

#### ARTICLE HISTORY

Received 30 September 2020  
Accepted 16 October 2020

**Kevin Piedra Orellana**  
DEET  
Universidad de Cuenca  
Cuenca, Ecuador  
kevin.piedra@ucuenca.edu.ec

**Fabián Astudillo Salinas**  
DEET  
Universidad de Cuenca  
Cuenca, Ecuador  
fabian.astudillos@ucuenca.edu.ec

**Geovany Lupercio Novillo**  
DEET  
Universidad de Cuenca  
Cuenca, Ecuador  
geovany.lupercio@ucuenca.edu.ec

**Andrés Vázquez Rodas**  
DEET  
Universidad de Cuenca  
Cuenca, Ecuador  
andres.vazquezr@ucuenca.edu.ec

**Ismael Minchala Ávila**  
DEET  
Universidad de Cuenca  
Cuenca, Ecuador  
ismael.minchala@ucuenca.edu.ec

# Registrador de datos pluviométricos basados en el microcontrolador ATMEL y el transceptor LoRa

*Rain gauge data logger  
based on ATMEL  
microcontroller and LoRa  
transceiver*

## Registrador de datos pluviométricos basado en el microcontrolador ATMEL y el transceptor LoRa

### Rain gauge data logger based on ATMEL microcontroller and LoRa transceiver

**Kevin Piedra Orellana**  
DEET  
Universidad de Cuenca  
Cuenca, Ecuador  
kevin.piedra@ucuenca.edu.ec

**Fabián Astudillo Salinas**  
DEET  
Universidad de Cuenca  
Cuenca, Ecuador  
fabian.astudillos@ucuenca.edu.ec

**Geovany Lupercio Novillo**  
DEET  
Universidad de Cuenca  
Cuenca, Ecuador  
geovany.lupercio@ucuenca.edu.ec

**Andrés Vázquez Rodas**  
DEET  
Universidad de Cuenca  
Cuenca, Ecuador  
andres.vazquezr@ucuenca.edu.ec

**Ismael Minchala Ávila**  
DEET  
Universidad de Cuenca  
Cuenca, Ecuador  
ismael.minchala@ucuenca.edu.ec

**Abstract** — The water and soil program (PROMAS) of the University of Cuenca contributes to the sustainable management of water and soil resources. To carry out this task, PROMAS requires, among others, to monitor environmental parameters using meteorological stations. In the present work, a rainfall data logger was developed on a compact printed circuit board (PCB) using surface mount components. LoRaWAN/ LoRa technology is used to transmit the information. LoRa is one of the LPWAN low power, long range network technologies. LoRaWAN is a protocol that manages end-to-end communication. This development integrates the acquisition, storage and transmission of data. The architecture is made up of a gateway device, the network server, and sensor nodes distributed over the area of interest. The data logger has the additional function of downloading data on-site using WiFi technology. The tests carried out showed that the developed prototype worked correctly in the acquisition, transmission and storage of data.

**Keywords** — Pluviometer; LoRaWAN; LoRa; gateway; WiFi.

**Resumen** — El programa del agua y el suelo (PROMAS) de la Universidad de Cuenca contribuye al manejo sostenible de los recursos agua y suelo. Para llevar a cabo este cometido, el PROMAS requiere, entre otros, monitorear parámetros ambientales utilizando estaciones meteorológicas. En el presente trabajo se desarrolló un registrador de datos pluviométricos en un PCB compacto utilizando componentes de montaje superficial. Para transmitir la información se usa la tecnología LoRaWAN/LoRa. LoRa es una de las tecnologías de redes de largo alcance y bajo consumo LPWAN. LoRaWAN es un protocolo que gestiona la comunicación de extremo a extremo. Este desarrollo integra la adquisición, el almacenamiento y la transmisión de los datos. La arquitectura está integrada por nodos sensores distribuidos en toda el área de interés, un dispositivo gateway y el servidor de red. El registrador de datos tiene como función adicional la descarga de datos in-situ usando tecnología WiFi, para esto se utiliza un gateway. Las pruebas realizadas mostraron que el prototipo desarrollado funcionó correctamente en la adquisición, transmisión y almacenamiento de datos.

**Palabras clave** — Pluviómetro; LoRaWAN; LoRa; gateway; WiFi.

## I. INTRODUCCIÓN

El PROMAS es un departamento de investigación de la Universidad de Cuenca. Este departamento tiene como misión contribuir al "manejo sostenible de los recursos agua y suelo, mediante la generación de conocimiento científico, la capacitación y la extensión; aplicando nuevas tecnologías y adaptando metodologías que permitan dar soluciones integrales, en equilibrio ambiental y con responsabilidad social". Para cumplir con este cometido, el PROMAS requiere, entre otros, monitorear ciertos parámetros ambientales utilizando estaciones meteorológicas (alrededor de 130) distribuidas en un área geográficamente extensa. El área de interés comprende desde el sector del Cajas en la provincia del Azuay y se extiende hasta la provincia del Cañar. Las estaciones miden varios parámetros hidro-meteorológicos, entre ellos la cantidad de lluvia. Las mediciones son usadas con fines de investigación en diferentes proyectos [1].

Las estaciones cuentan con un registrador de datos. El registrador realiza la adquisición de los parámetros hidro-meteorológicos y los almacena localmente. Los datos pluviométricos brindarán la posibilidad de disponer de información para evaluar crecidas, calcular balances de agua de los ríos, etc. Los datos recolectados por los registradores requieren ser transmitidos/copiados a los servidores del PROMAS ubicados en el campus central de la Universidad de Cuenca [1].

Actualmente, para la mayoría de las estaciones hidro-meteorológicas, la recolección

de datos se la realiza in-situ. El personal del PROMAS se desplaza a dichas estaciones para copiar los datos almacenados en cada una de ellas. En general, la periodicidad de visita a las estaciones es de entre 30 a 45 días. El acceso a estas estaciones resulta complicado debido a que están distribuidas en un área geográficamente extensa y una buena parte de ellas en lugares de difícil acceso [1].

