



**Implementación de una red de monitoreo de la concentración de CO2 usando dispositivos LoRaWAN
en zonas de aglomeración de la Unidad Educativa Fiscal Antisana en la parroquia de Pintag.**

Paredes Collaguazo, Ángel Paul

Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones

Ing. Altamirano Carillo Carlos Daniel PhD.

15 de agosto del 2023

Reporte de verificación de similitud



Plagiarism report

TESIS_FINAL.pdf

Scan details

Scan time: August 15th, 2023 at 20:55 UTC

Total pages: 56

Total words: 13864



Plagiarism Detection



Type of plagiarism	Words
Identical	1.9% 270
Minor Changes	1% 135
Paraphrased	1.7% 235
Omitted Words	0% 0

AI Content Detection



Text coverage

- AI text
- Human text

Plagiarism Results: (42)

[Regional Parameters | The Things Network](https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/regional-pa...) 0.5%
<https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/regional-pa...>
 Learn...

[LoRaWAN | Smart Parks Wiki](https://wiki.smartparks.org/en/concepts/lorawan) 0.5%
<https://wiki.smartparks.org/en/concepts/lorawan>
 LoRaWAN Most of the information is taking from very well knows sources in the LoRaWAN community including the TTN website. Please also...

[Sensor 9 en 1 LoRaWAN de control de ambiente O3 ...](https://www.dsmodesk.com/1507-sens-or-9-en-4-lorawan-de-...) 0.4%
[https://www.dsmodesk.com/1507-sens-or-9-en-4-lorawan-de...](https://www.dsmodesk.com/1507-sens-or-9-en-4-lorawan-de-...)

Certified by
 Copleaks

About this report
help.copleaks.com

[copleaks.com](https://www.copleaks.com)



creado a través de: <https://www.copleaks.com>
 CARLOS DANIEL
 ALTAMIRANO CARRILLO

Ing. Carlos Daniel Altamirano Carillo

Director



Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones

Certificación

Certifico que el trabajo de titulación: "Implementación de una red de monitoreo de la concentración de CO2 usando dispositivos LoRaWAN en zonas de aglomeración de la Unidad Educativa Fiscal Antisana en la parroquia de Pintag." fue realizado por el señor Paredes Collaguazo, Ángel Paul; el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Sangolquí, 15 de agosto del 2023



Ing. Carlos Daniel Altamirano Carrillo

C. C. 171506004-0



Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones

Responsabilidad de Autoría

Yo, **Paredes Collaguazo, Ángel Paul**, con cédula de ciudadanía n° 1725570350, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **Implementación de una red de monitoreo de la concentración de CO2 usando dispositivos LoRaWAN en zonas de aglomeración de la Unidad Educativa Fiscal Antisana en la parroquia de Pintag** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 15 de agosto del 2023

Paredes Collaguazo Ángel Paul

C.C.: 1725570350



Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones

Autorización de Publicación

Yo **Paredes Collaguazo, Ángel Paul**, con cédula de ciudadanía n°1725570350, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **Implementación de una red de monitoreo de la concentración de CO2 usando dispositivos LoRaWAN en zonas de aglomeración de la Unidad Educativa Fiscal Antisana en la parroquia de Pintag** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi/nuestra responsabilidad.

Sangolquí, 15 de agosto del 2023

Paredes Collaguazo Ángel Paul

C.C.: 1725570350

Dedicatoria

El presente trabajo va dedicado a mis seres queridos, el mismo que es una muestra de todo el amor y apoyo incondicional que me han brindado a lo largo de mi vida. Gracias por creer en mí y motivarme a seguir adelante, incluso en los momentos más difíciles.

A mi tutor, quien con su paciencia y conocimiento ha sido mi guía y mentor en este camino hacia el cumplimiento de esta meta.

A la comunidad universitaria que podrá usar el mismo como base para futuros proyectos y permita un avance tecnológico constante.

Paredes Collaguazo Ángel Paul

Agradecimiento

A mis padres, les agradezco por su amor incondicional, paciencia y empuje constante. Han sido mi luz de guía y sin su ayuda, nunca hubiera llegado a donde estoy hoy.

Agradezco a mis hermanos por estar ahí para mí en las buenas y en las malas, haciéndome reír y apoyándome en todo lo que hago.

A mis amigos, les agradezco por estar ahí cuando más los necesité, por ser mi refugio y mi pilar. Finalmente, me gustaría agradecer a mis maestros y mentores por su orientación, paciencia y compartir sus conocimientos conmigo. Gracias por ayudarme a crecer y desarrollar mis habilidades.

Este documento es el resultado del arduo trabajo y la dedicación de todas estas personas, y lo presento con humildad y orgullo.

Con todo mi amor y gratitud.

Paredes Collaguazo Ángel Paul

Índice de Contenidos

Dedicatoria	6
Agradecimiento	7
Índice de Contenidos	8
Índice de Tablas	11
Índice de Figuras	12
Resumen	14
Abstract	15
Capítulo I.....	16
Definición del proyecto.....	16
Introducción.....	16
Antecedentes.....	17
Justificación	18
Objetivos.....	20
Objetivo General	20
Objetivos Específicos.....	20
Capitulo II.....	21
Marco teórico	21
Contaminación del aire	21
Dióxido de carbono.....	21
Concentraciones de CO2 permisibles.....	22

Internet of Thing (IoT).....	24
LoRaWAN.....	25
Esquema teórico de LoRaWAN	25
Clases LoRaWAN	26
Canales y velocidad de transmisión	27
Factor de Dispersión	29
Potencia de transmisión.....	30
Indicador de fuerza de señal recibida	31
Relación señal-ruido	32
Tipos de activación.....	32
Sensores de calidad de aire.....	33
Sensores piezoeléctricos	33
Sensores electroquímicos	34
Sensores ópticos	34
Milesight.....	34
Sensor óptico AM103/AM103L de Milesight	35
Sensor óptico AM307 de Milesight	36
Mini Gateway UG63 LoRaWAN de Milesight	37
Capitulo III.....	39
Desarrollo e Implementación.....	39

	10
Arquitectura de la red de monitoreo de concentración de CO2	39
Descripción de la Unidad Educativa Fiscal Antisana.....	40
Configuración del Gateway UG63	43
Configuración de sensores	49
Configuración de Milesight IoT Cloud	51
Capitulo IV	54
Análisis y resultados.....	54
Prueba de funcionamiento	54
Análisis factor de dispersión con velocidad de datos adaptativa	55
Análisis de relación señal-ruido e indicador de fuerza de señal recibida	55
Pruebas de concentración de CO2	58
Promedio de concentración mensual CO2	58
Valores pico de concentración de CO2	61
Incidencia de concentración de CO2 en el rendimiento académico	63
Disponibilidad de los sensores	64
Prueba de concentración de CO2 en un ambiente sin ventilación.....	65
Determinación de la tasa de renovación de aire.....	67
Conclusiones y Recomendaciones	70
Bibliografía.....	72

Índice de Tablas

Tabla 1 <i>Categorización de calidad de aire en interiores</i>	23
Tabla 2 <i>Calidad de aire en relación con la concentración de CO₂</i>	24
Tabla 3 <i>Rango de frecuencias en Latinoamérica de la red LoRaWAN</i>	27
Tabla 4 <i>Tasa de datos de Tx en la banda AU915-928</i>	30
Tabla 5 <i>Potencia de transmisión TX en la banda AU915-928</i>	31
Tabla 6 <i>Número de alumnos por curso de la Unidad Educativa Fiscal Antisana</i>	40
Tabla 7 <i>Valores de configuración de los sensores</i>	50
Tabla 8 <i>Valores de RSSI y SNR a diferentes distancias en los tres sensores</i>	54
Tabla 9 <i>Calidad del enlace de radio en función del RSSI y SNR</i>	57
Tabla 10 <i>Promedio anual de los estudiantes de décimo A y décimo B</i>	63
Tabla 11 <i>Disponibilidad de los sensores en la Unidad Educativa Fiscal Antisana</i>	64
Tabla 12 <i>Valores para el cálculo de la tasa de renovación de aire</i>	68

Índice de Figuras

Figura 1 <i>Diagrama esquemático de una red LoRaWAN</i>	26
Figura 2 <i>Capas del protocolo LoRaWAN</i>	26
Figura 3 <i>Sensores ópticos AM103 y AM103L de Milesight</i>	35
Figura 4 <i>Sensor AM307 de Milesight</i>	36
Figura 5 <i>Mini LoRaWAN Gateway UG63</i>	37
Figura 6 <i>Arquitectura de la red de monitoreo de CO2</i>	40
Figura 7 <i>Aulas del décimo A y décimo B de la Unidad Educativa Fiscal Antisana</i>	41
Figura 8 <i>Aula de computación de la Unidad Educativa Fiscal Antisana</i>	42
Figura 9 <i>Aulas de la Unidad Educativa Fiscal Antisana</i>	42
Figura 10 <i>Distancia de los sensores al Gateway en la Unidad Educativa Fiscal Antisana</i>	43
Figura 11 <i>Panel del centro de redes y recursos compartidos</i>	44
Figura 12 <i>Protocolo de internet versión 4 (TCP/IPv4)</i>	44
Figura 13 <i>Página de ingreso de Milesight-IoT Cloud</i>	45
Figura 14 <i>Pestaña de interfaz para configuración del puerto estático</i>	45
Figura 15 <i>Pestaña de estado de la red actual</i>	46
Figura 16 <i>Pestaña de configuración general de reenvío de paquetes</i>	47
Figura 17 <i>Datos del servidor de Semtech</i>	47
Figura 18 <i>Configuración de los canales de LoRa</i>	48
Figura 19 <i>Configuración del servidor de red de Milesight IoT cloud</i>	48
Figura 20 <i>Pestaña de mantenimiento herramienta Ping</i>	49
Figura 21 <i>Pantalla de inicio de la aplicación "ToolBox"</i>	49
Figura 22 <i>Pantalla del estatus de la aplicación "ToolBox"</i>	50
Figura 23 <i>Página oficial de Milesight IoT Cloud</i>	52

Figura 24 Registro del Gateway en Milesight IoT Cloud	52
Figura 25 Comprobación funcionamiento del Gateway UG63	53
Figura 26 Registro de los sensores a Milesight IoT Cloud	53
Figura 27 Lista de Dispositivos conectados al Gateway	53
Figura 28 Relación señal-ruido vs Distancia	56
Figura 29 Indicador de fuerza de señal recibida vs Distancia	56
Figura 30 Promedio concentración de CO2 en el mes de febrero	59
Figura 31 Promedio concentración de CO2 en el mes de marzo	59
Figura 32 Promedio concentración de CO2 en abril	60
Figura 33 Promedio concentración de CO2 en el mes de mayo	60
Figura 34 Concentración de CO2 con valores pico décimo A en 4 meses	62
Figura 35 Concentración de CO2 con valores pico décimo B en 4 meses	62
Figura 36 Concentración de CO2 en aula sin ventilación	65
Figura 37 Concentración de CO2 en aula sin ventilación resto de paralelos	66

Resumen

La calidad del aire en los entornos escolares es un factor de suma trascendencia, la misma ejerce una influencia directa tanto en el bienestar físico como en el rendimiento académico de los estudiantes. Este documento resalta la relevancia de abordar este problema y cómo la tecnología LoRaWAN puede desempeñar un papel fundamental en el monitoreo de la calidad del aire en los recintos educativos. Se propone la implementación de un sistema de monitoreo de la concentración de dióxido de carbono en áreas de aglomeración para monitorear y controlar los niveles de este gas, permitiendo así tomar medidas para mejorar la ventilación y garantizar un entorno saludable. Esta tecnología es especialmente adecuada para la implementación de un sistema de monitoreo en escuelas, donde la cobertura amplia y el bajo consumo de energía son factores clave. En este contexto, la Unidad Educativa Fiscal Antisana ha sido seleccionada como el objetivo de este proyecto. Las pruebas operativas del sistema de monitoreo confirmaron su funcionamiento adecuado, con una cobertura de hasta 150 metros y una disponibilidad superior al 97% en todos los sensores. Estos resultados enaltecen la confiabilidad y el alcance del sistema utilizado, validando su funcionamiento durante el período de observación. Este estudio resalta el impacto positivo que el monitoreo de la calidad del aire tiene en las aulas y destaca la importancia de implementar tecnologías nuevas como LoRaWAN para asegurar un entorno educativo saludable y propicio para el aprendizaje de los estudiantes.

Palabras clave: Internet de las cosas, LoRaWAN, Puerta de enlace, Calidad de aire.

Abstract

The air quality in school environments is a matter of great significance, as it directly influences both the physical well-being and academic performance of students. This document emphasizes the importance of addressing this issue and how LoRaWAN technology can play a crucial role in monitoring air quality in educational settings. The implementation of a monitoring system for carbon dioxide concentration in crowded areas is proposed to oversee and manage the levels of this gas. This allows for taking measures to enhance ventilation and ensure a healthy environment. This technology is particularly suitable for school implementation, where wide coverage and low energy consumption are key factors. In this context, the Antisana Public Educational Unit has been chosen as the target of this project. Operational tests of the monitoring system have confirmed its proper functionality, with coverage of up to 150 meters and availability exceeding 97% across all sensors. These results underscore the reliability and reach of the utilized system, validating its performance during the observation period. This study highlights the positive impact that air quality monitoring has in classrooms and underscores the importance of implementing new technologies like LoRaWAN to ensure a healthy and conducive educational environment for student learning.

Keywords: Internet of thing, LoRaWAN, Gateway, Air quality.

Capítulo I

Definición del proyecto

Introducción

La contaminación del aire se ha convertido en un problema muy importante en la actualidad, con un impacto directo en los ecosistemas y aulas, afectando el bienestar y el desempeño humano. La calidad del aire en las aulas es un aspecto esencial, ya que un entorno apropiado puede tener un impacto positivo en el aprendizaje y el bienestar de los estudiantes. Un indicador crucial en la evaluación de la calidad del aire en un aula es la cantidad de dióxido de carbono (CO₂) presente pues la medición de CO₂ puede brindar información valiosa sobre la adecuada ventilación y el flujo de aire en el aula, lo que es fundamental para garantizar un ambiente educativo saludable y cómodo (Soledispa, 2020).

La calidad de aire en un ambiente educativo debe ser una prioridad ya que, si se analiza de manera objetiva, los niños pasan entre 5 y 8 horas diarias en el aula u otros espacios relevantes. El ambiente en el que se realiza el aprendizaje tiene un impacto directo en la calidad de la educación que los estudiantes reciben. En Europa, se está prestando cada vez más atención a la importancia del ambiente interior en las escuelas, reconociendo que factores como la temperatura, la iluminación, el ruido y la calidad del aire pueden afectar significativamente el aprendizaje y el bienestar de los estudiantes (Becerra, y otros, 2020). La implementación de nuevas tecnologías como LoRaWAN pueden ser una solución efectiva para a través del monitoreo disminuir el riesgo de enfermedades relacionadas con el aire en entornos educativos.

LoRaWAN es una tecnología habilitadora de internet de las cosas (Internet of things - IoT) que se refiere a una interconexión digital de objetos cotidianos a través del internet y día a día viene expandiendo su aplicación en diferentes áreas. Los nodos o sensores son dispositivos formados por células sensibles que detectan variaciones en magnitud física, química, o biológica y las convierte en señales eléctricas útiles para un sistema de medida o control (Ordóñez, 2017).

