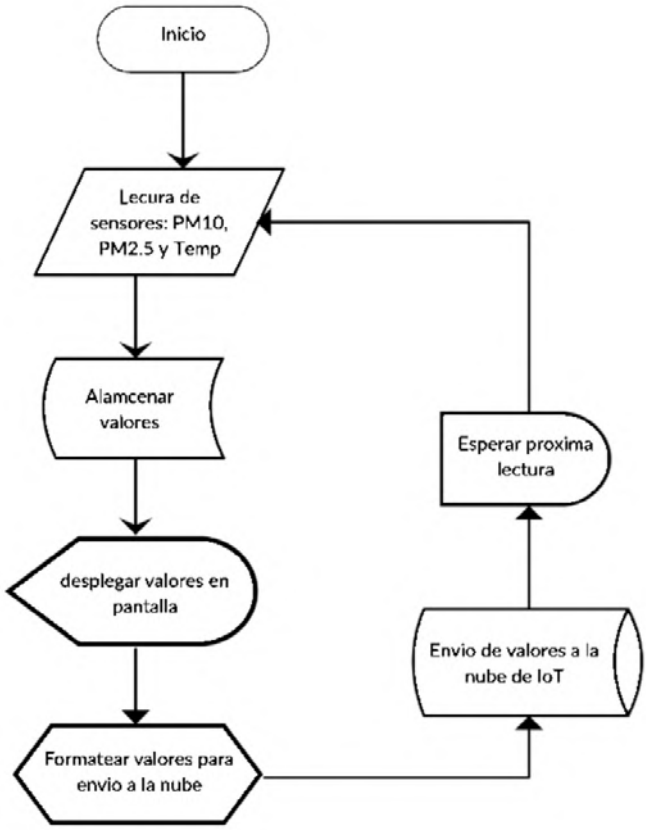

Figura 17.
Flujograma general del *firmware* de control del dispositivo para el sistema desarrollado. Fuente: diseño propio.

- *Script* de servicio en la nube: Desarrollado en lenguaje Java Script, alojado en los servicios de Google Script App, usando para la conexión la API respectiva. En la figura 18 se muestra el flujograma de control del *script*. En el anexo 2, al final de documento, se muestra el listado del código fuente del *script* desarrollado. Hay que mencionar que, para acceder a utilizar los servicios de la suite de Google, es necesario la creación de una cuenta personal o institucional.

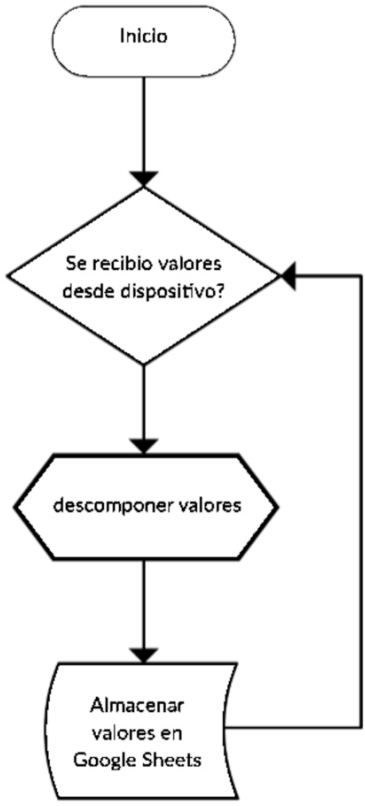

Figura 18.
Flujograma general del *script* para la plataforma IoT del sistema desarrollado.
Fuente: diseño propio.

Aplicación web: Se desarrolló usando los servicios de Google Sites, donde se despliegan gráficos y tablas con los valores captados por el nodo IoT. En la figura 19 se muestra una captura de pantalla del sitio referido. El sitio web obtiene la información por mostrar desde una hoja de cálculo de Google Sheets, que es donde se almacenan los valores provenientes del nodo IoT.

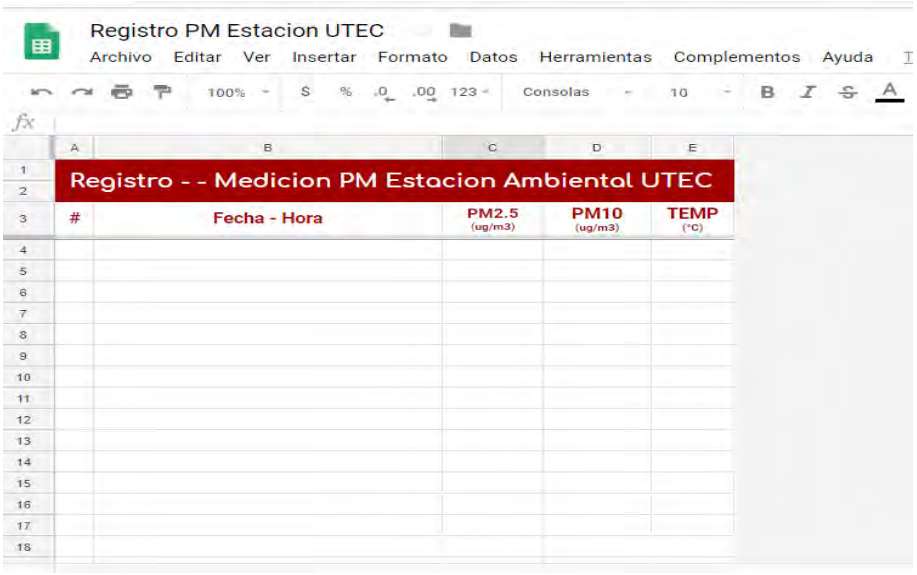

Figura 19.
Diseño de la hoja de cálculo en Google Sheets configurada para el sistema IoT desarrollado. Fuente: diseño propio

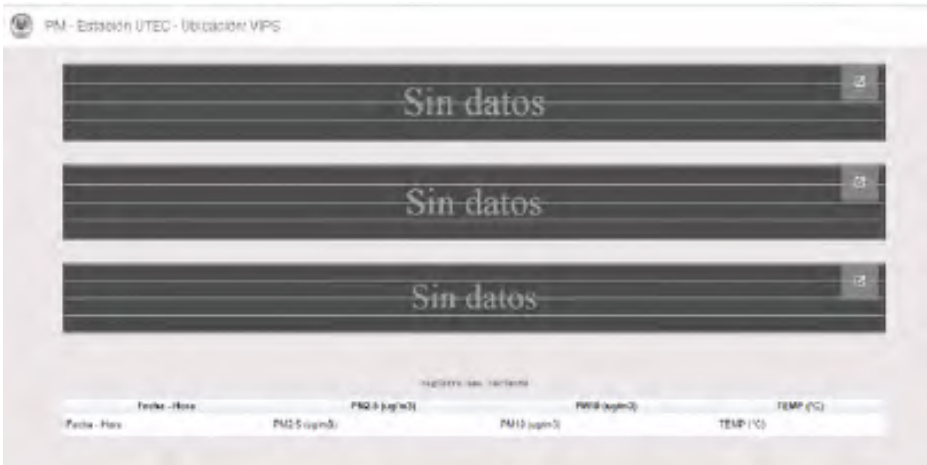

Figura 20.
Diseño del sitio web en Google Sites para el sistema IoT desarrollado.
Fuente: diseño propio.

4. Resultados

Luego de la etapa de diseño, se procedió a la construcción e implementación física y se obtuvieron, como frutos del presente proyecto de investigación aplicada, los que se describen a continuación.

4.1 *Estación remota monitoreo PM*

El principal resultado de este proyecto es el prototipo de IoT de estación electrónica que permite monitorear los niveles de contaminación por material de partículas, la cual se muestra en la figura 21, y que entre sus características se pueden mencionar las siguientes: es un diseño a la medida de las necesidades propias de las condiciones de monitoreo de sistema salvadoreño; se basó en la elección de componentes electrónicos de última generación, así como asequibles y eficientes; y está abierto a la expansión de magnitudes por monitorear.