Con estos antecedentes, en el presente trabajo se propone el diseño e implementación de un dispositivo registrador de datos pluviométricos con capacidad de comunicación LoRa y LoRaWAN, utilizando componentes de montaje superficial. El transceptor usado en la implementación es el módulo LoRa SX1278. El diseño del dispositivo contempla minimizar el tamaño del PCB, reducir el consumo energético, transmitir a largo alcance (al menos 1 Km [2]) en quasi-tiempo real (cada 5 minutos según el requerimiento del PROMAS). Adicionalmente, el dispositivo dispone de una función de descarga de datos in-situ a través de la tecnología WiFi.

El resto de este documento está organizado de la siguiente manera. La Sección II describe los trabajos relacionados. Por otro lado, en la Sección III se presenta la metodología aplicada. La Sección IV presenta el diseño e implementación del sistema. La Sección V expone los resultados de la evaluación del prototipo. La Sección VI presenta las conclusiones. Finalmente, la Sección VII resume los trabajos futuros.

## II. TRABAJOS RELACIONADOS

El protocolo y arquitectura LoRaWAN es aplicado a varias soluciones en las que se requiere la transmisión remota de datos a largo alcance y con un bajo consumo energético. Por ejemplo, en [3] se realiza la comparación de dos soluciones (WM Bus y LoRaWAN) para la conectividad de medidores inteligentes con respecto a la duración de las baterías. En el estudio se muestra que los medidores que usan LoRaWAN tienen un tiempo de servicio mucho más largo que los medidores que usan WM Bus. En [4] se muestra la implementación de una red inalámbrica de sensores (WSN) LoRaWAN diseñada para aplicaciones de monitoreo de salud estructural en el campo de la construcción. En [5], se usa LoRaWAN para la recopilación constante de datos de colonias de abejas. Los datos recopilados se transmiten a un centro de

datos remoto para su posterior análisis. En el estudio [6], se usa el protocolo LoRaWAN para la transmisión de datos de salud en sistemas de atención médica o datos críticos de salud en entornos de desastre.

Por otro lado, existen varias propuestas de diseño de registradores de adquisición y transmisión de datos meteorológicos basados en microcontroladores y transceptores de bajo consumo energético [7], [8]. Las tecnologías usadas en estos trabajos fueron LoRa y Zigbee. Estos dispositivos desarrollados cuentan con la capacidad de recopilar, almacenar y transmitir la información con un área de cobertura de largo alcance. En las pruebas de alcance se observó la superioridad del uso de dispositivos con tecnología LoRa con respecto a las demás

tecnologías. Además, se desarrolló un sistema de registro de datos sobre la cantidad de lluvia utilizando la placa LoPy4 [9].

En el presente trabajo se busca reducir el costo, el consumo de energía del registrador de datos pluviométricos, pero sobre todo la innovación radica en que los datos adquiridos

son transmitidos inalámbricamente al servidor del PROMAS, por lo tanto, ya no se necesita hacer visitas in-situ. Para lo cual, en el diseño se utiliza un microcontrolador Atmel (ATMega 1284p) y el módulo transceptor LoRa SX1278. Además, se implementa el protocolo LoRaWAN en el microcontrolador Atmel en base a la implementación Arduino-LMIC library [10].

### III. MÉTODO

El consumo de energía de los sistemas embebidos depende de los componentes que son incluidos en el diseño del prototipo para su desarrollo. Por lo tanto, se requiere tener el conocimiento de las características técnicas y principales sobre el consumo energético de algunos microcontroladores, previo al diseño del registrador de datos pluviométricos.

En la Tabla I se presenta un resumen de las características más relevantes de los microcontroladores seleccionados que cumplieron con los requisitos que se necesita en este prototipo, entre ellos el uso de memoria programable, compatibilidad con los dispositivos LoRa, el bajo costo y consumo de energía.

TABLA I. COMPARATIVA DE LOS MICROCONTROLADORES SELECCIONADOS [7]

Microcontroladores	Voltaje de Operación (V)	Temperatura (°C)	Modo Activo (A)	Modo de Ahorro de Energía (A)
STM32L053R8	1.65 a 3.6	-40 a 125	88 µ	0.8 µ
ATmega 328p	1.8 a 5.5	-40 a 85	0.3 m	0.8 µ
Atmega 1284p	1.8 a 5.5	-40 a 85	0.3 m	0.6 µ
MSP-EXP432P401R	3.3 a 5	-40 a 85	80 µ	660 n
PIC32MX340F512H	7 a 15	-40 a 125	75 m	0.9 m

Tras el análisis de las características técnicas de los microcontroladores, se consideró como la mejor opción el uso del microcontrolador ATmega1284p por la compatibilidad con los sensores y demás dispositivos utilizados, su facilidad de implementación con el transceptor LoRa, además de tener mayor capacidad en la

### IV. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN

La Figura 1 muestra el diagrama de bloques del prototipo de registrador de datos pluviométricos propuesto. El sistema requiere un bajo consumo de energía, un alcance de al menos 1 km, la adquisición de la señal del sensor pluviométrico, el almacenamiento, y la transmisión en quasi-

memoria de programa y menor costo que los otros componentes.

Una vez seleccionado el microcontrolador, se procede a seleccionar el transceptor LoRa. En [7] se realizó la implementación del circuito RF del transceptor LoRa usando los servicios de construcción y ensamblaje de PCBs disponibles localmente, con el fin de abaratar los costos en el producto final, sin embargo, se tuvieron varios problemas a la hora de implementarlo. En nuestro medio no hay empresas que provean servicios de soldado de componentes de montaje superficial automático. El montaje de los componentes fue a mano y se produjeron varias imprecisiones a la hora de soldarlos, como por ejemplo en la unión de dos pines por una pequeña cantidad de solda.