La red de sensores inalámbricos basada en LoRaWAN es una red tipo estrella, todos los nodos LoRa transmiten datos de los sensores y los envían al Gateway permitiendo la recopilación de datos de distintas variables como CO₂, temperatura, humedad, etc. LoRaWAN es una red de área amplia de baja potencia que abarca superficies extensas como edificios o instituciones educativas (Díaz, Fava, Antao, & Candia, 2019).

La Unidad Educativa Fiscal Antisana ubicada en la parroquia Pintag perteneciente a la Provincia de Pichincha ubicada al sureste de Quito, es un sector donde la tecnología es escasa, tiene una superficie de más de 6000 m² con varias áreas de aglomeración distribuidas en distintos puntos de dicha institución por lo que la implementación de un equipo con tecnología LoRaWAN brindara la cobertura necesaria para recopilar datos de los sensores en dichas áreas.

Antecedentes

Históricamente, los entornos escolares han sido puntos críticos para la transmisión y propagación de enfermedades. Un sólido cuerpo de evidencia demuestra que varias enfermedades respiratorias se transmiten por el aire y también la salud de las personas se puede deteriorar al exponerse a nivel altos de concentración de CO₂ (Fajardo, Casas, Manuel, & Franco, 2021).

Los estudios han demostrado que un ambiente interior adecuado puede mejorar la concentración, la motivación y el rendimiento de los estudiantes. Por otro lado, un ambiente interior poco saludable o incómodo puede tener efectos negativos en la salud y el bienestar de los estudiantes, afectando su capacidad para aprender y concentrarse. Teniendo en cuenta que la mayor parte de problemas respiratorios, cardiovasculares, rendimiento escolar e incluso de ausentismo son provocados por ambientes mal ventilados estos deben ser adecuados para garantizar espacios saludables de aprendizaje (Grün & Urlaub, 2015).

El uso de tecnología para monitorear la calidad del aire en aulas se ha vuelto relevante en los últimos tiempos. La intención es mejorar el ambiente educativo para promover el bienestar y aprendizaje de los estudiantes. Una de las tecnologías utilizadas para este fin es la red LoRaWAN, que permite conectar dispositivos inalámbricos y transmitir datos a larga distancia con bajo consumo de energía, ideal para monitoreo de CO₂ en aula.

LoRaWAN es una tecnología que permite conectar dispositivos a grandes distancias y con baja consumo de energía. Esta arquitectura se basa en el trabajo coordinado de dos componentes principales: gateways y sensores. Los gateways actúan como puentes entre los sensores y la red, y se encargan de recibir y transmitir los datos. Por su parte, los sensores recopilan los datos relevantes y los transmiten a los gateways. Esta tecnología es adecuada para aplicaciones en entornos con altas exigencias en cuanto a seguridad y fiabilidad. Además, su bajo consumo de energía y su capacidad para transmitir datos a largas distancias lo hacen ideal para aplicaciones en áreas remotas o de difícil acceso (Wu, He, & Shi, 2020).

En la actualidad se ha desarrollado una variedad de dispositivos LoRa que se integran a esta red y recogen información relevante como concentración de CO₂. Estos dispositivos son fáciles de instalar y brindan una solución económica para monitorear la calidad del aire en entornos educativos. El estudio sobre la arquitectura y el desarrollo de la red LoRaWAN y sus dispositivos está en constante evolución y gana importancia, ya que su impacto en mejorar la calidad ambiental en las aulas y en el bienestar y aprendizaje de los estudiantes es significativo (Dopazo González, 2019).

Justificación

La presente investigación tiene como objetivo prioritario preservar y proteger la salud tanto de los estudiantes como del personal de la escuela. Lamentablemente, las enfermedades relacionadas con la calidad del aire son frecuentes en ambientes cerrados que carecen de un monitoreo adecuado de los niveles de dióxido de carbono (CO₂).

En este sentido, resulta crucial implementar la instalación de sensores de CO₂ en las aulas, como una medida fundamental para asegurar una óptima calidad del aire en los espacios de enseñanza. Estos dispositivos permiten realizar un monitoreo continuo de las concentraciones de CO₂ en el ambiente. En caso de detectar niveles altos, se toman acciones inmediatas para mejorar la ventilación y reducir la contaminación atmosférica, con el propósito de salvaguardar la salud y el rendimiento de los estudiantes de la Unidad Educativa Fiscal Artesana.

Además de su función de monitoreo, los sensores de CO₂ también posibilitan la identificación de patrones y tendencias en la calidad del aire a lo largo del tiempo. Esta valiosa información resulta muy útil para tomar decisiones futuras en términos de sostenibilidad y mejoras en la calidad del aire en las instalaciones escolares, con el fin de mantener un ambiente saludable y propicio para el aprendizaje.

La elección de la tecnología LoRaWAN para la conectividad de los sensores es especialmente acertada. Esta tecnología proporciona una conexión eficiente en términos de consumo de energía y costos para los sensores que serán implementados en la institución educativa. Gracias a su capacidad para transmitir datos a largas distancias con un mínimo consumo de energía, resulta ideal para su aplicación en áreas remotas o con acceso limitado a la red eléctrica.

Asimismo, LoRaWAN se destaca por ser una tecnología escalable y abierta, lo que permitirá la creación de soluciones innovadoras que se adapten a las necesidades específicas que pueda tener la institución educativa en el futuro. Esta característica es particularmente valiosa en el ámbito del Internet de las cosas (IoT), donde la interconexión de dispositivos es esencial para obtener una visión integral y precisa de los datos recopilados, impulsando así una gestión efectiva y una mejora continua de la calidad del aire en los edificios escolares.

Objetivos

Objetivo General

Implementar un sistema de monitoreo de calidad de aire usando dispositivos con tecnología LoRaWAN que permitan recopilar información de concentración de CO₂ en áreas de aglomeraciones de la Unidad Educativa Fiscal Artesana.

Objetivos Específicos

- Proponer una solución con tecnología LoRaWAN que incluya un equipo Gateway y sensores de concentración de CO₂ que brinde cobertura en todas las áreas de mayor aglomeración.
- Generar una base de datos y validar los resultados obtenidos estableciendo la relación que existe entre número de personas y concentración de CO₂.
- Determinar si existe afectación en el rendimiento académico de los estudiantes en aulas que muestren mayor concentración de CO₂.
- Implementar el envío de un mensaje de alerta en caso de sobrepasar los niveles máximos permitidos de concentración de CO₂.

Capítulo II

Marco teórico

Contaminación del aire

La contaminación del aire es cuando la atmósfera contiene elementos dañinos para la salud humana y el medio ambiente. Estos pueden incluir gases tóxicos, partículas pequeñas, monóxido de carbono y otros contaminantes.

Hay diversas fuentes de contaminación del aire, tales como la quema de combustibles fósiles para generar energía, la industria, el transporte, la agricultura y la eliminación de residuos. También, la actividad humana como quemar basura, talar árboles y la emisión de gases tóxicos por automóviles y maquinaria, pueden contribuir a la contaminación del aire. La contaminación del aire en las escuelas es un problema serio que puede tener graves consecuencias para la salud y el bienestar de los estudiantes y el personal. El aire contaminado puede causar problemas respiratorios y aumentar el riesgo de enfermedades graves, así como afectar el rendimiento escolar y la capacidad de aprendizaje. (Becerra, y otros, 2020)

Las escuelas suelen estar ubicadas en áreas urbanas con altos niveles de contaminación del aire y a menudo tienen sistemas de ventilación inadecuados. Por lo tanto, es importante tomar medidas para mejorar la calidad del aire en las escuelas, como instalar sistemas de filtración y ventilación eficientes, promover el transporte sostenible y adoptar prácticas sostenibles en la construcción y gestión de edificios (Soledispa, 2020).

Dióxido de carbono

El dióxido de carbono (CO₂) es un gas presente en la atmósfera terrestre que es incoloro e inodoro. Este gas es producido naturalmente por los seres vivos y también se libera a la atmósfera a través

de procesos naturales como las erupciones volcánicas. Sin embargo, la actividad humana también es una importante fuente de emisiones de dióxido de carbono, especialmente a través de la quema de combustibles fósiles para la generación de energía, la industria y el transporte (Gómez, 2022).

El dióxido de carbono es considerado un gas de efecto invernadero, lo que significa que ayuda a mantener el calor en la atmósfera. Este proceso es una parte importante del sistema climático natural de la Tierra, pero el aumento de las emisiones de CO₂ debido a la actividad humana está contribuyendo al cambio climático. (Zilio, 2008)

Concentraciones de CO₂ permisibles

Las concentraciones de dióxido de carbono (CO₂) en el aire que respiramos no son tóxicas en sí mismas, pero pueden ser perjudiciales para la salud humana si alcanzan niveles muy altos. Esto puede ocurrir en espacios cerrados, como edificios, subterráneos o submarinos, donde la ventilación es insuficiente.

Las concentraciones de dióxido de carbono (CO₂) en el aire ambiental generalmente están en el rango de 350 a 400 partes por millón (ppm). Sin embargo, en algunos espacios cerrados, especialmente aquellos que están mal ventilados, las concentraciones de CO₂ pueden alcanzar niveles muy altos, por encima de 1000 ppm lo cual se considera perjudicial para la salud ((INSST), 2022).

Las concentraciones de este gas en los edificios pueden variar dependiendo de factores como la eficiencia energética, la ventilación y el uso de estos. De acuerdo con el reglamento de instalaciones térmicas en edificios aprobados en el real decreto 1027/2007 en España se estableció categorías de calidad de aire interior (IDA) en función del uso de los edificios que se muestran de manera más detallada en la Tabla 1.

Tabla 1*Categorización de calidad de aire en interiores*

Categoría	Calidad de aire	Tipo de Edificio
IDA 1	Calidad de aire optima	Hospitales, clínicas, laboratorios y guarderías.
IDA 2	Calidad de aire buena	Oficinas, residencias, salas de lectura, salas de tribunales, museos, aulas de enseñanza y piscinas.
IDA 3	Calidad de aire media	Edificios comerciales, teatros, cines, salones de actos, restaurantes, cafeterías, bares, habitaciones de hoteles, locales para deportes, gimnasios y salas de ordenadores.
IDA 4	Calidad de aire baja	Resto de locales.

Nota. Esta tabla muestra en función del uso del local o edificio la categoría de calidad de aire interior a la que pertenece. Obtenido de ((INSST), 2022).

Las concentraciones elevadas de dióxido de carbono (CO₂) en el aire que respiramos pueden tener efectos adversos en nuestra salud y bienestar. Algunos de estos síntomas incluyen dolores de cabeza persistentes, una sensación general de fatiga y debilidad, mareos frecuentes, irritabilidad y dificultad para mantener la concentración en tareas cotidianas. Estos síntomas son el resultado de una disminución en el flujo de oxígeno disponible para el cerebro. (Grün & Urlaub, 2015)

Es importante tener en cuenta que existen pautas y regulaciones establecidas para mantener los niveles de CO₂ en un rango seguro en diferentes entornos. La Tabla 2 muestra los valores límites permisibles para cada categoría de concentración de CO₂ en comparación con los niveles presentes en el aire exterior.

Tabla 2

Calidad de aire en relación con la concentración de CO2

Categoría	Valores límites ambientales
IDA 1	350 ppm
IDA 2	500 ppm
IDA 3	800 ppm
IDA 4	1200 ppm

Nota. La tabla muestra los niveles de CO2 en exceso de la concentración atmosférica externa, expresados en partes por millón en volumen. Obtenido de ((INSST), 2022)

Dado que en este trabajo deseamos verificar la concentración de CO2 en aulas de enseñanza nos regimos al modelo de calidad de aire en interior IDA 2 que permite un valor de hasta 500 ppm por encima de la concentración en el aire exterior.

Internet of Thing (IoT)

El Internet de las Cosas se refiere a la conexión de objetos cotidianos a Internet para mejorar su funcionamiento y automatización. Estos objetos, también conocidos como "cosas", están equipados con tecnología que les permite recopilar y compartir datos en tiempo real con otros dispositivos o sistemas centralizados. El IoT combina diferentes tecnologías y disciplinas, incluyendo computación, electrónica, telecomunicaciones, seguridad de la información e inteligencia artificial. Una de sus características principales es la capacidad de recopilar y procesar grandes cantidades de datos (Díaz, Fava, Antao, & Candia, 2019).

Además, la interconexión de los dispositivos permite una mayor colaboración y eficiencia en el sistema. La nube es fundamental en el IoT, ya que permite almacenar y procesar los datos generados por los dispositivos conectados.

Sin embargo, la seguridad de la información es un desafío importante en el IoT, ya que los datos sensibles pueden ser vulnerables a ataques cibernéticos. Por esta razón, es necesario implementar medidas de seguridad adecuadas para proteger los datos y garantizar la privacidad de los usuarios (Gómez, 2022).

LoRaWAN

LoRaWAN es una tecnología de comunicación inalámbrica que permite la transmisión de datos a larga distancia. Es una solución ideal para Internet de las cosas (IoT), ya que permite la conexión de dispositivos remotos y el envío de información en tiempo real. LoRaWAN es una tecnología basada en el estándar de comunicación LoRa y utiliza una red de gateways que actúan como intermediarios entre los dispositivos IoT y la nube. La tecnología se caracteriza por su eficiencia energética y la capacidad de transmisión de datos a larga distancia con un bajo consumo de energía.

Además, LoRaWAN ofrece una alta seguridad en la transmisión de datos, lo que es esencial en aplicaciones IoT sensibles a la seguridad. La tecnología también permite la implementación de diferentes políticas de seguridad y la gestión de dispositivos en la nube, lo que simplifica la gestión y el mantenimiento de la red (Jouhari, Saeed, Alouini, & Amhoud, 2023).

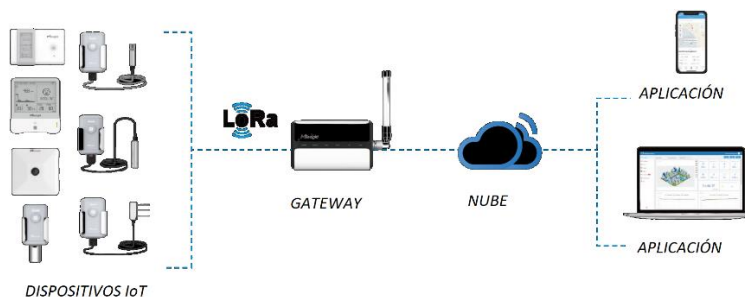
Esquema teórico de LoRaWAN

En la Figura 1 se muestran los componentes que integran un esquema de LoRaWAN, los cuales se describen a continuación:

- Dispositivos IoT: Aquellos conectados que recopilan y transmiten datos.
- Gateway: Encargado de recolectar los datos de los dispositivos IoT y enviarlos al Internet.
- Nube: Lugar donde se almacenan y procesan los datos recopilados por los dispositivos IoT.
- Aplicación: Software que se utilizan para analizar y visualizar los datos recopilados.
- Red: Sistema que conecta al Gateway, dispositivos IoT y la nube.