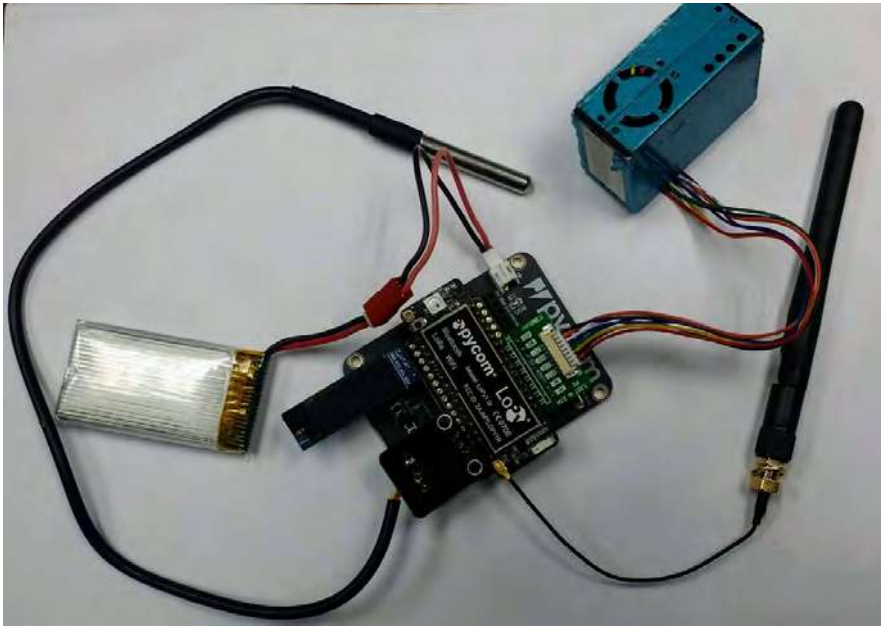

Figura 21.
Componentes electrónicos que integran el hardware del nodo IoT del sistema implementado. Fuente: diseño propio.

Figura 22.
Vista al interior de la carcasa del nodo Iot del sistema diseñado.
Fuente: diseño propio.

Figura 23.
Vista externa completa del nodo IoT del sistema diseñado.
Fuente: diseño propio.

Figura 24.
Estación o nodo IoT operando en exteriores. Fuente: diseño propio.

A continuación, se mencionan detalles de operación del prototipo.

Operación eléctrica:

- Voltaje de operación: 110 Vac
- Consumo de potencia: 0.4W máx.
- Temperatura de trabajo: +60 °C máx.
- Dimensiones: 25x15x10 AxLxP

Operación de medición:

- Rango efectivo PM2.5/10: 0~500 ug/m3
- Error máximo: ±10 %
- Rango efectivo temperatura: 0~150 °C
- Error máximo: ±5 %
- Rango de cobertura: 1 litro de aire por toma

Operación de comunicación:

- Enlace: Internet WiFi 802.11
- Potencia de transmisión: 14 dBm típica

4.2 *Pruebas de campo*

El sistema diseñado se implementó en diferentes puntos de prueba exterior, con el objetivo de observar su desempeño y verificar su operación, para realizar los ajustes necesarios.

4.2.1 *Campus central Utec*

El prototipo se instaló en el edificio de la Vicerrectoría de Investigación y Proyección Social de la Utec, ubicado sobre la 19.ª avenida Sur y calle Arce, en el centro de San Salvador. En la figura 25 se observa dicha instalación. El monitoreo de los datos recabados por esta estación se pueden observar por medio de cualquier dispositivo con acceso al internet, visitando https://sites.google.com/mail.utec.edu.sv/estacion-pm-utec/p%C3%A1gina-principal.

Figura 25.
Nodo IoT instalado en fachada de edificio en la Utec. Fuente: diseño

propio.

En las figuras 26 y 27 se pueden observar capturas de pantalla de dicho sitio web, donde se aprecian los gráficos o dashboard para visualizar el histórico de valores de las lecturas. Así también, en el sitio web se incluye la tabla de valores de los sensores de la estación.

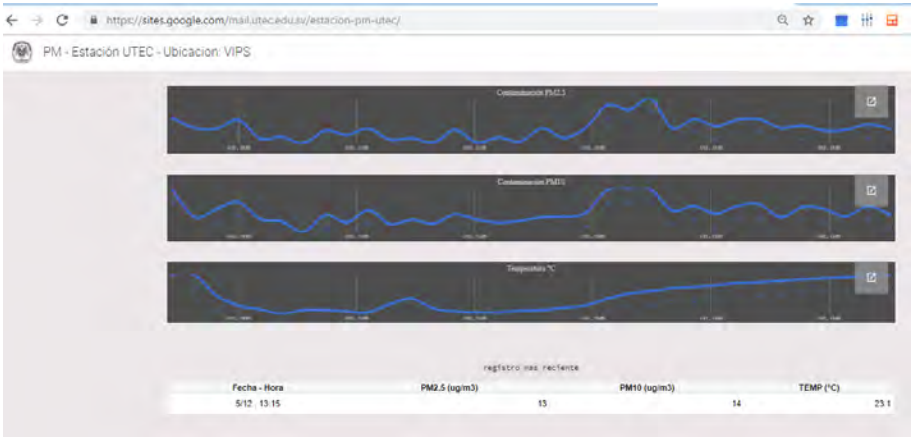

Figura 26.
Pantalla de gráficos del sitio web de monitoreo para experimento en campus central Utec. Fuente: diseño propio.

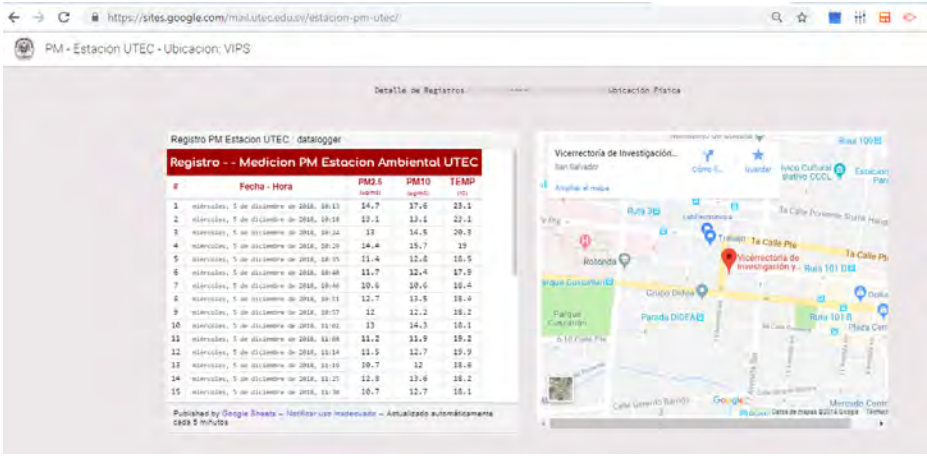

Figura 27.
Pantalla de gráficos del sitio web de monitoreo para experimento

en campus central Utec. Fuente: diseño propio.

4.2.2 *Estación temporal Alicante*

Otro experimento se realizó en la ciudad de Alicante, España, gracias a una pasantía estudiantil de los investigadores. En esa ocasión se instaló una estación en la zona centro de la referida cuidad, obteniendo los resultados que se muestran en la figura 28 y en el sitio web accesible desde https://sites.google.com/mail.utec.edu.sv/estacionpmutecalicante/p%C3%A1gina-principal.

Figura 28.
Montaje exterior para experimento en ciudad de Alicante, España.
Fuente: diseño propio.

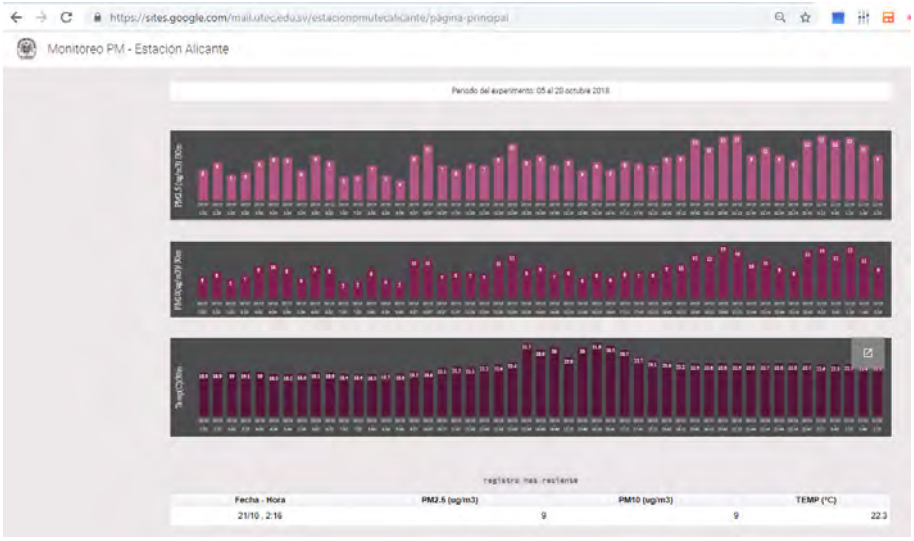

Figura 29.
Pantalla de gráficos del sitio web de monitoreo para experimento en ciudad de Alicante, España. Fuente: diseño propio.