En consecuencia, se buscaron dispositivos LoRa con los componentes RF integrados, para el diseño se decidió usar específicamente el Ra02 LoRa SX1278. Este viene encapsulado para montaje superficial y directamente con un pin de conexión RF para la antena. Entre sus características están: bajo consumo energético, frecuencia y corriente configurable. La frecuencia de operación es de 433 MHz. Su sensibilidad es mayor a -148 dBm y contiene un amplificador de potencia de +20 dBm. El voltaje de alimentación es de 1.8 a 3.7 V. La corriente en modo recepción para los módulos SX1278 es de 9.9 mA. La corriente en modo transmisión puede ser configurada desde 10 mA a 240 mA, siendo 100 mA la corriente sugerida por el fabricante [11]. Luego del análisis de componentes se procedió a hacer un trabajo de reingeniería del trabajo [9].

tiempo real. Adicionalmente, se requiere que el dispositivo transmita información sobre el estado del equipo usando los parámetros de temperatura, humedad, y nivel de carga de la batería, junto con información temporal de fecha y hora.

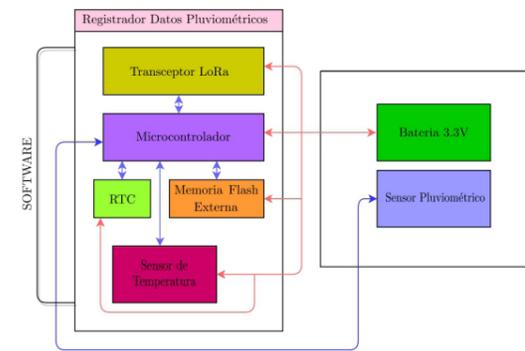


Fig. 1. Diagrama de bloques del diseño del prototipo.

El dispositivo es desarrollado para cumplir las funciones de medición, transmisión y almacenamiento de varias variables en determinados intervalos de tiempo. Para el diseño se utilizó un transceptor con tecnología LoRa, un microcontrolador de bajo consumo de energía, una memoria flash, un sensor de temperatura y humedad, un reloj de tiempo real (RTC, Real Time Clock) y un sensor pluviométrico.

#### A. Esquemático del dispositivo

La Figura 2 presenta el diagrama de bloques de la estación pluviométrica. Inicialmente, en el diagrama se encuentra el módulo transceptor LoRa SX1278 Ra-02 (bloque 1), que es el encargado de la transmisión hacia la antena RF. En el bloque 2 se ubica el microcontrolador ATMega 1284p, su función es el control del sistema y de la comunicación con los dispositivos, en este caso con la memoria flash externa (bloque 3), el RTC (bloque 4), transceptor LoRa (bloque 1) y los sensores (bloque 5). Por último, para futuras expansiones con nuevos sensores o dispositivos, se añadieron pines de control analógicos/digitales (bloque 6).

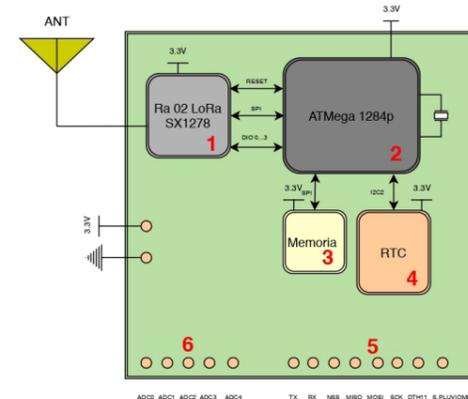
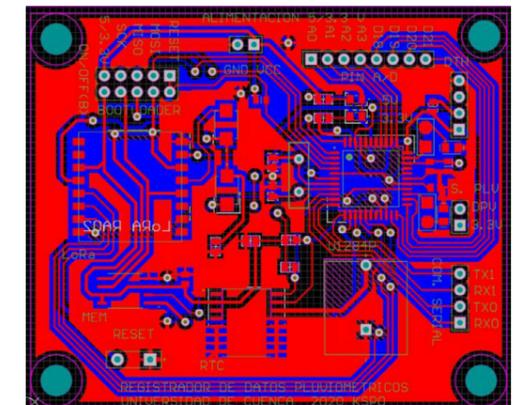


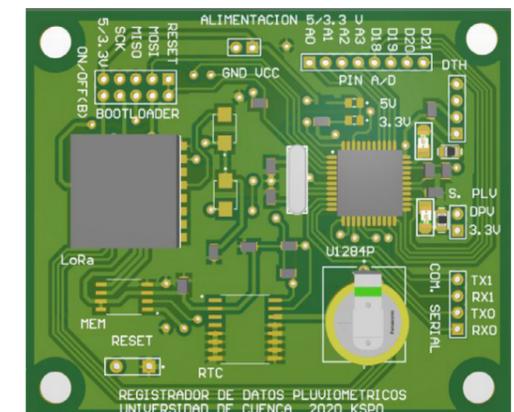
Fig. 2. Diagrama de bloques de la estación pluviométrica.

#### B. Características del PCB

Las dimensiones del PCB desarrollado son de 75.86 × 63.294 mm. Las pistas de conexión tienen un grosor de 0.35 mm y las de alimentación de 0.5 mm. Como regla de diseño cuenta con un clearance de 0.25 mm para evitar un acople indeseado (crosstalk), debido a la cercanía de las pistas. Los componentes se agrupan según las señales a procesar, esto se hace para reducir la distancia de las pistas y los efectos parásitos resistivos e inductivos. Los componentes usados son de montaje superficial. En las Figuras 3a y 3b se muestra el diseño PCB del prototipo final en 2D y 3D respectivamente. En el modelo 2D se encuentran visibles todas las capas disponibles, mientras que en el modelo 3D se muestra el diseño PCB, en el cual fue añadido el screen laminado para la identificación de los pines de comunicación, alimentación y control.