Figura 1

Diagrama esquemático de una red LoRaWAN



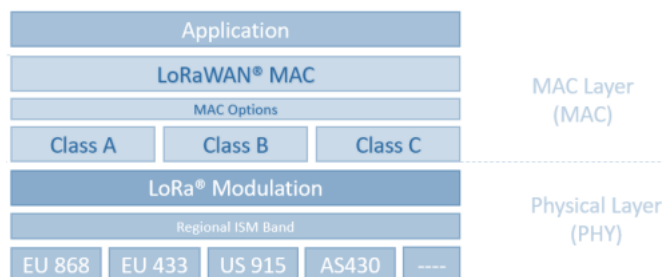
Nota. En la figura se puede ver los componentes que pertenecen a un esquema LoRaWAN. Tomado de (Milesight, Mini LoRaWAN Gateway UG63 User Guide, 2023)

Clases LoRaWAN

LoRaWAN es un protocolo de acceso al medio (MAC) que se utiliza en redes LPWAN (redes de área amplia de baja potencia). Este protocolo permite la comunicación bidireccional entre los gateways y los dispositivos finales o nodos. En la red LoRaWAN, los dispositivos se clasifican en tres clases diferentes que se muestran en la Figura 2, considerando factores como la latencia, la capacidad de compensación y la duración de la batería (Marais, Malekian, & Mahfouz, 2017).

Figura 2

Capas del protocolo LoRaWAN



Nota. La figura muestra la capa de red protocolo LoRaWAN con las frecuencias por regiones y sus clases.

Tomado de (Marais, Malekian, & Mahfouz, 2017)

Clase A. Los dispositivos de Clase A se centran en el ahorro de energía y tienen una comunicación asimétrica, lo que significa que solo escuchan después de realizar una transmisión en momentos específicos. Después de cada transmisión, hay un intervalo de tiempo fijo (Alliance L. , 2019).

Clase B. Es similar a la Clase A, pero permite recibir datos programados desde los Gateways en momentos específicos. Esto proporciona más flexibilidad en términos de sincronización y programación de la comunicación bidireccional (Alliance L. , 2019).

Clase C. Es la clase más activa en términos de comunicación bidireccional. Estos dispositivos están constantemente escuchando, pero emplean mayor consumo de energía. Son adecuados para aplicaciones que requieren baja latencia y comunicación en tiempo real (Alliance L. , 2019).

Canales y velocidad de transmisión

Con la finalidad de respaldar la identificación de planes de canal LoRaWAN para países específicos, la Tabla 3 nos muestra el plan de canales sugeridos disponibles para países de Latinoamérica incluyendo Ecuador. Estas bandas de frecuencia están reguladas por las autoridades gubernamentales locales y pueden variar en diferentes regiones (Alliance L. , 2020).

Tabla 3

Rango de frecuencias en Latinoamérica de la red LoRaWAN

Nombre del País	Banda/Canales	Plan de canales
Argentina	915-928 MHz	AU915-928
Bolivia	915 - 930 MHz	AU915-928
Brasil	902 - 907.5 MHz	
	915 - 928 MHz	AU915-928
	433 - 435 MHz	EU433

Nombre del País	Banda/Canales	Plan de canales
Chile	433 – 434.79 MHz	EU433
	915 - 928MHz	AU915-928
Colombia	433 – 434.79 MHz	EU433
	915 - 928 MHz	AU915-928
Costa Rica	433.05 - 434.79 MHz	EU433
	920.5 - 928 MHz	AS923-1
Cuba	433.05 - 434.79 MHz	EU433
	915 - 921 MHz	AS923-3
Ecuador	902 - 928 MHz	AU915-928
El Salvador	915 – 928 MHz	AU915-928
Guatemala	915 – 928 MHz	AU915-928
Honduras	915-928 MHz	AU915-928
México	902 – 928 MHz	US902-928
Nicaragua	915 - 928 MHz	AU915-928
Panamá	902 - 928 MHz	AU915-928
Paraguay	433.05 - 434.79 MHz	EU433
	915 - 928 MHz	AU915-928
Perú	915 - 928 MHz	AU915-928

Nota. Esta tabla muestra las bandas de frecuencias designadas para la red LoRaWAN en diferentes países. Tomado de (Alliance L. , 2020)

Como se puede ver en la Tabla 3 Ecuador pertenece al plan de canales AU915-928 el mismo que debe dividirse de la siguiente manera:

- Upstream: 64 canales numerados de 0 al 63 utilizando LoRa 125 kHz de ancho de banda variando desde DR0 a DR5, con tasa de codificación de 4/5, empezando desde 915,2 MHz hasta 927,8 MHz con incrementos de 200 kHz. También consta con 8 canales numerados del 64 al 71 utilizando LoRa 500 kHz de ancho de banda en DR7 empezando en 915,9 MHz hasta 927,1 MHz con incrementos de 1.6 MHz (Alliance L. , 2020).
- Downstream: 8 canales numerados del 0 al 7 empleando LoRa 500 kHz de ancho de banda en DR8 hasta DR13 empezando en 923.3 MHz hasta 927,5 MHz con incremento de 600 kHz (Alliance L. , 2020).

Los dispositivos terminales dentro del rango AU915-928 deben tener la capacidad de funcionar en el rango de frecuencia de 915 a 928 MHz y han de estar equipados con una estructura de datos de canal para almacenar los parámetros de 72 canales. Dicha estructura de datos de canal abarca una frecuencia específica junto con un conjunto de tasas de datos que se pueden emplear en esa frecuencia. (Alliance L. , 2020)

Factor de Dispersión

Cuando se envían datos, es fundamental comprender el concepto del factor de dispersión o Spreading Factor en inglés (SF). Este factor determina la cantidad de datos que se repetirán durante la transmisión del mensaje. Si la tasa de datos es alta, esto beneficia al Spreading Factor (SF) porque habrá más información repetida, lo que mejora la solidez de la comunicación y su alcance. Sin embargo, como consecuencia, la velocidad de transmisión será menor (Wu, He, & Shi, 2020).

La relación entre la tasa de datos, la tasa de bits y la configuración del factor de dispersión se presentan en la Tabla 4, donde se muestra de manera detallada cómo se interrelacionan y cómo afectan el rendimiento de la comunicación.

Tabla 4*Tasa de datos de Tx en la banda AU915-928*

Tasa de datos	Configuración	Tasa de Bit
0	LoRa: SF12 / 125 kHz	250
1	LoRa: SF11 / 125 kHz	440
2	LoRa: SF10 / 125 kHz	980
3	LoRa: SF9 / 125 kHz	1760
4	LoRa: SF8 / 125 kHz	3125
5	LoRa: SF7 / 125 kHz	5470
6	LoRa: SF8 / 500 kHz	12500
8	LoRa: SF12/500 kHz	980
9	LoRa: SF11 / 500 kHz	1760
10	LoRa: SF10 / 500 kHz	3900
11	LoRa: SF9 / 500 kHz	7000
12	LoRa: SF8 / 500 kHz	12500
13	LoRa: SF7 / 500 kHz	21900

Nota. Se puede las observar tasas de datos junto con sus configuraciones correspondientes y las tasas de bits asociadas en Ecuador (AU915-928). Tomado de (Alliance L. , 2020)

Potencia de transmisión

Por otro lado, los valores de codificación correspondientes a los niveles de potencia de transmisión (TX) en la banda AU915-928, junto con sus respectivos valores en decibelios milivatio (dBm) se muestran en la Tabla 5. Estos niveles de potencia indican la intensidad con la que un dispositivo puede transmitir señales en la mencionada banda de frecuencia. Cuando se busca una cobertura más amplia, es necesario considerar incrementar el valor de potencia de transmisión (Wu, He, & Shi, 2020). Sin embargo,

es importante equilibrar esto con las limitaciones y restricciones regulatorias vigentes para evitar interferencias no deseadas y cumplir con los límites permitidos.

Tabla 5

Potencia de transmisión TX en la banda AU915-928

TXPower	Configuración (EIRP)
0	Max EIRP
1:14	Max EIRP – 2*TXPower

Nota. EIRP se refiere a la potencia isotrópica radiada equivalente cuyo valor máximo por defecto se considera +30 dBm (Alliance L. , 2020)

Es esencial tener presente que los límites y normas relacionados con la potencia de transmisión y factor de dispersión pueden diferir dependiendo de las regulaciones locales y los estándares en vigor. Es necesario tener en consideración las pautas específicas aplicables en cada ubicación y adherirse a ellas para garantizar un desempeño óptimo sin poner en riesgo la integridad de la comunicación.

Indicador de fuerza de señal recibida

La Indicación de la Fuerza de Señal Recibida (RSSI) es la potencia de la señal recibida en milivatios y se mide en dBm. Este valor se puede utilizar como una medida de qué tan bien puede "escuchar" un receptor la señal proveniente de un emisor. La RSSI es un valor negativo. Cuanto más cerca esté de 0, mejor es la señal (Alliance L. , 2019). Los valores típicos de RSSI en LoRa son:

- Si RSSI = -30 dBm: la señal es fuerte.
- Si RSSI = -120 dBm: la señal es débil.

Relación señal-ruido

La Relación Señal-Ruido (SNR, por sus siglas en inglés) es la relación entre la potencia de la señal recibida y el nivel de potencia del ruido de fondo. El ruido de fondo representa todas las fuentes de señales no deseadas que pueden corromper la señal transmitida y, por lo tanto, provocar retransmisiones.

- Si el SNR es mayor que 0, la señal recibida opera por encima del nivel de ruido de fondo.
- Si el SNR es menor que 0, la señal recibida opera por debajo del nivel de ruido de fondo.

Normalmente, el nivel de ruido de fondo representa el límite físico de sensibilidad, sin embargo, LoRa opera por debajo del nivel de ruido. Los valores típicos de SNR en LoRa oscilan entre -20 dB y +10 dB. Un valor más cercano a +10 dB indica que la señal recibida está menos corrompida. LoRa es capaz de demodular señales que se encuentran entre -7,5 dB y -20 dB por debajo del nivel de ruido de fondo (Alliance L. , 2019).

Tipos de activación

Activación por personalización. En inglés Activation by Personalization (ABP) se codifica en el dispositivo final una dirección fija y claves de sesión para una red preseleccionada, y estos permanecen iguales durante toda la vida útil de un dispositivo final ABP. Con este modo, un dispositivo final omite el procedimiento de unión, lo cual parece más sencillo, pero este dispositivo solo puede funcionar correctamente en su red predefinida. Incluso si una red o un clúster permite registrar dispositivos finales con valores de direcciones diferentes a los asignados a esa red/clúster, el Enrutador de Paquetes no dirigirá el tráfico de esos dispositivos finales a la red/clúster correcto.

Además, aunque se asignen bloques de direcciones adicionales a la red/clúster, el Servidor de Red no podrá realizar la optimización de la asignación de dirección, por lo que el procedimiento de

coincidencia de dispositivos para dispositivos finales ABP no mejorará (Rocha, Oliveira, Pauletti, & Cavalheiro, 2023).

Activación en el aire. En inglés Over-The-Air Activation (OTA) un dispositivo final realiza un procedimiento de unión con una red LoRaWAN, durante el cual se asigna una dirección dinámica a un dispositivo final y se utilizan claves raíz para derivar claves de sesión. Por lo tanto, la dirección y las claves de sesión cambian en cada nueva sesión establecida. Los dispositivos finales OTAA se les asigna una nueva dirección en cada nueva sesión establecida. Esto les permite moverse entre diferentes redes/clústeres (Rocha, Oliveira, Pauletti, & Cavalheiro, 2023).

Sensores de calidad de aire

Los sensores de calidad del aire son dispositivos que miden la cantidad de contaminantes y gases presentes en el aire. Estos sensores pueden medir una amplia variedad de contaminantes, incluyendo dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO), partículas en el aire y otros gases tóxicos. En base a la información química que genera el sensor y las características del transductor que lo conforma es posible clasificarlo de la siguiente manera (García Navarrete & Rico Soto, 2020).

Sensores piezoeléctricos

Los sensores de calidad del aire funcionan midiendo los cambios en la masa que ocurren a medida que los contaminantes y gases interactúan con el dispositivo. Estos sensores están contruidos con material piezoeléctrico, que se hace vibrar para detectar la presencia de diferentes especies químicas. En esencia, el funcionamiento de estos sensores se basa en la gravimetría micro, registrando pequeñas variaciones en la masa para determinar la concentración de contaminantes en el aire (García Navarrete & Rico Soto, 2020).

Sensores electroquímicos

Los sensores electroquímicos se pueden clasificar en tres categorías: potenciométricos, voltimétricos y conductimétricos. La clasificación depende del mecanismo de funcionamiento y del principio físico de operación de cada sensor. Los sensores potenciométricos miden la relación entre el potencial de un electrodo indicador y la concentración de la sustancia objetivo. Los voltimétricos basan su funcionamiento en la relación corriente-voltaje y miden una corriente proporcional a la especie electroactiva. Por último, los conductimétricos miden la conductividad eléctrica de un material, registrando cambios debido a la presencia de la sustancia objetivo (García Navarrete & Rico Soto, 2020).

Sensores ópticos

Los sensores ópticos detectan gases utilizando luz u otras ondas electromagnéticas. Existen diferentes tipos de sensores ópticos y métodos para la detección de señales, como los detectores infrarrojos y la fotoionización, que operan en el espectro infrarrojo y ultravioleta, respectivamente (García Navarrete & Rico Soto, 2020).

Milesight

Milesight es una empresa líder en tecnología de vigilancia y seguridad. Ofrecen una amplia variedad de productos, incluyendo cámaras de seguridad IP, grabadores de vídeo en red (NVR), software de gestión de vídeo y más. La empresa está a la vanguardia en el uso de tecnologías como LoRaWAN para brindar soluciones de seguridad avanzadas y eficientes. La integración de LoRaWAN en sus productos permite una mayor cobertura, una mejor calidad de transmisión y una solución más eficiente en términos de energía.

Milesight es conocida en todo el mundo por su presencia global en el mercado de seguridad y su fiabilidad y eficiencia en la industria. Además, la compañía se destaca por su compromiso con la investigación y el desarrollo de productos de vanguardia.

La empresa brinda un servicio en la nube de Milesight que ofrece una interfaz fácil de usar y segura para la gestión de los distintos dispositivos conectados a través de los gateways, y permite a los clientes configurar y personalizar las opciones de acuerdo con sus necesidades. Además, el servicio en la nube de Milesight también permite una mayor flexibilidad en términos de escalabilidad, lo que significa que se pueden agregar más dispositivos a su sistema sin preocuparse por la capacidad de almacenamiento o la complejidad de la configuración (Milesight, Milesight-IoT, 2023).

Sensor óptico AM103/AM103L de Milesight

El sensor AM103/AM103L es un sensor compacto de monitoreo de ambiente interior como se puede ver en la Figura 3. Con esta tecnología de bajo consumo, el sensor puede funcionar durante más de 3 años con 2 baterías reemplazables. Al combinar con la puerta de enlace LoRaWAN y su servidor en la nube IoT de Milesight, se puede administrar todos los datos del sensor de forma remota (Milesight, Sensor Serie AM100 User Guide, 2023).