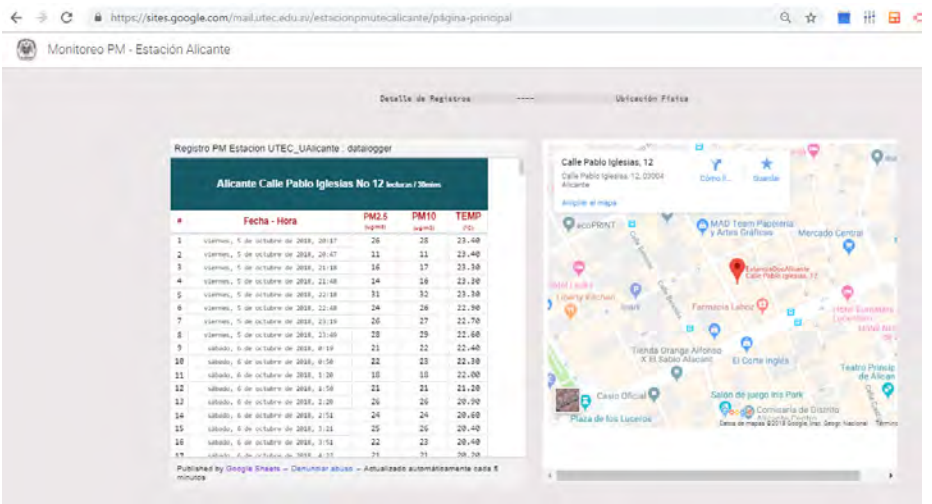

Figura 30.
Pantalla de datos del sitio web de monitoreo para experimento en ciudad de Alicante, España. Fuente: diseño propio.

4.2.3 *Colaboración con proyecto espectrofotometría UES*

La Universidad de El Salvador (UES) invitó al equipo de investigadores Utec a colaborar en campañas de medición de contaminación ambiental, dentro de un proyecto propio de la UES, que consistía en tomar lectura del ácido nitroso (HONO) en el ambiente. La estación de medición de material contaminante PM, fruto de investigación presentada, fue utilizada en el proyecto de la UES con el objetivo de analizar los efectos de la contaminación PM en los niveles de HONO en un mismo ambiente. En la figura 31 se muestra un póster de presentación de resultados de las campañas de medición realizadas en conjunto UES-Utec.

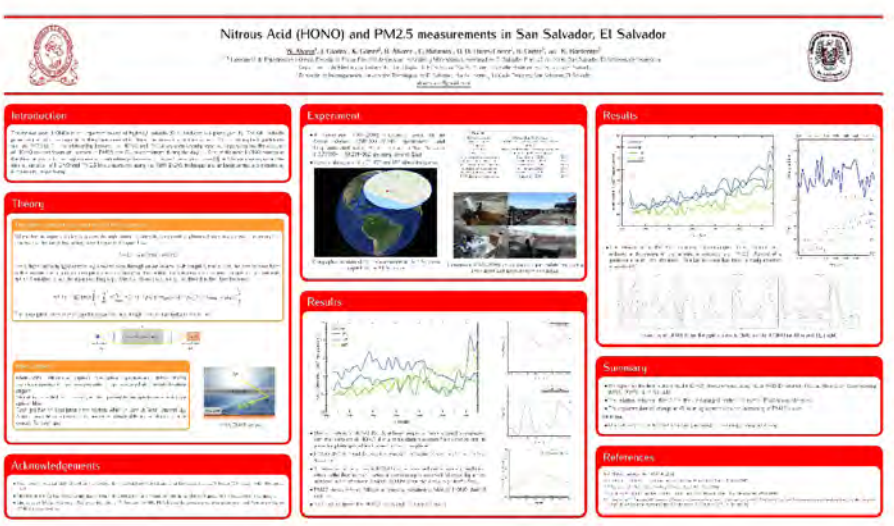

Figura 31.
Póster de resultados de las mediciones realizadas en proyecto de colaboración UES-Utec. Fuente: diseño propio.

5. Conclusiones y trabajos futuros

El desarrollo de una estación de IoT para el monitoreo del nivel de contaminante PM en el ambiente, es un paso fundamental en el estudio de comportamiento, impactos y acciones dentro del estudio y cuido de medio ambiente.

El prototipo de estación fue desarrollado utilizando técnicas actuales de electrónica, programación e IoT, lo cual permitió producir un equipo de bajo costo y que funciona según los requisitos esperados, cumpliendo así el objetivo principal de esta primera fase del proyecto de línea de investigación sobre monitoreo ambiental.

El uso de herramientas como el microcontrolador LoPy junto con el lenguaje de programación MicroPython permite el desarrollo de prototipos de IoT a un bajo costo, con tiempos de desarrollo cortos y un alto desempeño. Además, utilizando las aplicaciones del Google Suite se ha podido desarrollar una plataforma en la nube de IoT en corto tiempo y capaz de mostrar en forma dinámica y comprensible los datos capturados por las estaciones.

Los datos producidos por las estaciones de monitoreo remoto han sido comparados con los reportados por estaciones cercanas propiedad del MARN, con lo cual se ha verificado que el desempeño es similar.

Se ha aportado conocimiento científico nuevo, de manera que se muestran nuevas e innovadoras técnicas de uso de componentes de *hardware* y *software*, en la implementación de sistemas de IoT. Estas pueden ser aplicadas en nuevos desarrollos, permitiendo la creación de prototipos de forma rápida y eficiente.

Como trabajo futuro se tiene proyectado el desarrollo de más estaciones para diferentes locaciones dentro del territorio nacional, realizar experimentos de validación en conjunto con el MARN, implementar una red de monitoreo a través de enlaces de radiofrecuencia, el análisis de datos masivos o *big data* producidos por las estaciones. Utilizar los conocimientos frutos de este proyecto en el desarrollo de nuevas líneas de investigación aplicada, en áreas como: análisis de mantos acuíferos, campos de agricultura y ganadería, análisis de desempeño deportivo, entre otros.

6. Referencias

Bahga, A. (2014). *Internet of things A hand-on approach.* Lexington: VPT.

Cisco. (15 de Abril de 2011). Obtenido de https://www.cisco.com/c/dam/global/es_mx/solutions/executive/assets/pdf/internet-of-things-iot-ibsg.pdf

Dave Evans. (2011). *Internet de las cosas.* Cisco IBSG.

Dominici, F. (2012). Protecting Human Health from Air Pollution: Shifting from a Single-Pollutant to a Multi-pollutant Approach. *Epidemiology*, 187-94.

ECLAC. (2015). *Economic Comission for Latin America and the Caribbean.* Obtenido de https://www.cepal.org/en/pressreleases/2014-edition-eclacs-statistical-yearbook-already-available

Elsom, D. (1990). La contaminación atmosférica. *Universidad de Barcelona*, 15.

Fenosa. (2018). *La Calidad del aire en las ciudades.* Madrid: Fundacion Gas Natural.

Fenosa, F. G. (2018). *La calidad del aire en las ciudades. Un reto mundial.* Madrid: Fundación Gas Natural Fenosa.

George Robotics Limited. (2018). *MicroPython*. Obtenido de https://micropython.org/

Google. (2017). *Google Sheets*. Obtenido de https://developers.google.com/sheets/

Google. (2018). *Overview of Google Apps Script*. Obtenido de https://developers.google.com/apps-script/overview

Huff, A. K. (10 de 09 de 2009). La Contaminación Atmosférica por Material Particulado (PM2.5 y PM10). *Comunicado Información sobre la Calidad del Aire en Centroamérica* (pág. 18). Panamá: Battelle Memorial Institute. Obtenido de https://slideplayer.es/slide/2310929/release/release/woothee

Korc, M. (1999). *Monitoreo de la calidad del aire en america latina.* Lima: Organizacion panamericana para la salud.