(a) PCB en 2D



(b) PCB en 3D

Fig. 3. Diseño final del PCB del dispositivo (a). 2D. (b). 3D.

### C. Protocolo LoRaWAN

El protocolo LoRaWAN es una especificación para redes de baja potencia y área amplia (LPWAN, Low Power Wide Area Network). Este protocolo es también usado para la especificación de la arquitectura de red del sistema. La capa física de LoRaWAN es Long Range (LoRa), esta habilita el enlace físico de comunicación. Las ventajas de usar LoRaWAN son: una comunicación de largo alcance, un menor consumo de energía, y su bajo costo (infraestructura mínima, nodos finales de bajo costo, software abierto).

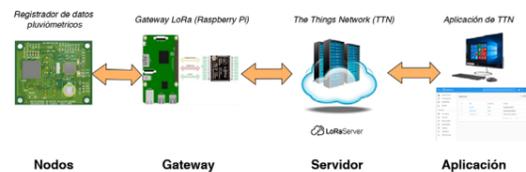


Fig. 4. Arquitectura de la red LoRaWAN.

La arquitectura de red LoRaWAN consta de nodos sensores (dispositivos finales), gateways (puertas de enlace), un servidor de red y servidores de aplicaciones (Figura 4). En una red LoRaWAN, un nodo sensor adquiere los datos meteorológicos, que son transmitidos y recibidos por múltiples gateways. Cada gateway reenviará el paquete recibido al servidor de red a través de la red celular, Ethernet, WiFi o satélite. El software que se ejecuta en el gateway es responsable de reenviar cualquier paquete de datos entrantes al servidor de red. A su vez, el servidor de red envía y recibe mensajes LoRaWAN hacia y desde dispositivos, que se comunican con servidores de aplicaciones ascendentes. El servidor de aplicaciones es el destino final de los datos de la aplicación del dispositivo, enviados como carga útil (payload) en los mensajes de LoRaWAN [11].

#### a) Nodo final LoRa

Los nodos finales, que pueden estar físicamente fijos o móviles, transmiten datos del sensor a un gateway LoRa. Se puede construir un nodo final combinando varias opciones de hardware y software. La Figura 3 muestra la implementación del prototipo PCB del nodo final.

Para la configuración de la red LoRaWAN se seleccionó el método de activación por personalización (ABP). El uso de este método requiere definir los siguientes valores:

- Dirección del nodo (*DevAddr*).
- Clave de sección de aplicación (*AppSKey*).
- Clave de sección de red (*NwkSKey*).

Los valores *DevAddr*, *AppSKey* y *NwkSKey* se configuran en el microcontrolador ATmega 1284p y en el servidor LoRa para el proceso de autenticación. Para inicializar el nodo en modo LoRaWAN se definen la dirección, las claves, el tipo de activación, y la frecuencia en la que opera el transceptor LoRa, en este caso 433 MHz.

#### b) LoRa Gateway

Los gateways LoRaWAN deben tener mayor capacidad de procesamiento que los nodos finales. Por esta razón, se procedió a implementar un gateway LoRa con un Raspberry Pi. El gateway LoRa consta de un transceptor de radio, un microprocesador, una fuente de alimentación y una antena. El Raspberry Pi funciona como un reenviador de paquetes. Toda la comunicación entre el transceptor de radio LoRa y el Raspberry Pi se manejará usando comunicación serial SPI (Figura 5).

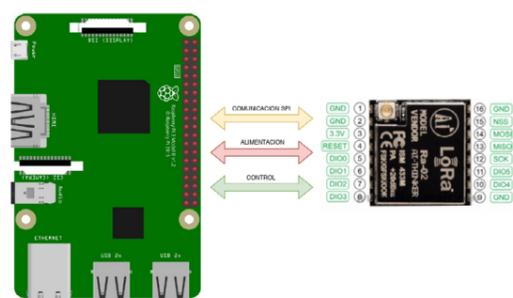


Fig. 5. Gateway LoRaWAN basado en Raspberry Pi y el módulo LoRa Ra02 SX1278.

#### c) The Things Network

The Things Network (TTN) desarrolla una implementación de un servidor de red mundial LoRaWAN. Esta red permite conectar los gateways, registrar dispositivos y enviar/recibir datos en quasi-tiempo real. La ventaja de TTN es que se puede usar de manera gratuita. En la Figura 6 se observa el interfaz de la consola de TTN, que tiene disponible las aplicaciones y los gateways que se requieran registrar.

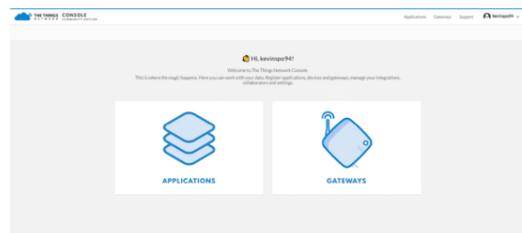


Fig. 6. Interfaz de la consola de TTN.

Para la visualización de los datos de las aplicaciones en TTN, las cargas útiles tienen que ser decodificadas. En la aplicación, TTN tiene una sección para desarrollar el decodificador en el lenguaje Javascript. Para este caso, esto permite reconocer si los paquetes de datos son del sensor pluviométrico o del estado del dispositivo.

### D. Almacenamiento de datos

La información del dispositivo se almacena en dos tipos de archivos: de configuración y de datos. El archivo de configuración *rain.cnf*, contiene la información de configuración de la estación. En este archivo se escribe el intervalo de tiempo de cada periodo en el que los datos se van a almacenar en memoria y enviar hacia el servidor. Además, la configuración de las credenciales del enlace ABP entre el nodo y la aplicación del servidor.