Figura 3

Sensores ópticos AM103 y AM103L de Milesight



Características principales:

- El dispositivo cuenta con varios sensores como humedad, temperatura y CO2

- La pantalla de tinta electrónica muestra los datos de forma visual y con emoticonos claros para que sea fácil entender el nivel de confort (AM103).
- Está equipado con un indicador de semáforo que muestra alarmas de diferentes niveles de CO2
- Cuenta con NFC incorporado para una configuración sencilla
- Es compatible con puertas de enlace y servidores de red estándar de LoRaWAN.
- La gestión de los datos es rápida y sencilla gracias a la solución de nube IoT de Milesight (Milesight, Sensor Serie AM100 Datasheet, 2023).

Sensor óptico AM307 de Milesight

El sensor AM307 es un dispositivo compacto que se utiliza para medir y monitorear el ambiente interior en tiempo real el mismo se puede visualizar en la Figura 4. Consta de varios sensores que miden parámetros como la temperatura, humedad, luz, concentración de CO2, compuestos orgánicos volátiles totales (TVOC) y presión barométrica. Estos datos se muestran en una pantalla E-ink para que los usuarios puedan ver el estado de la calidad del aire interior (Milesight, Sensor Serie AM300 User Guide, 2023).

Figura 4

Sensor AM307 de Milesight



Características principales:

- Integrado con varios sensores humedad, temperatura, CO2, luz, presión barométrica y TVCO.

- Posee múltiples modos de visualización y emoticonos claros para entender fácilmente los niveles de comodidad a través de la pantalla.
- Equipado con un indicador de semáforo y un zumbador para indicar el estado del dispositivo y las alarmas de umbral.
- Cumple con las puertas de enlace y servidores de red estándar de LoRaWAN (Milesight, Sensor Serie AM300 Datasheet, 2023).

Mini Gateway UG63 LoRaWAN de Milesight

UG63 es una puerta de enlace LoRaWAN ligera y compacta como se puede apreciar en la Figura 5 diseñada para interiores. La puerta de enlace UG63 se convierte en un complemento ideal para UG65 o UG67, especialmente en entornos complejos o áreas interiores amplias como oficinas, estacionamientos o campus en los cuales se requiera cubrir puntos ciegos. Cuenta con un servidor de red integrado y es compatible con Milesight IoT, lo que la hace adecuada para el manejo de datos de algunos nodos finales en despliegues pequeños de LoRaWAN (Milesight, Mini LoRaWAN Gateway UG63 User Guide, 2023).

Figura 5

Mini LoRaWAN Gateway UG63



Características Principales:

- Procesador integrado de alto rendimiento NXP y chip SX1302 con 8 canales dúplex. Admite "Listen Before Talk" (LBT) para downlink

- Compatible con otras puertas de enlace de Milesight como UG56/UG65/UG67
- Permite la comunicación segura con múltiples VPN como IPsec/OpenVPN/L2TP/PPTP/DMVPN
- Compatible con servidores de red principales como The Things Industries, ChirpStack, etc.
- Admite entre 20 a 50 nodos finales con NS incorporado para despliegues pequeños (Milesight, Mini LoRaWAN Gateway UG63 Datasheet, 2023).

Capítulo III

Desarrollo e Implementación

En este capítulo, se realizará una minuciosa exposición del estado actual de la Unidad Educativa Fiscal Antisana, abordando en detalle la configuración de los equipos y la puesta en marcha del sistema de monitoreo. Se otorgará una atención especial a la selección y aplicación de la tecnología LoRaWAN en las diversas aulas, arrojando luz sobre su integración en el entorno educativo.

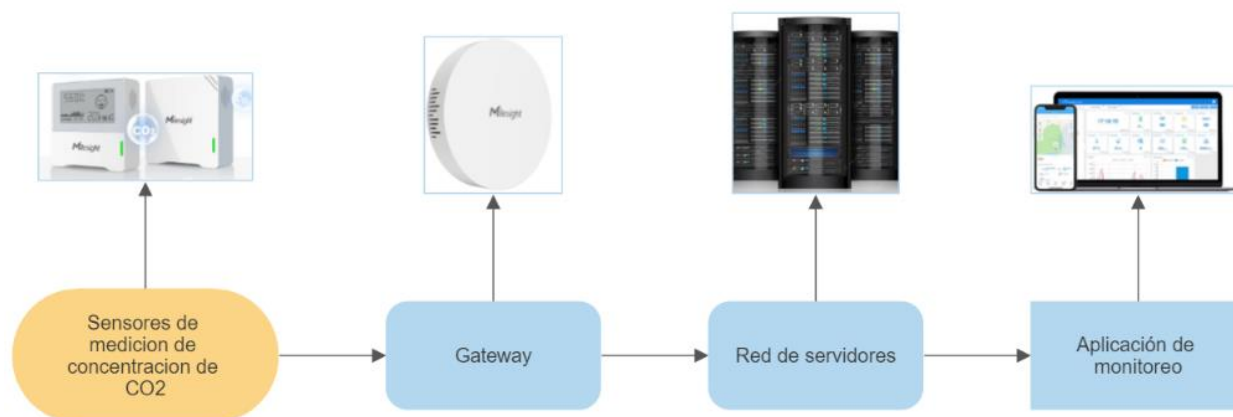
Arquitectura de la red de monitoreo de concentración de CO2

Para implementar una red de monitoreo de concentración de CO2 mediante tecnología LoRaWAN, se va a utilizar la siguiente arquitectura detallada en la Figura 6 cuyos componentes se detallan a continuación:

- **Sensores de medición de CO2:** Se instalan sensores de CO2 en los lugares donde se desea realizar el monitoreo. Estos sensores deben contarán con un módulo LoRa para poder enviar los datos a la red.
- **Gateway:** Un gateway LoRaWAN que se encarga de recibir los datos enviados por los sensores de medición de CO2 y transmitirlos a la nube a través de una conexión de red.
- **Red de servidores:** Los datos recibidos por el gateway se envían a una red de servidores que procesan y almacenan los datos. Estos servidores estarán alojados en la nube.
- **Aplicación de monitoreo:** La información recopilada se presentará en los Mulesight IoT Cloud podremos visualizar los datos obtenidos ya sea a través de un dispositivo móvil o una computadora.

Figura 6

Arquitectura de la red de monitoreo de CO2



Descripción de la Unidad Educativa Fiscal Antisana

Para establecer los sitios con mayor aglomeración de personas visitamos la institución educativa y primero tomamos en cuenta el número de personas que existían en cada aula detallando a continuación en la Tabla 6.

Tabla 6

Número de alumnos por curso de la Unidad Educativa Fiscal Antisana

Curso	Número de estudiantes
Octavo A	25
Octavo B	23
Noveno A	18
Noveno B	20
Décimo A	22
Décimo B	27
1ero Bachillerato A	23

Curso	Número de estudiantes
1ero Bachillerato B	25
2do Bachillerato A	21
2do Bachillerato B	23
3ero Bachillerato A	26

Nota. En la tabla se muestra el número de alumnos por cada curso de la Unidad Educativa Fiscal Antisana.

Como se puede observar en la Tabla 6 el curso con mayor número de personas es el Décimo B por lo que se colocara el sensor AM103 en dicha aula y el sensor AM103L en el décimo A para contrastar los datos obtenidos.

En la Figura 7 se puede denotar la similitud de ambas aulas siendo el área total de cada una de 60 metros cuadrados con 6 ventanas y una puerta de entrada que permiten su ventilación natural, los alumnos poseen un promedio de edad similar y pertenecen al mismo nivel lo que permitirá comparar el rendimiento académico de cada curso y si el mismo se ve afectado por las concentraciones de CO₂.

Figura 7

Aulas del décimo A y décimo B de la Unidad Educativa Fiscal Antisana



También colocaremos el sensor AM307 en el aula de computación para evaluar a todos los cursos del colegio Antisana en diferentes fechas, la misma que no consta de una ventilación adecuada como se puede observar en la Figura 8 ya que sus ventanas están cerradas y la única fuente de ventilación natural es la puerta de entrada.

Figura 8

Aula de computación de la Unidad Educativa Fiscal Antisana



No se pueden colocar más sensores ya que varias aulas de la institución educativa no constan con las condiciones adecuadas para poder evaluar las concentraciones de CO₂, siendo un problema precedente el hecho de que hay aulas con vidrios rotos o con aberturas en el techo que impedirán la toma de datos adecuados como se muestra en la Figura 9.

Figura 9

Aulas de la Unidad Educativa Fiscal Antisana



Finalmente, en la Figura 10 se muestra en mapa de la institución educativa señalando la distancia respectiva de cada sensor con respecto al Gateway que fue colocado en la dirección ya que era el único lugar con acceso a internet. El sensor AM103L se encuentra a 81 metros, el sensor AM103 a 75 metros de distancia del gateway y el sensor AM307 se encuentra a una distancia de 8 metros. Todos los sensores fueron colocados a una altura de un metro del suelo para medir de manera adecuada los valores de concentración de CO₂ (Minguillón, Querol, Felisi, & Garrido, 2020)

Figura 10

Distancia de los sensores al Gateway en la Unidad Educativa Fiscal Antisana



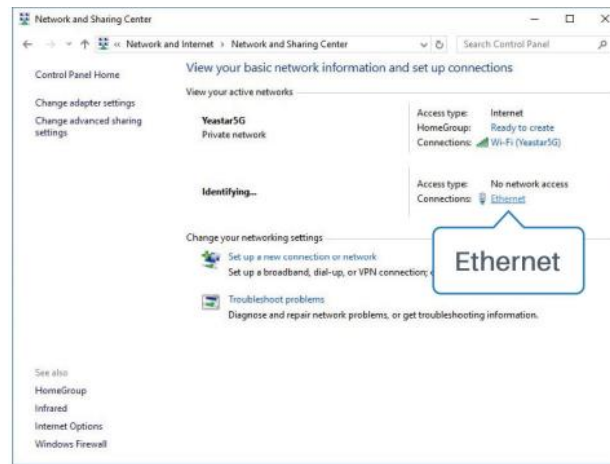
Configuración del Gateway UG63

Para configurar nuestro gateway primero conectamos un extremo del cable de internet en el puerto ETH del gateway y el otro extremo del cable directamente a la PC. Tras realizar aquello procedemos con la configuración siguiendo los siguientes pasos:

1. Ir a panel de control → Abrir "Redes e internet → Seleccionar Centro de redes y recursos compartidos → Dar clic en Ethernet tal como se indica en la Figura 11.

Figura 11

Panel del centro de redes y recursos compartidos



2. Luego cambiamos las propiedades del Protocolo de internet versión 4 (TCP/IPv4) → designar una IP estática como se muestra en la Figura 12.

Figura 12

Protocolo de internet versión 4 (TCP/IPv4)



3. Tras haber designado una IP estática (192.168.23.150) abrimos el navegador e ingresaremos a la misma dirección para poder ingresar con el nombre de usuario y la contraseña que vienen en el reverso del Gateway en los campos que se muestran en la Figura 13.

Figura 13

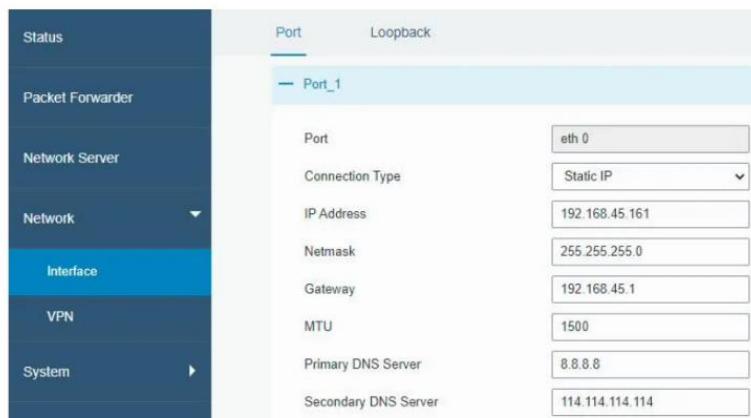
Página de ingreso de Milesight-IoT Cloud



4. Tras haber iniciado la sesión podemos configurar la conexión directa a la red realizando lo siguiente: Dar clic en la pestaña red → seleccionar Interfaz → Puerto. Ingresaremos los datos de dirección IP, mascara, puerta de enlace, MTU, y el DNS primario y secundario correspondientes a la red que tenemos en nuestro router como se muestra en la Figura 14 para luego presionar el botón de “Guardar y Aplicar”.

Figura 14

Pestaña de interfaz para configuración del puerto estático.



5. Al finalizar el proceso anterior conectamos un extremo del cable de internet en el puerto ETH de nuestro Gateway y el otro extremo a un puerto libre del router que vayamos a utilizar. Nuevamente debemos ingresar a la configuración, pero esta vez con la IP estática que hemos designado en el paso anterior (192.168.45.161).

- Para verificar el funcionamiento adecuado del mismo damos clic en la pestaña “Estado” y dentro seleccionamos “red” y podremos verificar el estado del puerto Ethernet como se muestra en la siguiente Figura 15 que se encuentra en enlace activo.

Figura 15

Pestaña de estado de la red actual



The screenshot shows a web interface with a sidebar on the left containing menu items: Status, Packet Forwarder, Network Server, and Network. The main content area has tabs for Overview, Network, VPN, and Routing. The Network tab is active, displaying a table for WAN interfaces. The table has columns for Port, Status, Type, IP Address, Netmask, Gateway, DNS, and Duration. Two rows are shown for the eth 0 interface.

Port	Status	Type	IP Address	Netmask	Gateway	DNS	Duration
eth 0	up	Static	192.168.45.161	255.255.255.0	192.168.45.1	8.8.8.8	16h 52m
							05s

- Para configurar el reenvío de paquetes debemos saber que el Gateway UG63 posee algunos reenviadores de paquetes preinstalados como UDP de Semtech, MQTT de Chirpstack-Generic y la estación base de LoRa. Por lo que debemos habilitar la conexión de puerta de enlace a los servidores de red de la siguiente manera: Vamos a “Reenviador de paquetes” → “General” y hacemos clic en agregar servidor de red como se muestra en la Figura 16.

Figura 16

Pestaña de configuración general de reenvío de paquetes

General Radios Advanced Custom Traffic


General Setting

Gateway EUI 24E124FFFEF12257

Gateway ID 24E124FFFEF12257

Frequency-Sync Disabled

Multi-Destination

ID	Enable	Type	Server Address	Connect Status	Operation
0	Enabled	Embedded NS	localhost	Connected	

8. A continuación, completamos la información como se muestra en la Figura 17 y procedemos a habilitar el servidor guardando la información ingresada.

Figura 17

Datos del servidor de Semtech

Enable

Type Semtech

Server Address eu1.cloud.thethings.network

Port Up 1700

Port Down 1700

Save

9. En la misma pestaña procedemos a configurar los radios con los que van a trabajar nuestros equipos como se muestra en la Figura 18. Primero designamos la región AU915 perteneciente al plan de frecuencia para Lora en Ecuador. Luego establecemos la frecuencia central en Radio 0 que permite transmitir y recibir paquetes en 924.0 MHz y posteriormente habilitaremos los 3 canales que vamos a utilizar con frecuencias de 938.8, 924.0 y 924.2 MHz respectivamente. Designamos en la configuración de los canales de LoRa el ancho de banda de 125 kHz y presionamos el botón de "Guardar y Aplicar".