MARN. (2016). *Calidad del aire*. Obtenido de http://www.marn.gob.sv/calidad-del-aire/

MARN. (15 de 03 de 2016). *marn.gob.sv*. Obtenido de http://www.marn.gob.sv/calidad-del-aire/

MARN. (Abril de 2018). *Monitoreo de la calidad del aire en linea*. Obtenido de www.marn.gob.sv/monitoreo-de-la-calidad-aire-en-linea/

MARN República Dominicana. (agosto de 2017). *REGLAMENTO TÉCNICO AMBIENTALDE CALIDAD DELAIRE.* Santo Domingo. Obtenido de http://ambiente.gob.do/wp-content/uploads/2017/01/REGLAMENTO-T%C3%89CNICO-AMBIENTAL-CALIDAD-DEL-AIRE.12.09.2017.pdf

Márquez, N. (2015). *tuataratech.com*. Obtenido de http://www.tuataratech.com/2015/06/ciudades-inteligentes-smart-cities.html

Ministerio de Salud. (15 de 12 de 2017). *EMISIONES ATMOSFERICAS DE FUENTES FIJAS 2017.* San Salvador: Ministerio de Salud. Obtenido de http://usam.salud.gob.sv/images/ambiental/aire/emisiones_atmosfericas_2017.pdf

Mit. (2017). *Github*. Obtenido de https://github.com/micropython/micropython/blob/master/logo/vector-logo-inkscape_master.svg

Morales, M. (12 de 08 de 2016). *T.Bem*. Obtenido de https://teslabem.com/blog/que-es-micropython/

OPS. (2018). Obtenido de https://www.paho.org/hq/index.php?option=com_content&view=article&id=14454:ambient-and-household-air-pollution-and-health-frequently-asked-questions&Itemid=72243&lang=es

OPS. (2018). *Contaminación del Aire Ambiental.* Obtenido de https://www.paho.org/hq/index.php?option=com_content&view=article&id=12918:ambient-air-pollution&Itemid=72243&lang=es

Pycom. (2017). *Kit de desarrollo de frecuencia de radio, LoPy,.* Obtenido de https://es.rs-online.com/web/p/kits-de-desarrollo-de-radio-frecuencia/1259532/

Radic, L. (2015). *¿Tu centro de contacto está preparado para Internet de las Cosas?* Obtenido de http://ccsur.com/tu-centro-de-contacto-esta-preparado-para-internet-de-las-cosas/

Ray, P. (2018). A survey on Internet of Things architectures. *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*.

Rouse, M. (2017). *Internet de las cosas (IoT)*. Obtenido de https://searchdatacenter.techtarget.com/es/definicion/Internet-de-las-cosas-IoT

Salguero, B. (2014). *Contaminación ambiental y su relación con síntomas respiratorios en los pacientes que asisten a la consulta de pediatría de la Clínica El Carmelo, Soyapango, y consulta de neumología del Hospital Nacional Benjamín Bloom.* San Salvador: Repositorio UES.

Sanchez, J. C. (2011). *Metodología de la investigación científica y tecnológica.* Madrid: Ediciones Díaz de Santos.

Sedema. (2006). *Índice de Calidad del Aire*. Obtenido de http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=%27ZaBhnmI=&dc=%27Zw==

Telefonica. (2018). *Internet de las Cosas: la tecnología que ya está cambiando el mundo*. Obtenido de https://www.elespanol.com/economia/20180305/internet-cosas-tecnologia-cambiando-mundo/286721734_0.html

Troposfera. (2005). *¿Qué es la Calidad del Aire?* Obtenido de http://www.troposfera.org/conceptos/calidad-aire/

UN. (2019). *World Population Prospects 2019.* Obtenido de https://population.un.org/wpp/

WHO. (2009). *Air quality guidelines - global update 2005.* World Health Organization. Obtenido de http://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair_aqg/en/

WHO. (2016). *Burning opportunity.* Switzerland : WHO Library Cataloguing-in-Publication Data. Obtenido de https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/204717/9789241565233_eng.pdf;jsessionid=0312C3EB2BFB47D7C4E0A80D48F613A8?sequence=1

WHO. (2016). *World Health Organization.* Switzerland: World Health Organization. Obtenido de https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/204717/9789241565233_eng.pdf;jsessionid=0312C3EB2BFB47D7C4E0A80D48F613A8?sequence=1

Yong, Z. (2016). *DSENSOR.* Obtenido de http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/resources-page/plantower-pms5003-manual_v2-3.pdf.

7. Anexos

7.1 *Listado del código para microcontrolador LoPy*

```
# ********************************
# Aim: to control a IoT device to measurement PM Air Quality
# Hardware: Lopy Board + PMS5003 sensor + DSB20 sensor +
OledDisplay
# Main Fuction: take a measurement of PM2.5 and PM10,
display it and
# send it via Internet to a "Cloud Storage" (Google)
# Author: omar.flores@utec.edu.sv
# last update: sep18
# ************************************
# usefull links
# https://www.tiny-dev.com/images/lopy_pinout.png
# https://github.com/pycom/pycom-micropython-sigfox/blob/
master/docs/lopy/quickref.rst
#
# Hardware conections
# Lopy ----- Peripherial
# G17 ----- SCL Oled
# G16 ----- SDA Oled
#


# import Libraries
import gc
import machine #to use machine-core fuctions
from machine import I2C #to use I2C port onboard
from machine import Timer, Pin, PWM
import ssd1306 #to manipulated OledDisplay
import time #to use time functions
import pycom #to use some features of pycom boards
#to read PMSx sensors
from pms5003 import PMS5003, PMSData
import _thread
import utime
# to use WLAN onboard
from network import WLAN
import config #file with credentials
wlan = WLAN(mode=WLAN.STA, antenna=WLAN.EXT_ANT) # configure
as Station
```

```
#for read Temp Sensor
from onewire import DS18X20
from onewire import OneWire
#in order to make HTTP urequests
import urequests
pycom.heartbeat(False) #turn off the onboard Led

# make some object / declarations
# in order to use OledDisplay
# sda, scl
i2c = machine.I2C(0, machine.I2C.MASTER, baudrate=400000,
pins=('P9','P10'))
lcd = ssd1306.SSD1306_I2C(128,32,i2c) #size of OledDisplay
# in order to comunicated with PMS sensor
# PMS5003:
# def __init__(en, tx, rx, rst):
#pmSensor  =  PMS5003(Pin.module.P6,  Pin.module.P4,  Pin.
module.P3, Pin.module.P5)
pmSensor  =  PMS5003(Pin.module.P11,  Pin.module.P4,  Pin.
module.P3, Pin.module.P12)
# in order to read DS18B20 data line connected to pin P10
ow = OneWire(Pin('P8'))
temp = DS18X20(ow)
#tSensor = temp.read_temp_async()
tSensor = round(temp.read_temp_async(),1)
time.sleep(1)
temp.start_conversion()
time.sleep(1)
# use to access Google Script
urlGAScript  =  'https://script.google.com/a/mail.utec.edu.
sv/macros/s/*********/exec?'
# a welcome message
lcd.fill(0)
lcd.text(" Bienvenido",0,0)
lcd.text("Estacion AQ-PM",0,12)
lcd.text(" Utec",0,24)
lcd.show()
time.sleep(3)
lcd.fill(0)

# setup of WiFi conections
print (config.ssid)
nets = wlan.scan()
for net in nets:
 if net.ssid == config.ssid:
```

```
 print('Network found!')
 lcd.text('Network found!',0,12)
 lcd.show()
  wlan.connect(net.ssid,  auth=(net.sec,  config.password),
timeout=5000)
 while not wlan.isconnected():
 machine.idle() # save power while waiting
 print('WLAN connection succeeded!')
 break
print(wlan.ifconfig())

# wifi link message
lcd.fill(0)
lcd.text(" Wifi",0,0)
lcd.text(config.ssid,0,12)
lcd.text(" done!",0,24)
lcd.show()
time.sleep(3)
lcd.fill(0)

# main loop / runs for ever
while True:
 #to read temperature sensor
 tSensor = round(temp.read_temp_async(),1)
 #tSensor = temp.read_temp_async()
 time.sleep(1)
 temp.start_conversion()
 time.sleep(1)
 tempStr = str(tSensor)
 #read PM sensor
 pmSensor.wake_up()
 frames = pmSensor.read_frames(5)
 pmSensor.idle()
 cpm25 = 0
 cpm10 = 0
 pm25 = 0
 pm10 = 0
 for data in frames:
 cpm25 += data.cpm25
 cpm10 += data.cpm10
 pm25 += data.pm25
 pm10 += data.pm10
 mean_data = PMSData(cpm25/len(frames), cpm10/len(frames),
\
 pm25/len(frames), pm10/len(frames))
```

```
 #print('PM25: {}, PM10: {}' \
 #.format(mean_data.pm25, mean_data.pm10))
 print('cPM25: {}, cPM10: {}, PM25: {}, PM10: {}' \
 .format(mean_data.cpm25, mean_data.cpm10, mean_data.pm25,
mean_data.pm10))
 time.sleep(1)
 lcd.fill(0)
 lcd.text("PM2.5 = ",0,0)
 lcd.text(str(mean_data.pm25), 64,0)
 lcd.text("PM10 = ",0,12)
 lcd.text(str(mean_data.pm10), 64,12)
 lcd.text("TEMP = ",0,24)
 lcd.text(str(tSensor) + " C",64,24)
 #lcd.text(str(int(temp.read_temp_async())),64,24)
 lcd.show()
 print("****************************************")
 # post to Google Sheets
 pm25 = str(mean_data.pm25)
 pm10 = str(mean_data.pm10)
 # construt the final Url with Values to post
 urlFinal = urlGAScript + 'pm25=' + pm25 + '&pm10=' + pm10
+'&temp=' + tempStr
 # make a request to App Script
 try:
 r = urequests.get(urlFinal)
 r.close()
 except NotImplementedError:
 print("NotImplementedError")
 pass
 #print(r.text)
 gc.collect()
 #r.close()
 time.sleep(60)

#----code end----
```