Para el almacenamiento de los datos recolectados por el dispositivo, se crean dos grupos de archivos. El primer archivo almacena datos del sensor de lluvia, su prefijo es (*sensor-[fecha].dat*). El segundo archivo almacena información de estado sobre el nivel de batería, temperatura y humedad del ambiente en el que se encuentra el nodo; su prefijo es (*estado-[fecha].dat*). Los registros del sensor se almacenan de manera predeterminada cada \$5\$ minutos, o en función del periodo configurado en el archivo *rain.cnf*. El estado se almacena cada 60 minutos. Estos tiempos de almacenamiento son definidos en base a los

requerimientos del PROMAS. A continuación, se detalla la estructura de cada uno de los archivos.

#### a) Estructura del archivo para almacenamiento de datos

Se definen dos tipos de registros: registro de datos (Figura 7) y registro de estado (Figura 8). El registro de datos tiene la información adquirida por el sensor de lluvia; estos datos se almacenan por defecto cada 5 minutos, el tamaño de cada registro es de 64 bits. Por su parte, el registro de estado almacena información sobre la condición interna del registrador de datos. La información de estado se almacena cada hora y el tamaño de cada registro es de 72 bits.

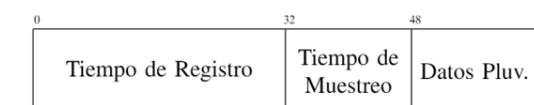


Fig. 7. Estructura de trama para el almacenamiento en el archivo del sensor de lluvia.



Fig. 8. Estructura de trama de datos para el almacenamiento en el archivo de estado.

## V. RESULTADOS

En esta sección se describen los resultados obtenidos durante el diseño, construcción y pruebas del prototipo. Se detalla el funcionamiento final y los resultados obtenidos en varias evaluaciones relacionadas con el almacenamiento, la transmisión, y el consumo energético del sistema.

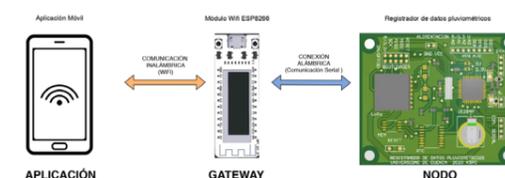


Fig. 9. Arquitectura de la red para la descarga de datos in-situ.

### A. Descarga de datos in-situ

Para la descarga de datos intervienen tres dispositivos: un nodo sensor, un gateway in-situ y un dispositivo móvil (Figura 9). El gateway se conecta a los nodos sensores utilizando comunicación serial UART. Para la comunicación entre el dispositivo móvil y el gateway in-situ se usa WiFi.

### B. Nodo

El nodo, es decir, el registrador de datos (Figura 3), es el encargado de responder las solicitudes enviadas desde la aplicación móvil por medio del gateway in-situ. La conexión entre el nodo y el gateway in-situ se realiza de manera alámbrica. El gateway dispone de un

cable ethernet conectado internamente, este se conecta al puerto de red RJ45 con protección IP67 integrado en el nodo. Para la comunicación entre el nodo y el gateway in-situ se usa UART.

**C. Gateway in-situ**

El módulo que va a actuar como gateway in-situ es el Wifi Kit 8. Este es un módulo ESP8266 (Figura 10), que incluye un sistema de administración de batería Li-Po y una pantalla OLED de 0.9. Para establecer la comunicación entre el nodo y el dispositivo móvil, se desarrolló el software que permite procesar las peticiones realizadas y el reenvío de los paquetes hacia la aplicación móvil, mediante el protocolo HTTP.

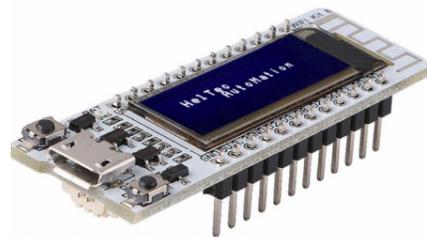


Fig. 10. Módulo Wifi Kit 8

El módulo WiFi es alimentado con una batería Li-Po de 3.7 V, además se integra un cable Ethernet para tener acceso al nodo. Para unirse a la red inalámbrica, se configura el nombre y la contraseña, que son ingresados desde el dispositivo móvil.

**D. Aplicación Móvil**

Con el objetivo de visualizar y decodificar los datos adquiridos y almacenados por el nodo, se implementó una aplicación móvil. La aplicación es nativa para dispositivos con sistema operativo Android, y fue desarrollada en el lenguaje JAVA. La aplicación móvil, permite al usuario buscar los archivos almacenados en memoria (Sección D), mediante dos campos de búsqueda: fecha y tipo de archivo. Si el archivo existe, se visualizan los datos en pantalla. Además se dispone de la función para la descarga del archivo en formato (.csv). El interfaz de la aplicación móvil se muestra en la Figura 11.



Fig. 11. Interfaz de la aplicación móvil.

Adicionalmente, la aplicación tiene la opción de configuración de parámetros, la cual permite cambiar los intervalos de tiempo de cada registro, así como las credenciales de autenticación de ABP de la aplicación del servidor LoRaWAN.

**E. PCB**

El diseño presentado en la Sección B se envió a la manufactura en una empresa local especializada. En la Figura 12 se muestra la vista superior del PCB con los componentes soldados, en tanto que en la Figura 13 se muestra la vista inferior.

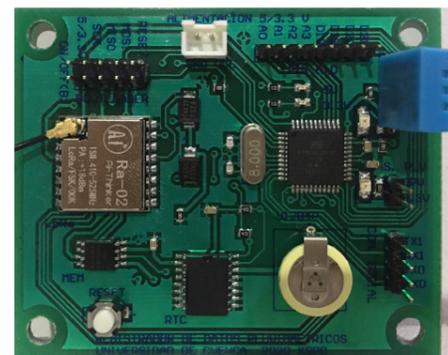


Fig. 12. Aspecto final del PCB con componentes de montaje superficial (vista superior)

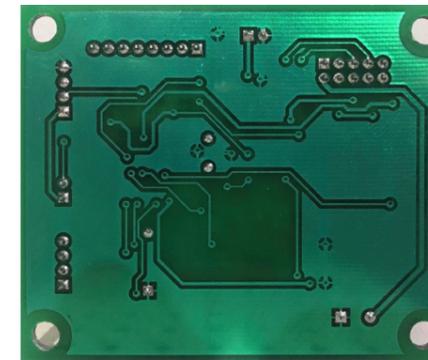


Fig. 13. Aspecto final del PCB con componentes de montaje superficial (vista inferior).