Figura 18*Configuración de los canales de LoRa*

Name	Center Frequency/MHz
Radio 0	924.0
Radio 1	924.8

Enable	Index	Radio	Frequency/MHz
<input checked="" type="checkbox"/>	0	Radio 0	923.8
<input checked="" type="checkbox"/>	1	Radio 0	924.0
<input checked="" type="checkbox"/>	2	Radio 0	924.2
<input type="checkbox"/>	3	Radio 0	924.4
<input type="checkbox"/>	4	Radio 1	924.6
<input type="checkbox"/>	5	Radio 1	924.8
<input type="checkbox"/>	6	Radio 1	925.0
<input type="checkbox"/>	7	Radio 1	925.2

10. Luego debemos habilitar el servidor de Milesight IoT Cloud para poder registrar nuestros equipos por lo que realizamos lo siguiente en la pestaña “Servidor de red” → “General” ingresamos los datos del servidor de red de Milesight IoT Cloud como se muestra en la Figura 19.

Figura 19*Configuración del servidor de red de Milesight IoT cloud*

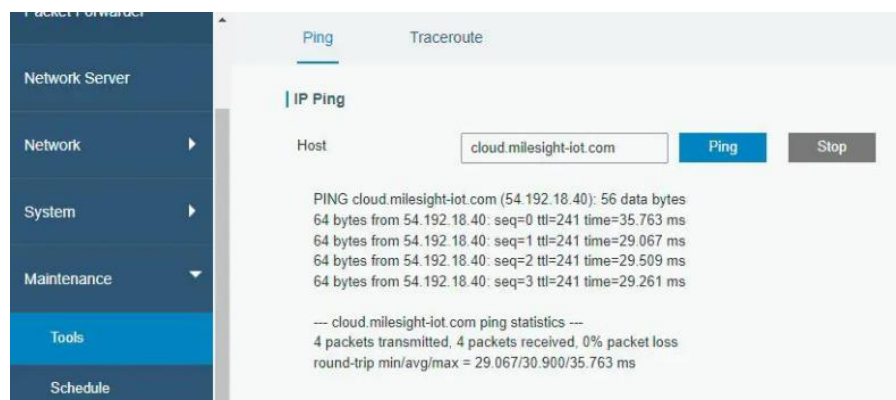
Setting	Value
Enable	<input checked="" type="checkbox"/>
Milesight IoT Cloud	<input checked="" type="checkbox"/>
NetID	010203
Join Delay	5 sec
RX1 Delay	1 sec
Lease Time	8760-0-0 hh-mm-ss
Log Level	info

11. Por último, debemos confirmar el correcto funcionamiento de los equipos verificando que tienen acceso a internet realizando Ping con el dominio de Milesight IoT Cloud. Por lo que vamos a

“Mantenimiento” → “Herramientas” → “Ping” y escribimos “cloud.milesight-oit.com” y presionamos el botón “PING”. Tal como se muestra en la Figura 20 debe transmitir 4 paquetes de datos y todos deben llegar para que tenga un correcto funcionamiento.

Figura 20

Pestaña de mantenimiento herramienta Ping



Configuración de sensores

1. Para configurar los sensores se debe usar la aplicación “ToolBox”, acercamos cada sensor a nuestro celular con NFC como se muestra en la Figura 21 e iniciamos la configuración.

Figura 21

Pantalla de inicio de la aplicación “ToolBox”



2. En la pantalla de estatus lo primero que se debe realizar es sincronizar dicho sensor presionando el botón que se indica en la siguiente Figura 22 para actualizar la fecha.

Figura 22

Pantalla del estatus de la aplicación "ToolBox"

Status	Setting	Maintenance
SN	6707C30657850707	
Model	AM307-915M	
Device EUI	24E124707C306578	
Firmware Version	V1.3	
Hardware Version	V1.1	
Device Status	ON	<input checked="" type="checkbox"/>
Join Status	Activated	
RSSI/SNR	-51/9	
Device Time	2022-12-20 10:33	Sync

- Para configurar los sensores debemos acceder a la pestaña de configuración y establecer los valores que se muestran en la Tabla 7. En este caso hemos de realizar dos configuraciones distintas en la primera etapa de pruebas tenemos el modo ADR activo con una velocidad de datos adaptativa lo que nos permitirá determinar cuál factor de dispersión se acopla mejor dependiendo de la distancia y en la segunda configuración hemos desactivado el modo ADR y hemos establecido el factor de dispersión fijo para tener una mejor disponibilidad en el envío de datos.

Tabla 7

Valores de configuración de los sensores

Parámetros	Descripción
Puerto de aplicación	85
Tipo de unión	OTAA
Versión de LoRaWAN	V1.0.3
Clase LoRaWAN	Clase A
Factor de dispersión	Si modo ADR apagado se coloca desde SF7 al SF12

Parámetros	Descripción		
Frecuencia RX2	923,8 (AM103)	924,0 (AM307)	924,2 (AM103L)
Frecuencia de soporte	AU915		
Habilitar índice del canal	43 (AM103)	44 (AM307)	45 (AM103L)
Modo de confirmación	Si no recibe el paquete ACK se reenvía 3 veces mas (ACTIVO)		
Modo ADR	Permite al servidor de red ajustar la velocidad de datos. (ACTIVO)		
Intervalo de reporte	5 minutos		

Nota. En la tabla se muestra la descripción de cada parámetro que debemos configurar estableciendo valores ya fijos en los parámetros ya predeterminados.

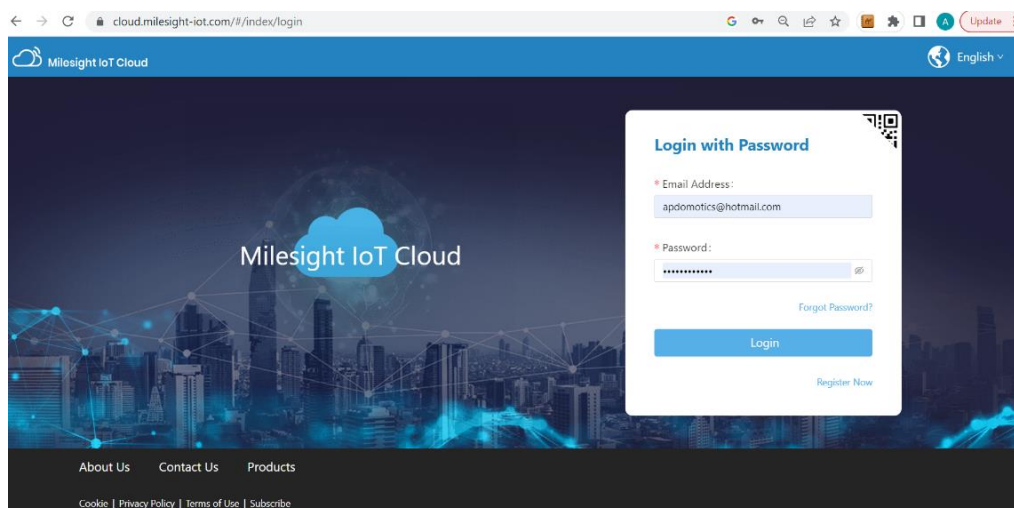
4. Para finalizar y guardar todos los cambios debemos presionar el botón “write” y debemos acercar nuevamente nuestro dispositivo inteligente a cada sensor para aplicar todos los cambios realizados.

Configuración de Milesight IoT Cloud

1. Para poder visualizar la información recibida de los sensores en línea debemos crear una cuenta en Milesight IoT Cloud dirigiéndonos a la siguiente página: <https://cloud.milesight-iot.com>. Una vez creada la cuenta ingresamos con nuestras credenciales como se muestra en la Figura 23.

Figura 23

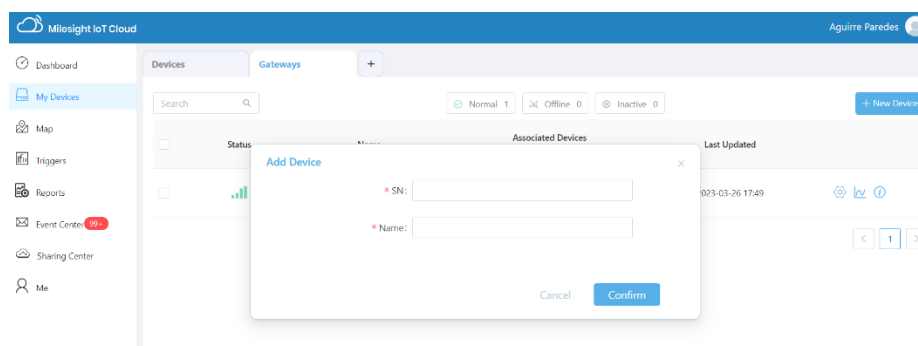
Página oficial de Milesight IoT Cloud



2. Tras iniciar sesión debemos ir a “mis dispositivos” y hacer clic en “+nuevos dispositivos” seguido se desplegará una ventana como se muestra en la Figura 24 donde debemos ingresar los datos de número de serie y nombre de nuestra Gateway que se muestra en la parte posterior del mismo.


Figura 24

Registro del Gateway en Milesight IoT Cloud

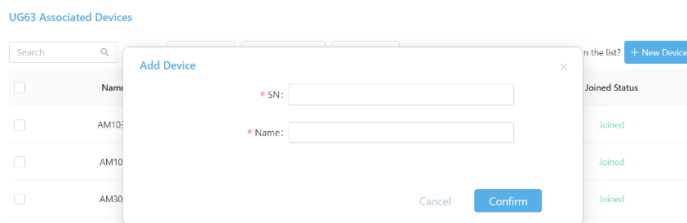


3. Una vez agregado el gateway y comprobado su correcto funcionamiento damos clic en “detalles” tal como se muestra en la Figura 25 para poder agregar los distintos sensores.

Figura 25*Comprobación funcionamiento del Gateway UG63*

Status	Name	Associated Devices (Joined /Not Joined /Failed)	Last Updated
	UG63 6816C3377578	3 / 0 / 0 Detail	2023-03-26 17:49

- Al desplegarse una nueva pestaña podremos agregar uno por uno los sensores necesarios de igual manera ingresando el número de serie y el nombre correspondiente de cada sensor como se puede apreciar en la Figura 26.

Figura 26*Registro de los sensores a Milesight IoT Cloud*


- Para finalizar podremos ver la lista de los sensores asociados a nuestro Gateway en la Figura 27 y de esta manera se comprueba su correcto funcionamiento.

Figura 27*Lista de Dispositivos conectados al Gateway*

Name	Model	SN	Joined Status
AM103L	AM103L	6725C44790330004	Joined
AM103	AM103	6725C06629070013	Joined
AM307	AM307	6707C30657850707	Joined

Capítulo IV

Análisis y resultados

En este capítulo, se ofrece un análisis de las pruebas de funcionamiento llevadas a cabo en la Unidad Educativa Fiscal Antisana, ofreciendo una perspectiva profunda sobre la efectividad del sistema de monitoreo y su capacidad para asegurar una cobertura adecuada dentro de las aulas de la institución. Además, se exponen los resultados de la implementación de la tecnología LoRaWAN a través de pruebas que se extendieron durante un período de 4 meses, culminando en la obtención de valores de disponibilidad en el entorno educativo.

Prueba de funcionamiento

Para la prueba de funcionamiento hemos colocado el Gateway en un punto fijo y los sensores a diferentes distancias lo que nos permitirá ver hasta que distancia funciona mejor los equipos con una velocidad de datos adaptativa ya que el modo ADR se encuentra activo. El resto de los valores de configuración se muestran en la Tabla 7. Se anotó los valores del indicador de fuerza de señal recibida (RSSI), la relación señal-ruido (SNR) y el factor de dispersión (SF) a diferentes distancias hasta perder la señal de los equipos. Dichos valores se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8

Valores de RSSI y SNR a diferentes distancias en los tres sensores

Distancia (m)	AM103L		AM103		AM307		SF
	RSSI (dBm)	SNR (dB)	RSSI (dBm)	SNR (dB)	RSSI (dBm)	SNR (dB)	
1	-33,33	13,60	-29,67	10,93	-29,00	12,23	SF7
10	-65,00	11,80	-68,00	7,17	-56,33	12,20	SF7
25	-77,00	-0,87	-72,67	-0,67	-68,33	3,60	SF7

Distancia (m)	AM103L		AM103		AM307		SF
	RSSI (dBm)	SNR (dB)	RSSI (dBm)	SNR (dB)	RSSI (dBm)	SNR (dB)	
50	-79,67	-7,13	-74,67	-8,53	-72,33	-5,93	SF7
75	-89,67	-11,17	-89,33	-6,83	-89,00	-7,37	SF10
100	-88,33	-6,03	-89,67	-14,23	-88,67	-8,13	SF10
125	-89,67	-12,07	-89,67	-15,90	-89,67	-11,73	SF10
150	-89,67	-11,93	-90,00	-14,30	-89,67	-16,50	SF10

Nota. Los valores fueron registrados en un área urbana y fueron anotados hasta que se dejó de recibir señal de todos los sensores.

Análisis factor de dispersión con velocidad de datos adaptativa

Si analizamos el factor de dispersión obtenido en los resultados de la Tabla 8 con la velocidad de datos adaptativa podemos ver que para distancias cortas de hasta 50 metros el factor de dispersión se establece en un valor de SF7 mientras que para distancias superiores el mismo se establece en un valor de SF10. Tomando en cuenta ambas configuraciones tienen con ancho de banda de 125 kHz como se muestra en la Tabla 4 su tasa de bits es de 980 bits/segundo para SF10 y 5470 bits/segundo para SF7.

Entre mayor sea el factor de dispersión implican un mayor incremento en la ganancia de procesamiento. Por lo tanto, una señal modulada con un factor de dispersión más alto puede ser recibida con menos errores en comparación con una señal de factor de dispersión más bajo, lo que le permite recorrer una distancia mayor. (Alliance L. , 2023)

Análisis de relación señal-ruido e indicador de fuerza de señal recibida

A continuación, se muestra de manera gráfica los resultados obtenidos entre la relación señal-ruido vs distancia en la Figura 28 y también entre el indicador de fuerza de señal recibida vs distancia en la Figura 29.