7.2 *Listado del código para Google Script App*

```
function doGet(e){
 Logger.log("--- doGet ---");

 var pm25 = "",
 pm10 = "",
 temp = "";

 try {

 // this helps during debuggin
if (e == null){e={}; e.parameters = {tag:"test",value:"-1"};}

 pm25 = e.parameters.pm25;
 pm10 = e.parameters.pm10;
 temp = e.parameters.temp

 // save the data to spreadsheet
 save_data(pm25, pm10, temp);


 return ContentService.createTextOutput("Wrote:\n pm25: "
+ pm25 + "\n pm10: " + pm10 + "\n temp: " + temp);

 } catch(error) {
 Logger.log(error);
 return ContentService.createTextOutput("oops...." + error.
message
 + "\n" + new Date()
 + "\npm25: " + pm25 +
 + "\npm10: " + pm10 +
 + "\ntemp: " + temp);
 }
}

// Method to save given data to a sheet
function save_data(pm25, pm10, temp){
 Logger.log("--- save_data ---");


 try {
```

```
 var dateTime = new Date();

 // Paste the URL of the Google Sheets starting from https
thru /edit
 // For e.g.: https://docs.google.com/..../edit
  var ss = SpreadsheetApp.openByUrl("https://docs.google.
com/spreadsheets/d/*********/edit");
 var dataLoggerSheet = ss.getSheetByName("datalogger");


 // Get last edited row from DataLogger sheet
 var row = dataLoggerSheet.getLastRow() + 1;


 // Start Populating the data
 dataLoggerSheet.getRange("A" + row).setValue(row -3); //
ID - 3 porque los datos empezaran en la 4ta fila
  dataLoggerSheet.getRange("B" + row).setValue(dateTime);
// dateTime
 dataLoggerSheet.getRange("C" + row).setValue(pm25); // tag
  dataLoggerSheet.getRange("D" + row).setValue(pm10); //
value
  dataLoggerSheet.getRange("E" + row).setValue(temp); //
value


 // Update summary sheet
  summarySheet.getRange("B1").setValue(dateTime); // Last
modified date
 // summarySheet.getRange("B2").setValue(row - 1); // Count
 }

 catch(error) {
 Logger.log(JSON.stringify(error));
 }

 Logger.log("--- save_data end---");
}
```

Breve hoja de vida de los investigadores

Omar Otoniel Flores Cortez. Posee una maestría en Docencia y un postgrado en Educación Virtual de la Universidad Tecnológica de El Salvador (Utec). Actualmente es investigador y docente titular del departamento de Electrónica de esta universidad en las áreas de programación de plataformas para sistemas embebidos, robótica y domótica educativa. Cursó la carrera de Ingeniería Eléctrica en la Universidad de El Salvador. Posee un postgrado en Robótica de la Universidad Internacional de la Rioja. Además, es doctorando en Informática de la Universidad de Alicante. Está enfocado en investigaciones aplicadas en el área del internet de las cosas y sus aplicaciones dentro y fuera del aula, incluyendo aspectos como monitoreo de la calidad del aire, nivel de madurez y frescura de frutas, registro automatizado de asistentes, nuevas fuentes de energía: estudio de energía azul en Centroamérica, entre otros.

Ronny Adalberto Cortez Reyes. Cursó la carrera de Ingeniería en Sistemas y Computación y un postgrado de Educación en Entornos Virtuales en la Universidad Tecnológica de El Salvador (Utec). Actualmente es investigador a tiempo completo en la Dirección de Investigaciones y docente en el área de redes de esta universidad. Posee un Máster Universitario Oficial en Ciencia de Datos e Ingeniería de Computadores de la Universidad de Granada con especialidad en Ciencia de Datos y Tecnologías Inteligentes. Además, estudió sobre minería de datos, inteligencia artificial y seguridad informática en Mondragon Unibertsitatea. Sus investigaciones incluyen temas sobre extracción de conocimiento a partir de textos, implementación de tecnologías IoT y *machine learning*.

Verónica Idalia Rosa de Rivera. Cursó la carrera de Ingeniería en Sistemas y Computación, un Máster en Docencia Universitaria y un postgrado en Entornos virtuales para la práctica docente en la Universidad Tecnológica de El Salvador (Utec). Actualmente es profesora e investigadora en la escuela de Informática de esta universidad. Posee un Máster en Visual Analitycs y *Big Data* de la Universidad de La Rioja. Es estudiante del Doctorado en Informática de la Universidad de Alicante. Sus investigaciones se centran en programación, análisis y *big data*, incluyendo temas como aplicación de herramientas *big data* al Viceministerio de Vivienda y Desarrollo Urbano del Ministerio de Obras Públicas de El Salvador, aplicaciones de Windows Forms con C#, monitoreo de la calidad del aire, nivel de madurez y frescura de frutas, brechas de género en los estudios de ingeniería en sistemas y computación de la Utec, entre otros.

Colección Investigaciones 2003-2019

Publicación	Nombre	ISBN
2003	Historia de la Economía de la Provincia del Salvador desde el siglo XVI hasta nuestros días. Primer Tomo Siglo XVI Jorge Barraza Ibarra	99923-21-12-1 (v 1) 99923-21-11-3 (Edición completa)
Diciembre 2003	Recopilaciones Investigativas. Tomos I, II y III	SIN ISBN
2004	Historia de la Economía de la Provincia del Salvador desde el siglo XVI hasta nuestros días. Segundo Tomo Siglos XVII y XVIII Jorge Barraza Ibarra	99923-21-14-8 (v 2) 99923-21-11-3 (Edición completa)
2004	Historia de la Economía de la Provincia del Salvador desde el siglo XVI hasta nuestros días. Tercer Tomo Siglo XIX Jorge Barraza Ibarra	99923-21-15-6 (v 3) 99923-21-11-3 (Edición completa)
2005	Historia de la Economía de la Provincia del Salvador desde el siglo XVI hasta nuestros días. Cuarto Tomo Siglo XIX Jorge Barraza Ibarra	99923-21-31-8 99923-21-11-3 (Edición completa)
2006	Historia de la Economía de la Provincia del Salvador desde el siglo XVI hasta nuestros días. Quinto Tomo Siglo XX Jorge Barraza Ibarra	99923-21-39-3 (v 5) 99923-21-11-3 (Edición completa)
2009	Recopilación Investigativa. Tomo I	978-99923-21-50-8 (v1)
2009	Recopilación Investigativa. Tomo II	978-99923-21-51-5 (v2)
2009	Recopilación Investigativa. Tomo III	978-99923-21-52-2 (v3)
Enero 2010	Casa Blanca Chalchuapa, El Salvador. Excavación en la trinchera 4N. Nobuyuki Ito	978-99923-21-58-4
Marzo 2010	Recopilación Investigativa 2009. Tomo 1	978-99922-21-59-1 (v.1)
Marzo 2010	Recopilación Investigativa 2009. Tomo 2	978-99922-21-60-7 (v.2)
Marzo 2010	Recopilación Investigativa 2009. Tomo 3	978-99922-21-61-7 (v.3)
Octubre 2010	Obstáculos para una investigación social orientada al desarrollo. Colección Investigaciones José Padrón Guillen	978-99923-21-62-1
Febrero 2011	Estructura familia y conducta antisocial de los estudiantes en Educación Media. Colección Investigaciones n.º 2 Luis Fernando Orantes Salazar	