**F. Pruebas de laboratorio**

**a) Transmisión**

Para la transmisión de datos hacia el servidor LoRaWAN se utilizaron los dispositivos: nodo, gateway LoRa y un ordenador (detallados en la Sección C). El nodo transmite los datos hacia al gateway LoRa y este reenvía los paquetes hacia el servidor TTN. Los paquetes del sensor son recibidos cada 5 minutos y los datos del estado del nodo cada 60 minutos. Los datos en recepción son visualizados en la aplicación del servidor LoRaWAN de TTN (Figura 14).

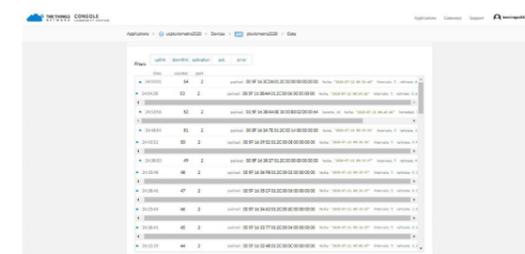


Fig. 14. Visualización de datos en la aplicación del servidor TTN.

El detalle de un paquete con información recolectada por un sensor se muestra en la Figura 15, y la información del estado del nodo se muestra en la Figura 16. En el paquete del sensor se muestran: la fecha, el intervalo de transmisión y la cantidad de lluvia. En el paquete del estado se encuentran los datos de la batería, la fecha y hora, la temperatura y humedad, y el intervalo de transmisión de cada paquete. Adicionalmente, todos los paquetes tienen metadatos con información de la conexión LoRaWAN como: la frecuencia, data rate (DR), coding rate (CR), signal-to-noise ratio (SNR), received signal strength indicator (RSSI) y el tiempo en el que llegó el paquete.

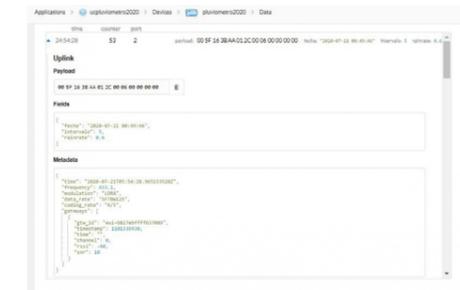


Fig. 15. Visualización de datos recolectados por el sensor en la aplicación del servidor TTN.

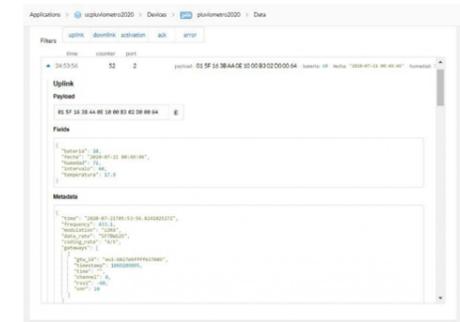


Fig. 16. Visualización de datos del estado del dispositivo en la aplicación del servidor TTN.

**b) Descarga de datos in-situ**

Para descargar los datos guardados en el nodo sensor, se desarrolló una aplicación móvil. Los nombres de los archivos almacenados en el nodo corresponden a la fecha de registro de datos. Cada archivo contiene las muestras registradas del sensor pluviométrico y del estado del dispositivo. La aplicación permite descargar los datos en el dispositivo móvil en formato (.csv). En las Figuras 17a y 17b se muestra un ejemplo de los datos del sensor pluviométrico visualizados en la aplicación móvil y descargados en formato (.csv).

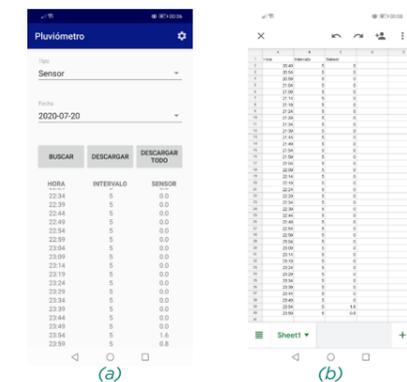


Fig. 17. Visualización de datos del sensor: (a) Datos en la aplicación móvil, (b) Datos almacenados en el dispositivo móvil en un archivo (.csv)

Teniendo un registro de la información con la tasa de muestreo designada a cada paquete: de sensor 5 minutos y de estado del dispositivo 60 minutos (Sección D). Para los datos del sensor se escriben 288 registros diarios de 8 Bytes (2304 Bytes) y para los datos del estado se escriben 24 registros diarios de 9 Bytes (216 Bytes), por lo tanto, el dispositivo escribe 2520 Bytes cada día en la memoria. De esta manera, con la memoria flash de 16 MB de capacidad, y el dispositivo funcionando de forma continua, el periodo de registro de datos es de  $16777216 \text{ Bytes} / 2520 \text{ Bytes} = 6657 \text{ días}$ , o  $6657 / 365 = 18.23 \text{ años}$ .

**c) Configuración de parámetros del dispositivo**

La aplicación móvil además de la descarga de datos, tiene la función de configuración de parámetros. Para verificar el funcionamiento se ingresaron los parámetros de tiempo de muestreo de cada uno de los paquetes y las credenciales para enlazarse a la aplicación del servidor TTN. En la Figura 18 se observa cómo se ingresan los nuevos parámetros en la configuración. Por ejemplo, los paquetes de datos del sensor cada minuto y de estado del nodo cada 3 minutos. Además, de las nuevas credenciales DevAddr, NwkSKey y AppSKey. En la Figura 19, se muestran los datos de prueba que llegaron al servidor usando la configuración de ejemplo.