Figura 28

Relación señal-ruido vs Distancia

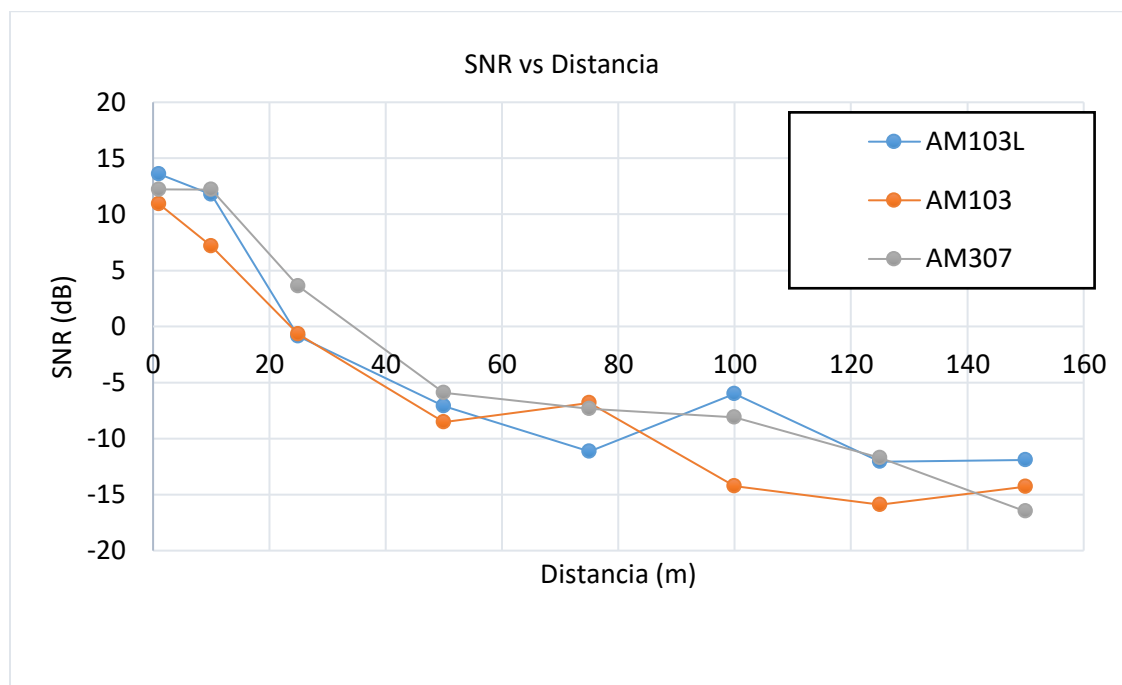
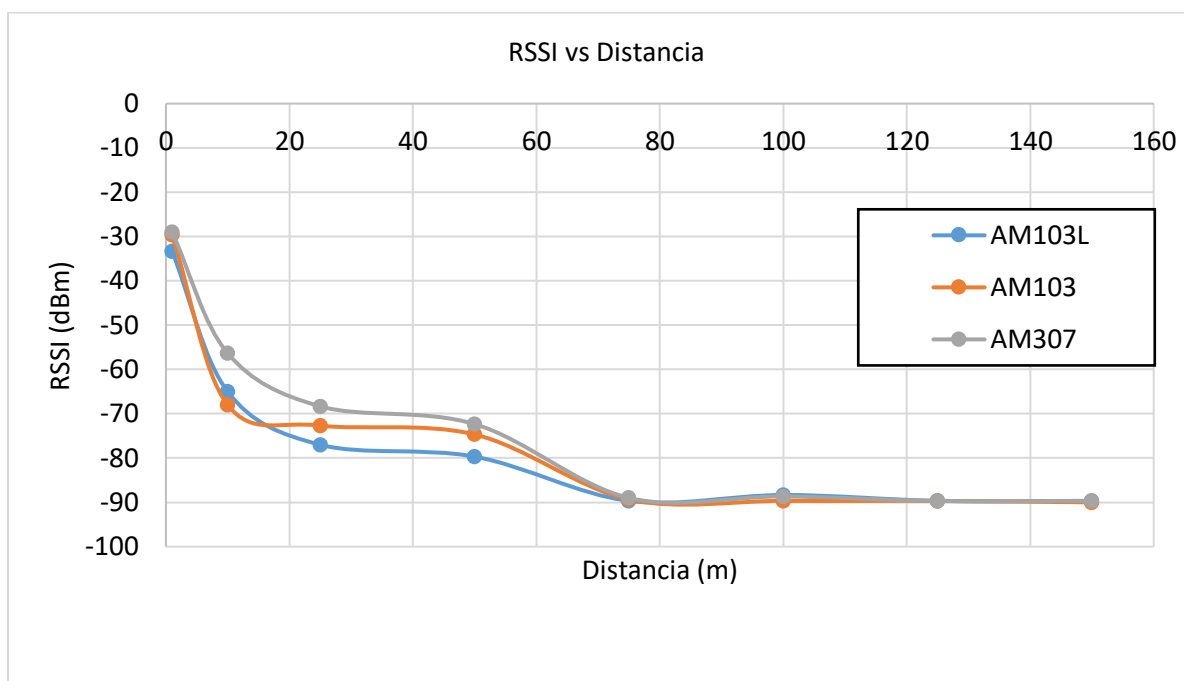


Figura 29

Indicador de fuerza de señal recibida vs Distancia



En general, se espera que a medida que aumenta la distancia entre el transmisor y el receptor, el RSSI tienda a disminuir. Esto es porque la señal se debilita a medida que viaja a través del espacio. Al mismo tiempo, el SNR también disminuye a medida que la señal se debilita y el ruido se vuelve relativamente más prominente. En la Tabla 9, se establecen rangos de valores para RSSI y SNR que permiten evaluar la calidad de la conexión de radio, calificándola como adecuada o deficiente.

Tabla 9

Calidad del enlace de radio en función del RSSI y SNR

Calidad de Enlace	RSSI	SNR	Interpretación
Buen Enlace	RSSI > -100 dBm	SNR > -7dB	Señal fuerte y bajo nivel de ruido
Mal Enlace	RSSI ≤ -120 dBm	SNR ≤ -13 dB	Límite de alcance.
Casos intermedios	RSSI > -100 dBm	SNR ≤ -13 dB	Señal fuerte pero ambiente ruidoso
	RSSI ≤ -120 dBm	SNR > -7dB	Dispositivo lejano, eliminar posibles obstáculos

Nota. En esta tabla se definen los rangos de RSSI y SNR para evaluar la calidad de enlace de radio obtenido (Sensing-Labs, 2023)

Ahora si relacionamos los datos obtenidos con los datos referenciales pertenecientes a la Tabla 9 obtenemos que a distancias muy cortas (1-10 metros), se registran valores positivos de RSSI y SNR en todos los dispositivos, indicando una señal robusta y relativamente libre de interferencias. Conforme la distancia aumenta, se evidencia una variabilidad en la calidad de la conexión. En general, para distancias mayores, los valores de RSSI tienden a disminuir, mientras que los de SNR pueden volverse más irregulares. Entre los 25 y 50 metros, algunos dispositivos experimentan un declive en la calidad del enlace (RSSI y/o SNR), lo que podría señalar la influencia de ruido ambiental o la atenuación de la señal a medida que se propaga. A 100 metros, se observa una degradación más marcada en los valores de RSSI y SNR, lo cual sugiere una posible merma en la calidad del enlace debido a la distancia o la presencia de obstáculos.

Finalmente, a 150 metros, la mayoría de los dispositivos exhiben valores de RSSI y SNR que insinúan una calidad de enlace deficiente, posiblemente atribuible al alcance máximo o a la existencia de obstáculos sustanciales en la trayectoria. Por este motivo tras alejar el dispositivo a los 175 metros se terminó perdiendo la señal por completo de los tres sensores.

Pruebas de concentración de CO2

Tras realizar las pruebas de funcionamiento se colocaron los sensores AM103L en el Aula de décimo A con 22 alumnos y AM103 en el aula de décimo B con 27 alumnos. Los valores se registraron durante 4 meses con reportes cada 5 minutos y fueron guardados en la base de datos de Milesight IoT Cloud. El motivo de evaluar ambos cursos a detalle se explica en el Capítulo II en el apartado de descripción de la institución educativa.

En este caso la configuración del factor de dispersión se mantuvo fijo ya que se recomienda mantener un valor fijo si los sensores no se van a mover (Milesight, Sensor Serie AM100 Datasheet, 2023), por lo que se desactivo el modo ADR y establecimos los valores de SF10 para los sensores AM103 y AM103L ya que se encuentran a una distancia superior a los 50 metros y de SF7 para el sensor AM307. El resto de los valores de configuración se mantuvieron de igual manera como se detalla en la Tabla 7.

Promedio de concentración mensual CO2

A continuación, se muestra el promedio de concentración de CO2 en los meses de febrero en la Figura 30, marzo en la Figura 31, abril en la Figura 32 y mayo en la Figura 33 de ambos paralelos tomando en cuenta solo los días en que tuvieron clases, se realizó un registro desde las 7:00 am hasta las 13:30 pm con intervalos de 15 minutos. Tomamos en cuenta que la jornada académica empieza a las 7:00 am, tiene un periodo de receso entre las 9:45 am y las 10:15 am para luego finalizar sus actividades a las 12:15 pm. Se muestran los valores hasta la 13:30 con el fin de determinar el tiempo que se demora en retornar los valores de concentración de CO2 a la normalidad.

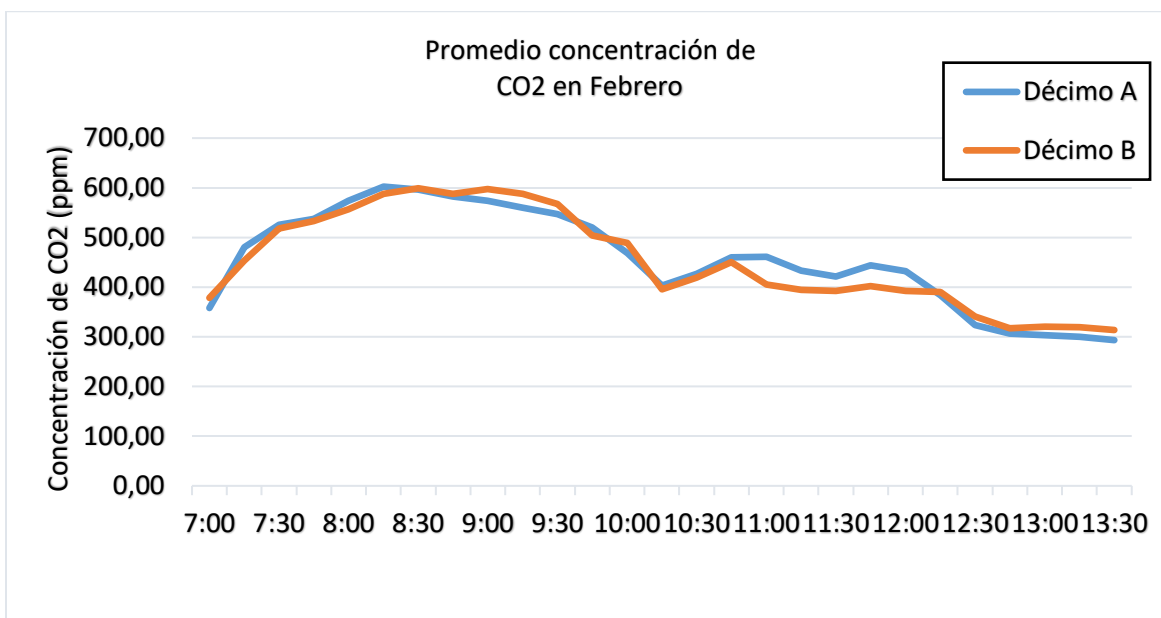
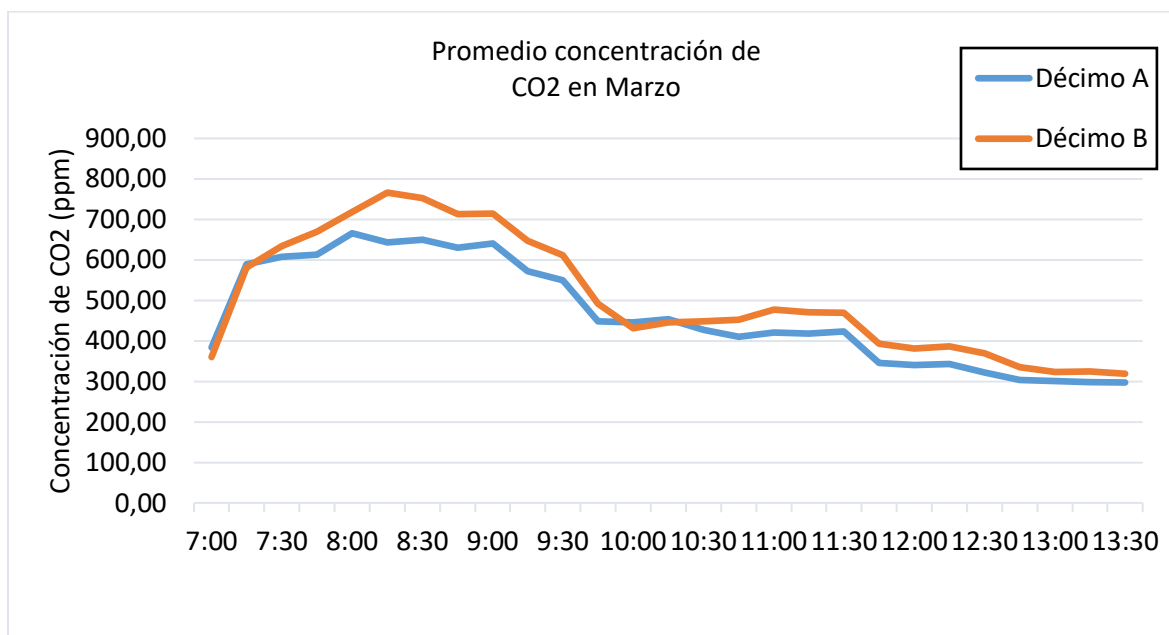
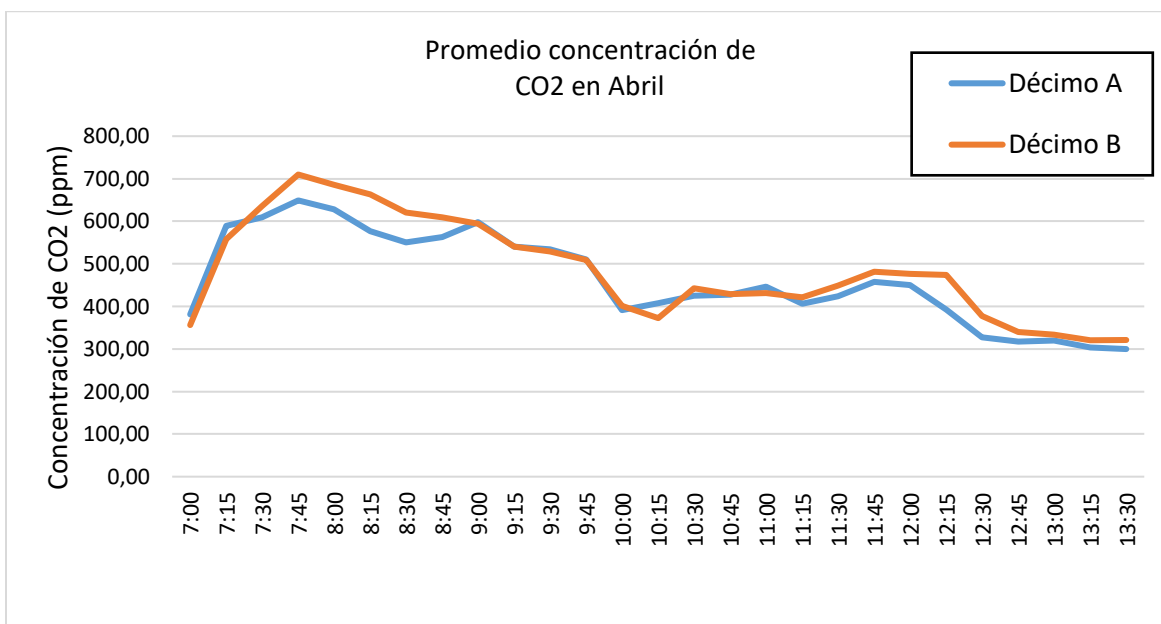
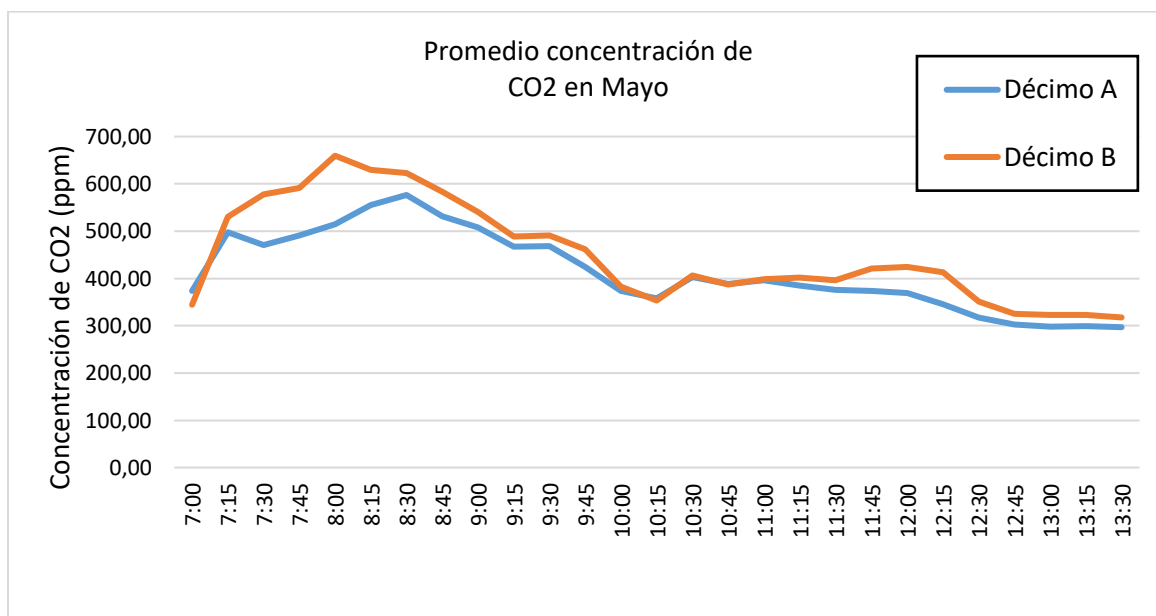
Figura 30*Promedio concentración de CO2 en el mes de febrero***Figura 31***Promedio concentración de CO2 en el mes de marzo*