Febrero 2011	Prevalencia de alteraciones afectivas: depresión y ansiedad en la población salvadoreña. Colección Investigaciones n.º 3 José Ricardo Gutiérrez Ana Sandra Aguilar de Mendoza	
Marzo 2011	Violación de derechos ante la discriminación de género. Enfoque social. Colección Investigaciones n.º 4 Elsa Ramos	
Marzo 2011	Recopilación Investigativa 2010. Tomo I	978-99923-21-65-2 (v1)
Marzo 2011	Recopilación Investigativa 2010. Tomo II	978-99923-21-65-2 (v2)
Marzo 2011	Recopilación Investigativa 2010. Tomo III	978-99923-21-67-6 (v3)
Abril 2011	Diseño de un modelo de vivienda bioclimática y sostenible. Fase I. Colección Investigaciones n.º 5 Ana Cristina Vidal Vidales Luis Ernesto Rico Herrera Guillermo Vásquez Cromeyer	
Noviembre 2011	Importancia de los indicadores y la medición del quehacer científico. Colección Investigaciones n.º 6 Noris López de Castaneda	978-99923-21-71-3
Noviembre 2011	Memoria Sexta Semana del Migrante	978-99923-21-70-6
Mayo 2012	Recopilación Investigativa 2011. Tomo I	978-99923-21-75-1 (tomo 1)
Mayo 2012	Recopilación Investigativa 2011. Tomo II	978-99923-21-76-8 (tomo 2)
Mayo 2012	Recopilación Investigativa 2011. Tomo III	978-99923-21-77-5 (tomo 3)
Abril 2012	La violencia social delincuencial asociada a la salud mental en los salvadoreños Colección Investigaciones n.º 7 Ricardo Gutiérrez Quintanilla	978-99923-21-72-0
Octubre 2012	Programa psicopreventivo de educación para la vida efectividad en adolescentes Utec-PGR. Colección Investigaciones Ana Sandra Aguilar de Mendoza Milton Alexander Portillo	978-99923-21-80-6

Noviembre 2012	Causas de la participación del clero salvadoreño en el movimiento emancipador del 5 de noviembre de 1811 en El Salvador y la postura de las autoridades eclesiales del Vaticano ante dicha participación. Claudia Rivera Navarrete	978-99923-21-88-1
Noviembre 2012	Estudio Histórico proceso de independencia: 1811-1823. José Melgar Brizuela	978-99923-21-87-4
Noviembre 2012	El Salvador insurgente 1811-1821 Centroamérica. César A. Ramírez A.	978-99923-21-86-7
Enero 2012	Situación de la educación superior en El Salvador. Colección Investigaciones n.º 1 Carlos Reynaldo López Nuila	
Febrero 2012	Estado de adaptación integral del estudiante de educación media de El Salvador. Colección Investigaciones n.º 8 Luis Fernando Orantes	
Marzo 2012	Aproximación etnográfica al culto popular del Hermano Macario en Izalco, Sonsonate, El Salvador. Colección Investigaciones n.º 9 José Heriberto Erquicia Cruz	978-99923-21-73-7
Mayo 2012	La televisión como generadora de pautas de conducta en los jóvenes salvadoreños. Colección Investigaciones n.º 10 Edith Ruth Vaquerano de Portillo Domingo Orlando Alfaro Alfaro	
Mayo 2012	Violencia en las franjas infantiles de la televisión salvadoreña y canales infantiles de cable. Colección Investigaciones n.º 11 Camila Calles Minero Morena Azucena Mayorga Tania Pineda	
Junio 2012	Obrajes de añil coloniales de los departamentos de San Vicente y La Paz, El Salvador. Colección Investigaciones n.º 14 José Heriberto Erquicia Cruz	

Junio 2012	San Benito de Palermo: elementos afrodescendientes en la religiosidad popular en El Salvador. Colección Investigaciones n.º 16 José Heriberto Erquicia Cruz Martha Marielba Herrera Reina	978-99923-21-80-5
Julio 2012	Formación ciudadana en jóvenes y su impacto en el proceso democrático de El Salvador. Colección Investigaciones n.º 17 Saúl Campos	
Julio 2012	Factores que influyen en los estudiantes y que contribuyeron a determinar los resultados de la PAES 2011. Colección Investigaciones n.º 12 Saúl Campos Blanca Ruth Orantes	978-99923-21-79-9
Agosto 2012	Turismo como estrategia de desarrollo local. Caso San Esteban Catarina. Colección Investigaciones n.º 18 Carolina Elizabeth Cerna Larissa Guadalupe Martín José Manuel Bonilla Alvarado	
Agosto 2012	Conformación de clúster de turismo como prueba piloto en el municipio de Nahuizalco. Colección Investigaciones n.º 19 Blanca Ruth Gálvez García Rosa Patricia Vásquez de Alfaro Juan Carlos Cerna Aguiñada Óscar Armando Melgar.	
Septiembre 2012	Mujer y remesas: administración de las remesas. Colección Investigaciones n.º 15 Elsa Ramos	978-99923-21-81-2
Octubre 2012	Responsabilidad legal en el manejo y disposición de desechos sólidos en hospitales de El Salvador. Colección Investigaciones n.º 13 Carolina Lucero Morán	978-99923-21-78-2
Febrero 2013	Estrategias pedagógicas implementadas para estudiantes de Educación Media y el Acoso Escolar (*bullying*). Colección Investigaciones n.º 25 Ana Sandra Aguilar de Mendoza	978-99923-21-92-8

Marzo 2013	Representatividad y pueblo en las revueltas de principios del siglo XIX en las colonias hispanoamericanas. Héctor Raúl Grenni Montiel	978-99961-21-91-1
Marzo 2013	Estrategias pedagógicas implementadas para estudiantes de educación media. Colección Investigaciones n.º 21 Ana Sandra Aguilar de Mendoza	978-99923-21-92-8
Abril 2013	Construcción, diseño y validez de instrumentos de medición de factores psicosociales de violencia juvenil. Colección Investigaciones José Ricardo Gutiérrez Quintanilla	978-99923-21-95-9
Mayo 2013	Participación política y ciudadana de la mujer en El Salvador. Colección Investigaciones n.º 20 Saúl Campos Morán	978-99923-21-94-2
Mayo 2013	Género y gestión del agua en la mancomunidad La Montañona, Chalatenango, El Salvador. Normando S. Javaloyes Laura Navarro Mantas Ileana Gómez	978-99923-21-99-7
Junio 2013	Libro Utec 2012 Estado del medio ambiente y perspectivas de sostenibilidad. Colección Investigaciones José Ricardo Calles Hernández	978-99961-48-00-2
Julio 2013	Guía básica para la exportación de la flor de loroco desde El Salvador hacia España, a través de las escuelas de hostelería del país vasco. Álvaro Fernández Pérez	978-99961-48-03-3
Agosto 2013	Proyecto Migraciones Nahua-pipiles del Postclásico en la cordillera del Bálsamo. Colección Investigaciones n.º 24 Marlon V. Escamilla William R. Fowler	978-99961-48-07-1
Agosto 2013	Transnacionalización de la sociedad salvadoreña, producto de las migraciones. Colección Investigaciones n.º 25 Elsa Ramos	978-99961-48-08-8

Septiembre 2013	La regulación jurídico penal de la trata de personas especial referencia a El Salvador y España. Colección Investigaciones Hazel Jasmin Bolaños Vásquez	978-99961-48-10-1
Septiembre 2013	Estrategias de implantación de clúster de turismo en Nahuizalco. Colección Investigaciones n.º 22 Blanca Ruth Gálvez Rivas Rosa Patricia Vásquez de Alfaro Óscar Armando Melgar Nájera	978-99961-48-05-7
Septiembre 2013	Fomento del emprendedurismo a través de la capacitación y asesoría empresarial como apoyo al fortalecimiento del sector de la Mipyme del municipio de Nahuizalco en el departamento de Sonsonate. Diagnóstico de gestión Colección Investigaciones n.º 23 Vilma Elena Flores de Ávila	978-99961-48-06-4
Septiembre 2013	Imaginarios y discursos de la herencia afrodescendiente en San Alejo, La Unión, El Salvador. Colección Investigaciones n.º 26 José Heriberto Erquicia Cruz Martha Marielba Herrera Reina Wolfgang Effenberger López	978-9961-48-09-5
Septiembre 2013	Memoria Séptima Semana del Migrante	978-99961-48-11-8
Septiembre 2013	Inventario de las capacidades turísticas del municipio de Chiltiupán, departamento de La Libertad. Colección Investigaciones n.º 33 Lissette Cristalina Canales de Ramírez Carlos Jonatan Chávez Marco Antonio Aguilar Flores	978-99961-48-17-0
Septiembre 2013	Condiciones culturales de los estudiantes de educación media para el aprendizaje del idioma Inglés. Colección Investigaciones n.º 35 Saúl Campos Morán Paola María Navarrete Julio Aníbal Blanco	978-99961-48-22-4