Fig. 18. Ventana de configuración de parámetros del nodo.

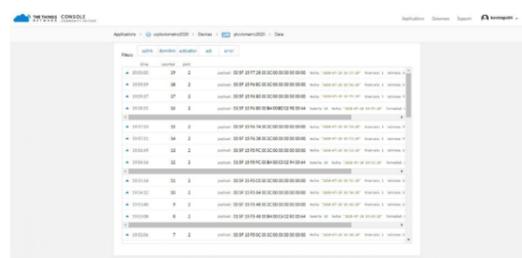


Fig. 19. Verificación de los paquetes de datos en la aplicación del servidor TTN.

**G. Pruebas de consumo energético**

El dispositivo desarrollado está destinado a funcionar en ubicaciones en las que generalmente no se tiene alimentación desde la red eléctrica, por lo que es importante conocer y optimizar su consumo energético. El voltaje de funcionamiento del nodo es de 3.3 V.

El análisis del consumo se realiza utilizando la metodología propuesta por Nguyen [12]. Los tiempos activos por componente (ciclo de trabajo) se utilizan para calcular el consumo total. El período de tiempo del ciclo de trabajo es de 5 minutos. Este tiempo lo establecen los requisitos de las aplicaciones del PROMAS. Durante este período, la información se transmite al centro de datos.

El análisis energético del registrador de datos contempló tres partes: adquisición y control, el sensor, y la transmisión. El proceso de adquisición del sensor de lluvia y el control de los dispositivos permanece activo todo el tiempo. Por lo tanto, el dispositivo involucrado en este proceso tiene un ciclo de trabajo del 100 %. El consumo del sensor de lluvia es de 0.034 mA para el valor máximo medido. La precipitación máxima en el área geográfica de interés, a partir de los datos registrados por el PROMAS, es de 22 mm en una hora (entre los años 2015 y 2017), con este valor el sensor consumiría 0.088 mA [9].

La transmisión por medio del transceptor LoRa está configurado con un factor de dispersión de 7 y un ancho de banda de 125 kHz. El ciclo de trabajo del transceptor es de 0.062 % si se considera un tiempo de transmisión de 186 ms. La Tabla II presenta el consumo promedio de cada componente del registrador de datos y el consumo general, que es de 28.510 mW.

TABLA II. ESTIMACIÓN DEL CONSUMO DE ENERGÍA DEL REGISTRADOR DE DATOS

Dispositivos	Modo	Consumo de Corriente (mA)	Ciclo de Trabajo (%)	Corriente Promedio (mA)	Potencia (mW) $(I \times V)$
Adquisición y Control	Activo	8,624	100,00	8,624	28,459
	Reposo	0,000	0,00		
Sensor	Activo	0,008	1,29	0,001	0,003
	Reposo	0,000	98,71		
Transmisión	Activo	23,896	0,06	0,014	0,048
	Reposo	0,000	99,94		
Consumo de energía promedio general					28,510

En las pruebas de laboratorio realizadas, se usó una fuente de alimentación continua regulable (0-20) V, la cual fue configurada a 3.3 V, voltaje requerido para el funcionamiento del registrador de datos. El consumo de corriente fue medido con un amperímetro conectado en serie entre el pin positivo de la fuente y el pin de entrada (Vin) del registrador de datos. En el proyecto de investigación "Aplicación de tecnologías inalámbricas al sistema de predicción de caudales en la cuenca del río Tomebamba" se usan baterías de ácido sólido de 7200 mAh-12 V. Por lo que en este proyecto

se utilizará el mismo tipo de batería, integrando un controlador de carga a 3.3 V en pruebas de campo. Esta batería contiene una carga mínima del 25 %. Entonces, el tiempo teórico para el próximo ciclo de recarga es  $0.75 \times 7200 \text{ mAh} \times 12 \text{ V} / 28.510 \text{ mW} = 2272.886 \text{ horas} = 94 \text{ días}$ . Este dato es aproximado, puesto que entre la batería y el dispositivo desarrollado hay que usar un convertidor *step-down* que tiene un consumo adicional.

**H. Reseña sobre los costos**

El PROMAS actualmente envía los dispositivos desarrollados a una empresa local para su manufactura. El microcontrolador y el transceptor del prototipo desarrollado tuvo un costo aproximado de \$50, mientras que el dispositivo LoPy4 utilizado en [9] (microcontrolador + transceptor), tiene un costo de \$84 en el mercado local, por lo que el prototipo actual tiene una reducción del costo en estos elementos de un 40 %.

**VI. CONCLUSIONES**

La implementación del protocolo LoRaWAN permitió la transmisión de los datos pluviométricos remotamente en quasi-tiempo real hacia el servidor LoRaWAN The Things Network (TTN). Las pruebas que se realizaron para la transmisión de datos hacia el servidor LoRaWAN fueron satisfactorias. El servidor TTN permitió observar los datos recibidos en su interfaz web.

Los datos pluviométricos fueron adquiridos y descargados correctamente en la aplicación móvil, validando así los requerimientos solicitados por el PROMAS.

Mediante las pruebas de laboratorio realizadas respecto al consumo energético del

registrador de datos se verificó que, el consumo es aproximadamente un 50 % menor al de los dispositivos desarrollados en trabajos anteriores. Esto debido a los cambios realizados en la arquitectura del diseño, su funcionamiento a 3.3 V, y la adaptación de todos los componentes para trabajar a este nivel de tensión.