Figura 32*Promedio concentración de CO2 en abril***Figura 33***Promedio concentración de CO2 en el mes de mayo*

Se puede denotar que el paralelo décimo B tiene una concentración de CO₂ mayor que décimo A en todos los meses exceptuando el mes de febrero cuyos valores llegaron a ser muy similares, tomando en cuenta que existen factores que influyen como la ventilación natural, alumnos ausentes y otros factores que no se puede predecir, se pueden dar este tipo de resultados.

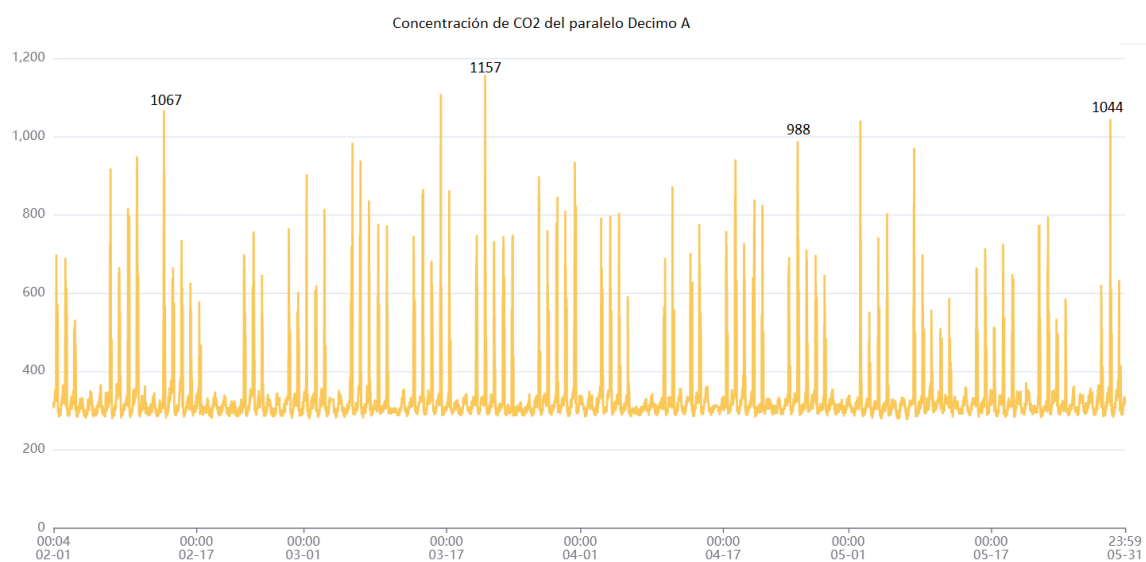
A pesar de que ambos salones de clases tienen las mismas dimensiones, el aula de Décimo B, que tiene 27 estudiantes, experimenta cambios más pronunciados en la concentración de CO₂ a lo largo del día en comparación con el aula de Décimo A, que tiene 22 estudiantes. Esto sugiere que el tamaño de la población en el salón de clases es un factor importante que contribuye a la variabilidad en la concentración de CO₂, probablemente debido a la mayor cantidad de CO₂ emitido por la respiración y la actividad de un número mayor de estudiantes.

Valores pico de concentración de CO₂

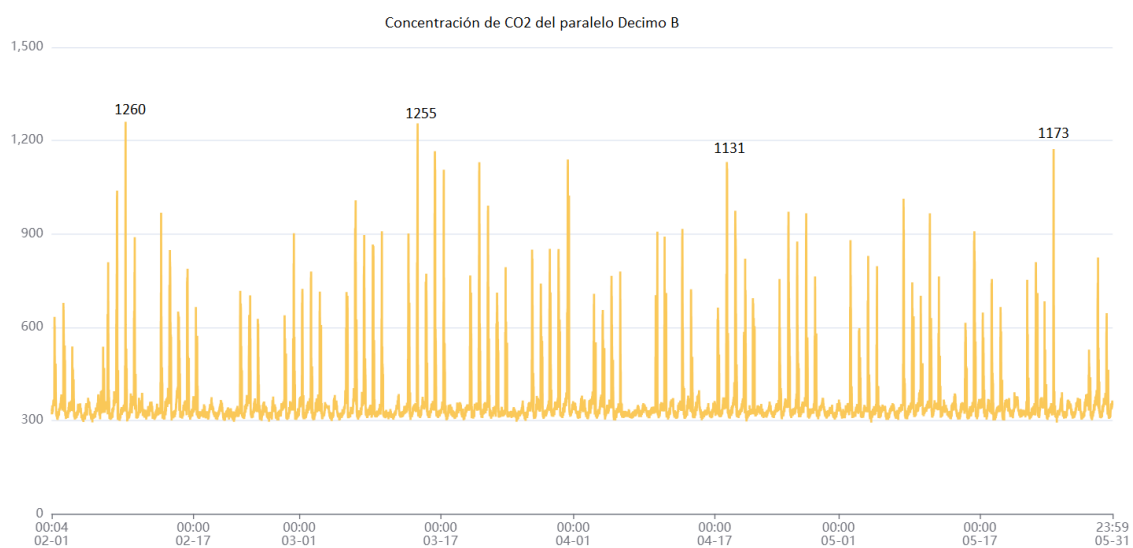
A continuación, la Figura 34 muestra los valores de concentración de CO₂ en 4 meses con intervalos de reporte cada 5 minutos pertenecientes al décimo A y la Figura 35 muestra los valores de concentración de CO₂ pertenecientes al décimo B. También se puede visualizar los valores pico de concentración de CO₂ en cada mes

Figura 34

Concentración de CO2 con valores pico décimo A en 4 meses

**Figura 35**

Concentración de CO2 con valores pico décimo B en 4 meses



En el paralelo décimo B, que cuenta con un mayor número de alumnos, se han registrado los valores pico más altos de concentración de CO2. Sin embargo, es importante tener en cuenta que los

picos de concentración no ocurren en las mismas fechas para ambas aulas, ya que cada una de ellas es independiente de la otra.

Esto significa que la concentración de CO₂ puede variar en cada aula debido a factores como la ventilación, el tamaño del espacio, la cantidad de personas presentes y otras condiciones específicas. Por lo tanto, es posible que en un determinado día un paralelo experimente un pico de concentración de CO₂, mientras que en la otra aula esto no suceda en la misma fecha.

Incidencia de concentración de CO₂ en el rendimiento académico

En la Tabla 9 podemos ver los promedios anuales en cada materia pertenecientes a los alumnos del décimo A y décimo B en los que hemos evaluado posteriormente los valores de concentración de CO₂.

Tabla 10

Promedio anual de los estudiantes de décimo A y décimo B

	Promedio Anual Décimo A	Promedio Anual Décimo B
Ciencias naturales	8,11	7,99
Educación Artística	7,3	7,73
Educación Física	7,71	7,81
Estudios Sociales	7,78	7,89
Inglés	7,42	7,12
Lengua y Literatura	7,65	7,26
Matemática	6,84	6,84
Total	7,54	7,52

Nota. La tabla muestra el consolidado obtenido del ministerio de educación de los alumnos del décimo

A y décimo B pertenecientes a la Unidad Educativa Fiscal Antisana

Tras realizar una comparación de ambos cursos se observa que el décimo A tiene un promedio general ligeramente superior al décimo B, aunque la diferencia no es significativa. Esto muestra que el curso con el promedio más alto es aquel que tiene valores de concentración de CO₂ más bajos y por consiguiente menor número de alumnos.

Es importante destacar que el promedio general no es el único indicador para evaluar el rendimiento académico pueden existir otros factores, como el nivel de dificultad de las asignaturas o las metodologías de enseñanza, que pueden influir en los resultados.

Disponibilidad de los sensores

Tras haber colocado los sensores en las respectivas aulas realizamos la medición de disponibilidad de estos durante los 4 meses que duro el experimento tomando en cuenta que fueron 120 días de registro de información con intervalos de reporte cada 5 minutos. Se registraron todos los momentos en los que se perdió la señal de cada sensor y cuando se recuperó dicha señal para tener un cálculo preciso de cuánto tiempo total los sensores no brindaron información.

Tabla 11

Disponibilidad de los sensores en la Unidad Educativa Fiscal Artesana

	AM103L	AM103	AM307
Horas de no Disponibilidad	2 d 13 h 08 min.	22 h 09 min	12 h 08 min
Porcentaje de disponibilidad	97,88%	99,23%	99,57%

Nota. En la tabla se muestra el tiempo total que no hubo disponibilidad de cada sensor en un promedio de 120 días que duro las mediciones de 4 meses.

Se puede ver que el sensor AM103L que era el más alejado al Gateway tenía una disponibilidad menor de 97.88% y el sensor que se encontraba más cerca una disponibilidad muy cercana al 100%. En

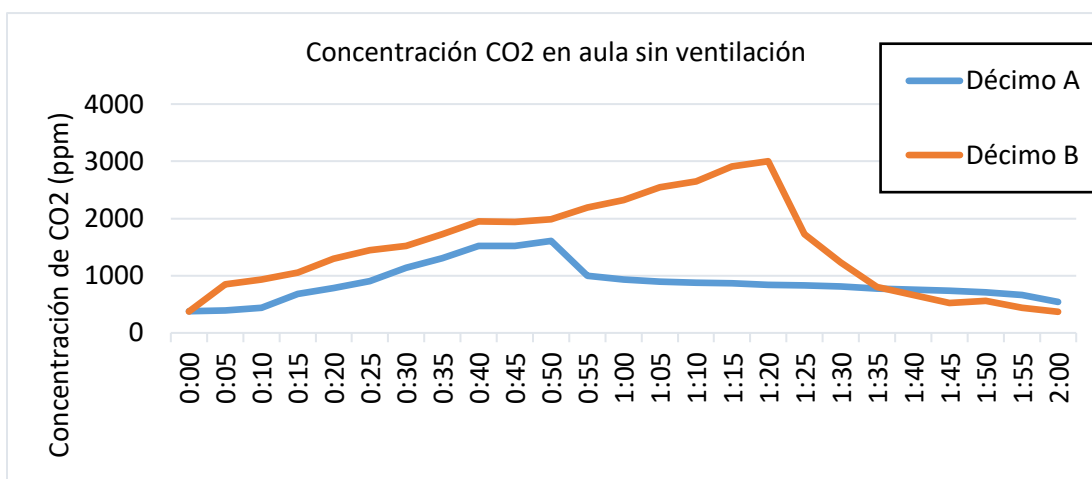
todo caso la disponibilidad de los 3 equipos es excelente para mediciones prolongadas ya que al ser una tecnología de bajo consumo energético no fue necesaria ningún tipo de intervención o reconfiguración tras la realización del despliegue de la red de monitoreo. Al tener activo el modo de reconexión los sensores tras perder la señal generalmente se volvían a conectar a la red al transcurrir 20 minutos.

Prueba de concentración de CO2 en un ambiente sin ventilación

En la siguiente prueba se midió la concentración de CO2 en el aula de computación que no poseía ventilación alguna. Cada medición se llevó a cabo en un periodo de 2 horas. Los valores registrados fueron tomados en cuenta desde que los estudiantes ingresan al aula y también media hora después de que los estudiantes ya han salido. La Figura 36 muestra la concentración de CO2 solo de los cursos decimo A y decimo B.