Septiembre 2013	Recopilación Investigativa 2012. Tomo I	978-99923-21-97-3
Septiembre 2013	Recopilación Investigativa 2012. Tomo II	978-99923-21-98-0
Noviembre 2013	Infancia y adolescencia como noticia en El Salvador. Camila Calles Minero	978-99961-48-12-5
Diciembre 2013	Metodología para la recuperación de espacios públicos. Ana Cristina Vidal Vidales Julio César Martínez Rivera	978-99961-48-4-9
Marzo 2014	Participación científica de las mujeres en El Salvador. Primera aproximación. Camila Calles Minero	978-99961-48-15-6
Abril 2014	Mejores prácticas en preparación de alimentos en la micro y pequeña empresa. Colección Investigaciones n.º 29 José Remberto Miranda Mejía	978-99961-48-20-0
Abril 2014	Historias, patrimonios e identidades en el municipio de Huizúcar, La Libertad, El Salvador. Colección Investigaciones n.º 31 José Heriberto Erquicia Martha Marielba Herrera Reina Ariana Ninel Pleitez Quiñonez	978-99961-48-18-7
Abril 2014	Evaluación de factores psicosociales de riesgo y de protección de violencia juvenil en El Salvador. Colección Investigaciones n.º 30 José Ricardo Gutiérrez	978-99961-48-19-4
Abril 2014	Condiciones socioeconómicas y académicas de preparación para la de los estudiantes de educación media. Colección Investigaciones n.º 32 Saúl Campos Paola María Navarrete	978-99961-48-21-7
Mayo 2014	Delitos relacionados con la pornografía de personas menores de 18 años: especial referencia a las tecnologías de la información y la comunicación con medios masivos. Colección Investigaciones n.º 34 Hazel Jasmín Bolaños Miguel Angel Boldova Carlos Fuentes Iglesias	978-99961-48-16-3

Junio 2014	Guía de buenas prácticas en preparación de alimentos en la micro y pequeña empresa	
Julio 2014	Perfil actual de la persona migrante en El Salvador. Utec-US COMMITTE	978-99961-48-25-5
Septiembre 2014	Técnicas de estudio. Recopilación basada en la experiencia docente. Flavio Castillo	978-99961-48-29-3
Septiembre 2014	Valoración económica del recurso hídrico como un servicio ambiental de las zonas de recarga del río Acelhuate. Colección Investigaciones n.º 36 José Ricardo Calles	978-99961-48-28-6
Septiembre 2014	Migración forzada y violencia criminal una aproximación teórica practica en el contexto actual. Colección Investigaciones n.º 37 Elsa Ramos	978-99961-48-27-9
Septiembre 2014	La prevención del maltrato en la escuela. Experiencia de un programa entre alumnos de educación media. Colección Investigaciones n.º 38 Ana Sandra Aguilar de Mendoza	978-99961-48-26-2
Septiembre 2014	Percepción del derecho a la alimentación en El Salvador. Perspectiva desde la biotecnología. Colección Investigaciones n.º 39 Licda. Carolina Lucero	978-99961-48-32-3
Diciembre 2014	El domo el Guegüecho y la evolución volcánica. San Pedro Perulapán (Departamento de Cuscatlán), El Salvador. Primer Informe. Colección Investigaciones n.º 41 Walter Hernández Guillermo E. Alvarado Brian Jicha Luis Mixco	978-99961-48-34-7
Enero 2015	Publicidad y violencia de género en El Salvador. Colección Investigaciones n.º 40 Camila Calles Minero Francisca Guerrero Morena L. Azucena Hazel Bolaños	978-99961-48-35-4

Marzo 2015	Imaginario colectivo, movimientos juveniles y cultura ciudadana juvenil en El Salvador. Colección Investigaciones n.º 42 Saúl Campos Morán Paola María Navarrete Carlos Felipe Osegueda	978-99961-48-37-8
Mayo 2015	Estudio de buenas prácticas en clínica de psicología. Caso Utec. Colección Investigaciones n.º 44 Edgardo Chacón Andrade Sandra Beatriz de Hasbún Claudia Membreño Chacón	978-99961-48-40-8
Junio 2015	Modelo de reactivación y desarrollo para cascos urbanos. Colección Investigaciones n.º 48 Coralia Rosalía Muñoz Márquez	978-99961-48-41-5
Junio 2015	Niñas, niños, adolescentes y mujeres en la ruta del migrante. Colección Investigaciones n.º 54 Elsa Ramos	978-99961-48-46-0
Julio 2015	Historia, patrimonio e identidades en el Municipio de Comasagua, La Libertad, El Salvador. Colección Investigaciones n.º 49 José Heriberto Erquicia Cruz Martha Marielba Herrera Reina	978-99961-48-42-2
Agosto 2015	Evaluación del sistema integrado de escuela inclusiva de tiempo pleno implementado por el Ministerio de Educación de El Salvador. (Estudio de las comunidades educativas del municipio de Zaragoza del departamento de La Libertad). Colección Investigaciones n.º 43 Mercedes Carolina Pinto Benítez Julio Aníbal Blanco Escobar Guillermo Alberto Cortez Arévalo Wilfredo Alfonso Marroquín Jiménez Luis Horaldo Romero Martínez	978-99961-48-43-9
Agosto 2015	Aplicación de una función dosis-respuesta para determinar los costos sociales de la contaminación hídrica en la microcuenca del Río Las Cañas, San Salvador, El Salvador. Colección Investigaciones n.º 45 José Ricardo Calles Hernández	978-99961-48-45-3

Octubre 2015	El derecho humano al agua en El Salvador y su impacto en el sistema hídrico. Colección Investigaciones n.º 50 Sandra Elizabeth Majano Carolina Lucero Morán Dagoberto Arévalo Herrera	978-99961-48-49-1
Octubre 2015	Análisis del tratamiento actual de las lámparas fluorescentes, nivel de contaminantes y disposición final. Colección Investigaciones n.º 53 José Remberto Miranda Mejía Samuel Martínez Gómez John Figerald Kenedy Hernández Miranda	978-99961-48-48-4
Noviembre 2015	El contexto familiar asociado al comportamiento agresivo en adolescentes de San Salvador. Colección Investigaciones n.º 52 José Ricardo Gutiérrez Quintanilla Delmi García Díaz María Elisabet Campos Tomasino	978-99961-48-52-1
Noviembre 2015	Práctica de prevención del abuso sexual a través del funcionamiento familiar. Colección Investigaciones n.º 55 Ana Sandra Aguilar de Mendoza María Elena Peña Jeé Manuel Andreu Ivett Idayary Camacho	978-99961-48-53-8
Diciembre 2015	Problemas educativos en escuelas de Cojutepeque contados por los profesores y profesoras. Escuela de Antropología. Julio Martínez	
Febrero 2016	Desplazamiento interno forzado y su relación con la migración internacional. Colección Investigaciones n.º 56 Elsa Ramos	978-99961-48-56-9
Marzo 2016	Monografía Cultural y socioeconómica del cantón Los Planes de Renderos. Colección Investigaciones n.º 57 Saúl Campos Paola Navarrete Carlos Osegueda Julio Blanco Melissa Campos	978-99961-48-60-6

Abril 2016	Modelo de vivienda urbana sostenible. Colección Investigaciones n.º 58 Coralia Rosalía Muñoz Márquez	978-99961-48-61-3
Mayo 2016	Recopilación de Investigaciones en Tecnología 2016: Colección Investigaciones n.º 59 Internet de las cosas: Diseño e implementación de prototipo electrónico para el monitoreo vía internet de sistemas de generación fotovoltaico. Omar Otoniel Flores Cortez German Antonio Rosa Implementación de un entorno de aprendizaje virtual integrando herramientas de *E-learning* y CMS. Marvin Elenilson Hernández Carlos Aguirre *Big data*, análisis de datos en la nube. José Guillermo Rivera Verónica Idalia Rosa Urrutia	978-99961-48-62-0
Julio 2016	Aplicación de buenas prácticas de negocio (pequeña y mediana empresa de los municipios de San Salvador, Santa Tecla y Soyapango en El Salvador.) Colección Investigaciones n.º 46 Vilma de Ávila	978-99961-48-44-6
Julio 2016	Afectaciones psicológicas en estudiantes de instituciones educativas públicas ubicadas en zonas pandilleriles. Colección Investigaciones n.º 60 Edgardo R. Chacón Manuel A. Olivar Robert David MacQuaid Marlon E. Lobos Rivera	978-99961-48-67-5
Octubre 2016	Los efectos cognitivos y emocionales presentes en los niños y las niñas que sufren violencia intrafamiliar. Colección Investigaciones n.º 61 Ana Sandra Aguilar Mendoza	978-99961-48-69-9
Noviembre 2016	Historia, patrimonio e identidad en el municipio Puerto de La Libertad, El Salvador. Colección Investigaciones n.º 62 José Heriberto Erquicia Cruz Paola María Navarrete Gálvez	978-99961-48-70-5