Finalmente, en el desarrollo del prototipo se obtuvo la reducción de costos, en la manufactura, producción y adquisición de componentes. Por lo que, el PROMAS en el desarrollo de este prototipo a gran escala obtendrá un ahorro de costos significativo en comparación a los dispositivos desarrollados en trabajos anteriores.

**VII. TRABAJOS FUTUROS**

En este proyecto, no se consideró el desarrollo de un controlador de carga, debido a que se tuvo que delimitar el alcance. Por lo que es necesario desarrollar un controlador de carga, para integrar una batería y un panel solar.

El dispositivo fue desarrollado exclusivamente para el PROMAS. Sin embargo,

si este puede ser usado por otras instituciones, debido a que un alto porcentaje de usuarios usan dispositivos móviles con sistema operativo iOS, podría ser necesario implementar una aplicación móvil para dichos dispositivos.

## VIII. REFERENCIAS

- [1] F. Astudillo-Salinas y A. Vazquez-Rodas, «Aplicación de tecnologías inalámbricas al sistema de predicción de caudales en la cuenca del río Tomebamba,» 2016.
- [2] S. Daud, T. S. Yang, M. A. Romli, Z. A. Ahmad, N. Mahrom y R. A. A. Raof, «Performance Evaluation of Low Cost LoRa Modules in IoT Applications,» IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 318, p. 012053, 3 2018.
- [3] L. Vangelista, L. Dell'Anna y P. Palazzzoli, «A battery lifetime comparison between LoraWAN and Wireless MBus smart meters,» de 2019 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom), 2019.
- [4] G. Loubet, A. Takacs, E. Gardner, A. De Luca, F. Udrea y D. Dragomirescu, «LoRaWAN Battery-Free Wireless Sensors Network Designed for Structural Health Monitoring in the Construction Domain,» Sensors, vol. 19, 2019.
- [5] A. Zacepins, J. Jelinskis, A. Kviesis, M. Dzenis, V. Komasilovs y O. Komasilova, «Application of LoRaWAN technology in Precision Beekeeping,» East Sarajevo, Bosnia-Herzegovina, 2018.
- [6] M. T. Buyukkakslar, M. A. Erturk, M. A. Aydin y L. Voller, «LoRaWAN as an e-Health Communication Technology,» de 2017 IEEE 41st Annual Computer Software and Applications Conference (COMPSAC), 2017.
- [7] A. C. Lopez Ochoa, «Diseño e implementación de un registrador de datos para la adquisición de información limnográfica,» 2019.
- [8] M. P. Gutama Morocho y J. J. Vazquez Patino, «Prototipo de un dispositivo de adquisición, almacenamiento y transmisión de datos meteorológicos usando los transductores de la estación DAVIS 6162 Wireless Vantage Pro2 Plus,» 2017.
- [9] S. Placencia, F. Astudillo-Salinas, A. Vazquez-Rodas, I. Minchala y J. Guaman, «Rainfall Intensity Datalogger System. LoPy4-Based Design and Implementation,» 2019.
- [10] M. Kooijman, «Lmic Library».
- [11] P. Seneviratne, «Beginning LoRa Radio Networks with Arduino: Build Long Range,» Low Power Wireless IoT Networks, pp. 12-18, 2019.
- [12] T. Nguyen, «Energy efficient wireless sensor network and low power consumption station design for an urban water level monitoring system,» de 2016 3rd National Foundation for Science and Technology Development Conference on Information and Computer Science (NICS), 2016.

## AUTHORS

### Kevin Piedra Orellana



Recibió el título de tercer nivel en Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador, en 2020. Sus intereses de investigación incluyen codificación de redes, redes de sensores inalámbricos, simulación de redes, rendimiento de redes, ciberseguridad.

### Fabián Astudillo Salinas



Recibió el título de tercer nivel en Ingeniería de Sistemas de la Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador, en 2007, y los grados de MSc. y Ph.D del "Institut National Polytechnique de Toulouse", Toulouse, Francia, en 2009 y 2013, respectivamente. Desde 2013 es Investigador a Tiempo Completo del Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador. Sus intereses de investigación incluyen redes de sensores inalámbricos, redes vehiculares, simulación de redes, ciberseguridad y HPC

## Geovany Lupercio Novillo



Estudió Ingeniería Electrónica en la Universidad Politécnica del Litoral en la ciudad de Guayaquil. En el 2008 Obtuvo su Diplomado en Administración y Telecomunicaciones en la Universidad de Guadalajara Jalisco - México y en el 2009 su Maestría en Administración de las Telecomunicaciones en la Universidad de Guayaquil. Sus intereses de investigación son los efectos de las radiaciones no ionizantes, aplicaciones de tecnologías inalámbricas, y aplicaciones de IoT.

## Andrés Vázquez Rodas

Recibió el grado de Ingeniero Electrónico en el año 2004 de la Universidad Politécnica Salesiana Cuenca - Ecuador, el grado de master en Telemática (con honores) de la Universidad de Cuenca - Ecuador in 2010, y el grado de Ph.D. del Departamento de Ingeniería Telemática de la Universitat Politècnica de Catalunya BarcelonaTech (UPC), España en 2015. Desde el 2015, es profesor a tiempo completo en la Universidad de Cuenca en el Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones (DEET). Sus intereses de investigación incluyen redes inalámbricas malladas, redes inalámbricas de sensores, redes industriales y sistemas complejos.



## Ismael Minchala Ávila



Recibió el grado de Ingeniero Electrónico en la Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador, en 2006, y los grados de M.Sc. y Ph.D. en Ingeniería de Control del Tecnológico de Monterrey, Monterrey, México, en 2011 y 2014, respectivamente. Obtuvo una beca Postdoctoral en el Tecnológico de Monterrey en el grupo de investigación de cambio climático. Es actualmente investigador a tiempo completo en el Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones en la Universidad de Cuenca, Ecuador. Sus intereses de investigación son control tolerante a fallas aplicados a sistemas de energía, automatización y control de procesos.