Figura 36

Concentración de CO2 en aula sin ventilación

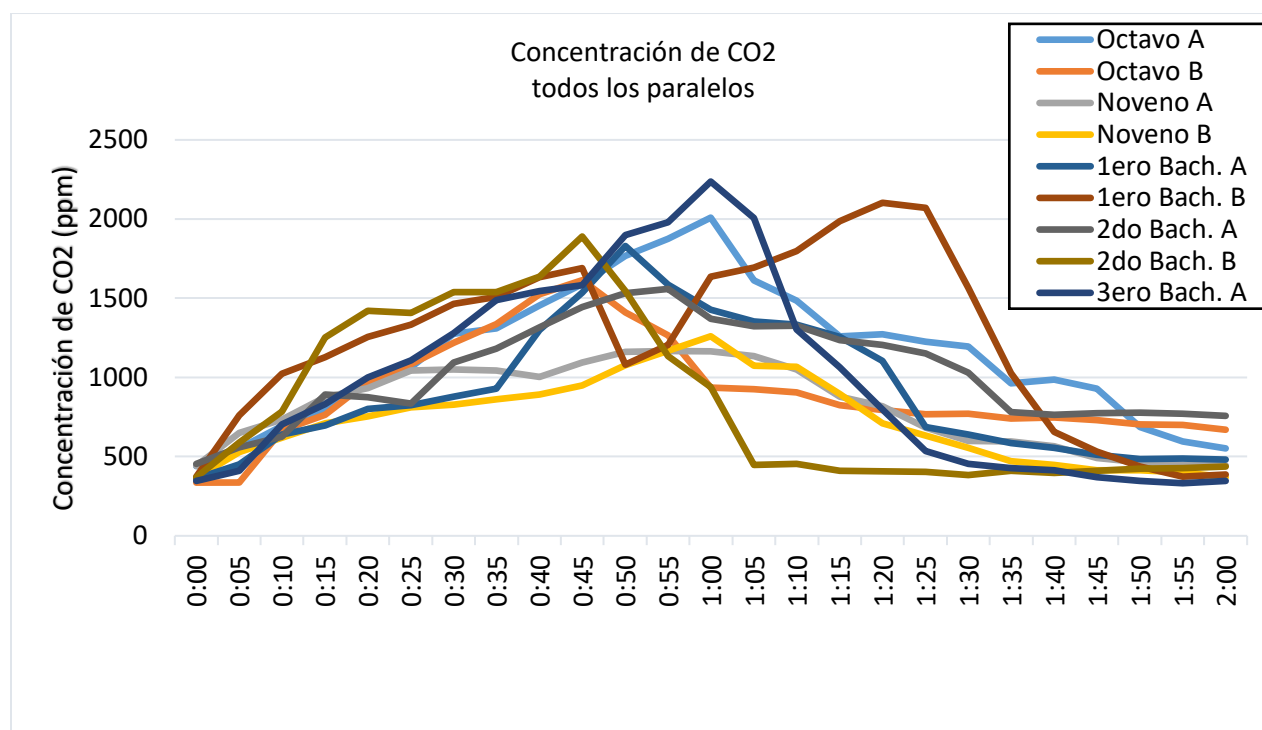


En la Figura 37 se puede evidenciar que la concentración de CO2 del décimo B con 27 alumnos es muy superior a la del décimo A con 22 alumnos, en un entorno sin ventilación los valores de concentración de CO2 alcanzan niveles peligrosos para salud ya que sobrepasan ampliamente el umbral máximo permitido de 1000 ppm situación que se daba rara vez en las aulas propias de cada curso que poseen una mejor ventilación natural.

Para contrastar los datos obtenidos también realizamos la medición de concentración de CO₂ en un aula sin ventilación del resto de paralelos de la Unidad Educativa Fiscal Antisana de igual manera se tomó un periodo de evaluación de 2 horas con intervalos de reporte cada 5 minutos dichos valores se muestran en la Figura 37.

Figura 37

Concentración de CO₂ en aula sin ventilación resto de paralelos.



En este caso se puede ver que la concentración de CO₂ en el resto de los paralelos también superan el valor de 1000 ppm lo que indica que un aula sin ventilación adecuada genera concentraciones nocivas para la salud. De manera general se puede ver que los paralelos con mayor número de estudiantes tienen valores de concentración de CO₂ superiores y también que los cursos con alumnos mayores también producen mayor concentración de CO₂ ya que dicho valor depende mucho de la edad género y estatura.

Es importante establecer medidas correctivas para mejorar el ambiente en el que se encuentran los estudiantes por lo que se debe calcular una tasa de renovación de aire como se muestran en el siguiente apartado.

Determinación de la tasa de renovación de aire

Dado que los valores obtenidos son perjudiciales para la salud debemos calcular la tasa de renovación de aire (ACH) en el aula. Para hacer esto, hemos de utilizar los valores obtenidos en la segunda prueba en la que se incrementó la concentración de CO₂ en el aula y luego, en ausencia de los alumnos y otras fuentes de CO₂, determinamos la velocidad de disminución de dicha concentración (Minguillón, Querol, Felisi, & Garrido, 2020). Esta variación nos indicará qué tan rápido el aire exterior reemplaza el volumen de aire interior en las condiciones de ventilación natural. Se debe aplicar la siguiente formula:

$$ACH = \frac{-1 * \ln \left(\frac{C_{\text{final}} - C_{\text{exterior}}}{C_{\text{inicio}} - C_{\text{exterior}}} \right)}{t_{\text{final}} - t_{\text{inicio}}}$$

$$C_{\text{final}} = C_{\text{exterior}} + \text{Exceso de CO}_2 \text{ final}$$

$$\text{Exceso de CO}_2 \text{ final} = 37\%(\text{Exceso de CO}_2 \text{ inicial}) = 37\%(C_{\text{inicio}} - C_{\text{exterior}})$$

Donde:

C_{final} → Concentración de CO₂ final

C_{exterior} → Concentración de CO₂ en el exterior

C_{inicio} → Concentración de CO₂ máxima

t_{final} → Hora a la que finaliza el experimento

t_{inicio} → Hora a la que finaliza la sesión de clase

Tomando en cuenta los valores registrados reemplazamos los mismo en la formula antes descrita y obtenemos la tasa de renovación de aire que debemos realizar para cada curso como se muestra en la Tabla 12.

Tabla 12

Valores para el cálculo de la tasa de renovación de aire

	C_{inicio}	C_{exterior}	C_{final}	t_{inicio}	t_{final}	ACH
Octavo A	2009	385,73	986,34	1:00	1:40	1,5
Octavo B	1614	385,73	840,19	0:45	1:15	2,0
Noveno A	1167	385,73	674,80	0:55	1:30	2,0
Noveno B	1260	385,73	709,21	1:00	1:20	3,0
Décimo A	1608	385,73	837,97	0:50	1:25	2,0
Décimo B	3001	385,73	1353,38	1:20	1:30	6,0
1ero Bach. A	1830	385,73	920,11	0:50	1:25	2,0
1ero Bach. B	2103	385,73	1021,12	1:20	1:40	3,0
2do Bach. A	1559	385,73	819,84	0:55	1:35	1,5
2do Bach. B	1890	385,73	942,31	0:45	1:00	4,0
3ero Bach. A	2237	385,73	1070,70	1:00	1:15	4,0

Nota. En la tabla se muestran los valores necesarios para el cálculo de la tasa de renovación de aire para cada curso.

Debemos tomar en cuenta la tasa de renovación de aire que hemos calculado para cada curso que debe ser aplicada cada hora o bien mejorar la manera de ventilar de forma natural el aula de computación que no posee ningún tipo de ventilación.

En esta aula se pudo observar que si dispone de 3 ventanas al costado izquierdo que fueron amarradas por cables a varias computadoras como se puede observar en la Figura 8, que si llegaran a abrir dichas ventanas en las horas de clases tendrían una mejor ventilación natural cruzada suficiente para no llegar a concentración tan perjudiciales para la salud.

Conclusiones y Recomendaciones

Se implemento un sistema de monitoreo de calidad del aire utilizando dispositivos con tecnología LoRaWAN en la Unidad Educativa Fiscal Antisana y se logró recopilar información sobre la concentración de CO₂ en áreas de aglomeración, obteniéndose una visión detallada de la calidad del aire en diferentes espacios.

Se verifico que el sistema de monitoreo funcionó de manera adecuada en la Unidad Educativa Fiscal Antisana. En las pruebas de funcionamiento, se realizó la medición de la relación señal-ruido (SNR) y el indicador de potencia de la señal recibida (RSSI). Los resultados demostraron que el sistema de monitoreo fue capaz de proporcionar una cobertura efectiva en distancias de hasta 150 metros. Esta cobertura garantiza un monitoreo confiable y preciso de la calidad del aire dentro de las instalaciones de la Unidad Educativa Fiscal Antisana.

Los sensores utilizados en el sistema de monitoreo demostraron una alta disponibilidad en su funcionamiento. Con valores de 99,57% para el AM307, 99,23% para el AM103 y 97,88% para el AM103L. Esto significa que los sensores fueron confiables y estuvieron operativos durante la mayor parte del tiempo de monitoreo.

Encontramos que el décimo B presenta una mayor concentración de CO₂ en comparación con el décimo A de manera general y a su vez se demostró que el rendimiento académico en el décimo A es ligeramente superior al del décimo B, a pesar de que no se haya sido una diferencia muy significativa.

Se identificaron concentraciones nocivas de CO₂ en el aula de computación en todos los cursos desde octavo a tercero de bachillerato. Es importante abordar este problema para crear un entorno de aprendizaje saludable, mejorando la ventilación natural del aula o tomando en cuenta los valores calculados de la tasa de renovación de aire para cada curso.

El implementar un sistema de alerta que notificaba cuando los niveles de concentración de CO2 superan los límites permitidos fue una medida positiva. Esto permitió tomar acciones rápidas como ventilar el aula y trasladar a los estudiantes a espacios abiertos hasta que los valores de concentración de CO2 regresen a los valores normales para garantizar la salud y el bienestar de los estudiantes y el personal de la Unidad Educativa Fiscal Antisana.

Recomendamos mejorar la ventilación en el aula de computación para reducir la concentración de CO2 y mejorar la calidad del aire. También es importante realizar un monitoreo continuo de la calidad del aire en todas las áreas del colegio, especialmente en aquellas donde se han encontrado concentraciones nocivas de CO2. Esto permitirá identificar patrones y tomar medidas preventivas.

Además, recomendamos establecer programas de concienciación y educación sobre la importancia de la calidad del aire y los efectos del CO2 en el rendimiento académico. Es fundamental que los estudiantes, el personal docente y los padres estén informados sobre las medidas tomadas y cómo pueden contribuir a mejorar la calidad del aire en el colegio.

Por último, es importante continuar investigando y explorando soluciones tecnológicas que puedan mejorar aún más el monitoreo de la calidad del aire, como sensores adicionales o sistemas de purificación del aire. Esto asegurará que la Unidad Educativa Fiscal Antisana esté a la vanguardia en la promoción de un entorno saludable y propicio para el aprendizaje.

Bibliografía

- (INSST), I. N. (2022). *Calidad del Ambiente Interior en el trabajo*. Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo, Madrid. Obtenido de <https://www.insst.es/documentacion/catalogo-de-publicaciones>
- Alliance, L. (2019). *LoRa Documentation*. LoRa Alliance. Obtenido de <https://buildmedia.readthedocs.org/media/pdf/lora/latest/lora.pdf>
- Alliance, L. (2020). *RP002-1.0.2 LoRaWAN Regional*. LoRa Alliance Technical Committee Regional Parameters Workgroup, Fremont. Obtenido de https://lora-alliance.org/wp-content/uploads/2020/11/RP_2-1.0.2.pdf
- Alliance, L. (01 de 07 de 2023). *The things network*. Obtenido de <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/spreading-factors/>
- Becerra, J., Lizana, J., Gil, M., Barrios, A., Blondeau, P., & Chacartegui, R. (2020). Identification of potential indoor air pollutants in schools. *Journal of Cleaner Production*, 242. doi:10.1016/j.jclepro.2019.118420
- Díaz, J., Fava, L., Antao, D., & Candia, A. (2019). *Soluciones IoT con tecnología LoRaWAN*. Universidad Nacional de San Juan. Obtenido de <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/77230>
- Dopazo González, L. (2019). Test y despliegue de tecnología de comunicaciones LoRa para aplicaciones de Internet of Things. (*tesis*). Universidad Politecnica Madrid, Madrid.
- Fajardo, O., Casas, J., Manuel, F., & Franco, H. (2021). Implementación de tecnologías de bajo costo para minimizar el riesgo de enfermedades transmitidas por el aire en entornos educativos. *Biomédica Revista del Instituto Nacional de Salud*, 150.

- García Navarrete, G., & Rico Soto, K. (2020). SENSORES DE BAJO COSTO PARA EL MONITOREO DE CALIDAD DEL AIRE. *Epistemus, Ciencia, Tecnología y Salud*, 13, 30-37.
doi:10.36790/epistemus.v13i27.108
- Gómez, R. (2022). Internet de las cosas, salud pública y pandemias. *Revista Científica Salud Uninorte*, 38(1), 240-253. doi:10.14482/sun.38.1.614.4
- Grün, G., & Urlaub, S. (2015). *Impact of the indoor environment on learning in schools in Europe*. Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, Holzkirchen. Obtenido de https://www.ibp.fraunhofer.de/content/dam/ibp/en/documents/Press-releases/Study%20report_Impact%20of%20the%20indoor%20environment%20on%20learning%20in%20schools%20in%20Europe.pdf
- Jouhari, M., Saeed, N., Alouini, M., & Amhoud, M. (2023). A Survey on Scalable LoRaWAN for Massive IoT: Recent Advances, Potentials, and Challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. doi:10.1109/COMST.2023.3274934.
- Marais, J., Malekian, R., & Mahfouz, A. (2017). LoRa and LoRaWAN testbeds: A review. *IEEE AFRICON*, 1496-1501. doi:10.1109/AFRCON.2017.8095703.
- Milesight. (2023). *Milesight-IoT*. Obtenido de <https://www.milesight.com/company/about-us>
- Milesight. (2023). *Mini LoRaWAN Gateway UG63 Datasheet*. Obtenido de <https://resource.milesight-iot.com/milesight/document/ug63-datasheet-en.pdf>
- Milesight. (2023). *Mini LoRaWAN Gateway UG63 User Guide*. Obtenido de <https://resource.milesight-iot.com/milesight/document/ug63-user-guide-en.pdf>
- Milesight. (2023). *Sensor Serie AM100 Datasheet*. Obtenido de <https://resource.milesight-iot.com/milesight/document/am103&am103l-datasheet-en.pdf>

- Milesight. (2023). *Sensor Serie AM100 User Guide*. Obtenido de <https://resource.milesight-iot.com/milesight/document/am103&am103l-user-guide-en.pdf>
- Milesight. (2023). *Sensor Serie AM300 Datasheet*. Obtenido de <https://resource.milesight-iot.com/milesight/document/am300-series-datasheet-en.pdf>
- Milesight. (2023). *Sensor Serie AM300 User Guide*. Obtenido de <https://resource.milesight-iot.com/milesight/document/am300-series-user-guide-en.pdf>
- Minguillón, M., Querol, X., Felisi, J., & Garrido, T. (2020). Guía para ventilación en aulas. doi:10.20350/digitalCSIC/12677
- Ordóñez, I. (2017). Estudio de la arquitectura y el nivel de desarrollo de la red LoRaWAN y de los dispositivos LoRa. *Universidad Oberta de Catalunya*. Obtenido de <http://hdl.handle.net/10609/64365>
- Rocha, A., Oliveira, M., Pauletti, J., & Cavalheiro, G. (2023). ABP vs. OTAA activation of LoRa devices: an Experimental Study in a Rural Context. *2023 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC)*, 630-634. doi:10.1109/ICNC57223.2023.10074553.
- Sensing-Labs. (2023). *Best Performing and Most Reliable LoRa Sensors*. Obtenido de <https://sensinglabs.com/f-a-q/a-good-radio-level/>
- Soledispa. (2020). Jonathan. *Análisis de niveles muy altos de CO2 en las aulas de clases mediante el sensor MQ-135*. Universidad de Guayaquil, Guayaquil. Obtenido de <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/58211>
- Wu, Y., He, Y., & Shi, L. (2020). Energy-Saving Measurement in LoRaWAN-Based Wireless Sensor Networks by Using Compressed Sensing. *IEEE Access*, 8, 49477-49486. doi:10.1109/ACCESS.2020.2974879.

Zilio, M. (2008). Emisiones de dióxido de carbono en América Latina. Un aporte al estudio del cambio climático. *Economía y sociedad*, XIV, 133-161.