Febrero 2017	El comportamiento agresivo al conducir asociado a factores psicosociales en los conductores salvadoreños. Colección Investigaciones n.º 63 José Ricardo Gutiérrez Quintanilla Óscar Williams Martínez Marlon Elías Lobos Rivera	978-99961-48-72-9
Marzo 2017	Relaciones interétnicas: afrodescencientes en Centroamérica. Colección Investigaciones n.º 64 José Heriberto Erquicia Rina Cáceres	978-99961-48-73-6
Abril 2017	Diagnóstico de contaminiación atmosférica por emisiones diésel en la zona metropolitana de San Salvador y Santa Tecla. Cuantificación de contaminantes y calidad de combustibles. Colección Investigaciones n.º 65 José Remberto Miranda Mejía Samuel Martínez Gómez Yonh Figerald Kenedy Hernández Miranda René Leonel Figueroa Noé Aguirre	978-99961-48-75-0
Mayo 2017	Causas y condiciones del incremento de la migración de mujeres salvadoreñas. Colección Investigaciones n.º 66 Elsa Ramos	978-99961-48-76-7
Junio 2017	Etnografía del volcán de San Salvador. Colección Investigaciones n.º 67 Saúl Campos Morán Paola María Navarrete Carlos Felipe Osegueda	978-99961-48-77-4
Agosto 2017	Modelo de e-Turismo cultural aplicando tecnología *m-Learning*, georreferencia, visitas virtuales y realidad aumentada para dispositivos móviles. Colección Investigaciones n.º 68 Elvis Moisés Martínez Pérez Melissa Regina Campos Solórzano Claudia Ivette Rodríguez de Castro Ronny Adalberto Cortez Reyes Rosa Vania Chicas Molina Jaime Giovanni Turcios Dubón	978-99961-48-80-4

Octubre 2017	Influencia de la tradición oral, la cocina que practican los pueblos indígenas y las variantes dialectales en la conservación y difusión de la lengua náhuat pipil. Colección Investigaciones n.º 69 Morena Guadalupe Magaña de Hernández Jesús Marcos Soriano Aguilar Clelia Alcira Orellana Mercedes Carolina Pinto Julio Aníbal Blanco José Ángel García Tejada	978-99961-48-84-2
Noviembre 2017	Propuesta de políticas públicas frente al perfil demográfico de El Salvador Carolina Lucero Morán Guiomar Bay Saúl Campos Morán Lucía del Carmen Zelaya de Soto	978-99961-48-87-3
Noviembre 2017	El estado de las competencias de desarrollo de la mujer en la zona de La Libertad Ana Sandra Aguilar de Mendoza	978-99961-48-88-0
Diciembre 2017	Conocimiento financiero y económico entre estudiantes universitarios: un estudio comparativo entre El Salvador y Puerto Rico Modesta Fidelina Corado Roberto Filánder Rivas Ronald Hernández Maldonado	978-99961-48-89-7
Enero 2018	Situación actual del manejo de las aguas ordinarias en lotificaciones y parcelaciones habitacionales de la zona rural de El Salvador. Un análisis de cumplimiento técnico y legal aproximado Alma Carolina Sánchez Fuentes María Teresa Castellanos Araujo Ricardo Calles Hernández Erick Abraham Castillo Flores	978-99961-48-91-0
Abril 2018	Aplicación de herramientas *big data* al Viceministerio de Vivienda y Desarrollo Urbano del Ministerio de Obras Públicas de El Salvador Verónica Idalia Rosa José Guillermo Rivera	978-99961-48-97-2
Mayo 2018	Diagnóstico de necesidades de capacitación del personal de empresas del sector turismo del municipio de La Libertad Carlos Rolando Barrios López Blanca Ruth Gálvez Rivas	978-99961-48-98-9

Junio 2018	Etnografía de Santa María Ostuma: tierra de la piña, leyendas y tradiciones Carlos Felipe Osegueda Osegueda Miguel Ángel Hernández Vásquez Georgina Sulamita Ordóñez Valle Francisco Enrique Santos Alvarenga Josué Mauricio López Quintana Miguel Ángel Rodas Ramírez	978-99961-48-99-6
Julio 2018	El *ombudsman* de las audiencias de los medios de comunicación en El Salvador: factibilidad y aceptación Camila Calles Minero Leida Monterroza Matute	978-99961-86-00-4
Agosto 2018	Compilación de investigaciones de tecnología 2017 Extracción de conocimiento a partir de texto Ronny Adalberto Cortez Reyes Aulas conectadas: sistema IoT para el registro de asistentes Omar Otoniel Flores Cortez Verónica Idalia Rosa Urrutia	978-99961-86-01-1
Septiembre 2018	Sistematización y registro de banco de datos de proyectos en oportunidades para deportados salvadoreños Paola María Navarrete	978-99961-86-02-8
Septiembre 2018	Migración y cambio climático Elsa Ramos	978-99961-86-04-2
Octubre 2018	La salud general relacionada con la adaptación a la vida universitaria. Análisis de factores asociados Edgardo René Chacón Andrade José Ricardo Gutiérrez Quintanilla Marlon Elías Lobos Rivera Robert David MacQuaid Marvin Josué Flamenco Cortez	978-99961-86-06-6

Noviembre 2018	El estado de las competencias de desarrollo socioeconómico y psicosocial de las familias en el área costera de El Salvador. Fase II. Estudio multicéntrico Ana Sandra Aguilar de Mendoza José Rigoberto Vaquerano Benavides Lizzie Nájera de Henríquez Larissa Hernández Monterrosa Glenda Yamileth Trejo Magaña Osmel Alberto Sánchez Granados Elmer José René Hernández Romero Edwin Osmil Coreas Flores Diana Beatriz Moreno Ventura Ramón Edgardo Marquina Martínez	978-99961-86-10-3
Diciembre 2018	Historia del VIH en El Salvador y calidad de vida en personas adultas viviendo positivas a VIH Ana Sandra Aguilar de Mendoza Rolando Alberto Alas Ramírez Jorge Alberto Panameño, Médico infectólogo	978-99961-86-09-7
Marzo 2019	Perfil económico y social del sector restaurantes en El Salvador Modesta Fidelina Corado Roberto Filánder Rivas	978-99961-86-13-4
Mayo 2019	Comunicación patrimonial y accesibilidad para personas con discapacidad en los museos de San Salvador desde la perspectiva del diseño para todos María Sofía Albayero García Jaime Pascual Chávez Martínez Mauricio Armando Hernández Sosa Karen Trinidad Consuegra Premper Luisa Massiel Ramos Iglesias Carmen Margarita Morán Hernández	978-99961-86-16-5
Agosto 2019	Múltiple colapso sectorial del volcán de San Salvador Walter Hernández Brian Jicha	978-99961-86-17-2
Septiembre 2019	Perspectivas y desafíos de las personas migrantes salvadoreñas beneficiarias del TPS Elsa Ramos	978-99961-86-18-9

Septiembre 2019	Cosmovisión e identidad de las cofradías de Izalco y su relación con las condiciones socioeconómicas de sus participantes Georgina Sulamita Ordóñez Valle Saúl Campos Morán	978-99961-86-19-6
Octubre 2019	Evaluación de la calidad de la atención de los servicios del sistema salvadoreño de salud, desde la percepción del usuario Ricardo Gutiérrez Quintanilla Marlon Elías Lobos Rivera	978-99961-86-21-9
Noviembre 2019	Reto de la protección social de la maternidad en adolescentes: la salud mental Ana Sandra Aguilar de Mendoza	978-99961-86-22-6

Este libro se terminó de imprimir
en el mes de diciembre de 2019
en los talleres de Tecnoimpresos, S.A. de C.V.
19ª. Av. Norte N.º 125,
ciudad de San Salvador, El Salvador, C.A.

Universidad Tecnológica de El Salvador

Esta investigación busca implementar una nueva red de monitoreo de contaminantes ambientales utilizando herramientas de tecnología vigente, eficiente y de bajo costo, la cual se proyecta como un apoyo primordial al sistema de monitoreo actual del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales del El Salvador. Es dentro de esta línea general de investigación que se planteó la ejecución de una primera fase, la cual se muestra en el presente documento.

La Colección Investigaciones tiene el objetivo de evidenciar el trabajo científico de la Universidad Tecnológica de El Salvador ante la comunidad científica nacional e internacional, y la sociedad.

No hay enseñanza sin investigación ni investigación sin enseñanza
Pablo Freire

ISBN 978-99961-86-23-3

Vicerrectoría de Investigación y Proyección Social
Calle Arce y 19ª avenida Sur n.° 1045,
edificio *Dr. José Adolfo Araujo Romagoza,*
San Salvador, El Salvador, (503) 2275 1013 / 2275 1011