

SISTEMA DE DETECCIÓN Y CATALOGACIÓN DE FENOMENOS METEOROLÓGICOS DE MAYOR IMPACTO Y RECURRENCIA A PARTIR DEL MONITOREO DE VARIABLES HIDROCLIMATOLÓGICAS EN UNA SUBCUENCA HIDROGRÁFICA DEL MUNICIPIO DE POPAYÁN



Trabajo de grado para optar al título de INGENIERO ELECTRÓNICO

Autores

JUAN MANUEL ESPINOSA RODRIGUEZ
VICTOR MANUEL QUINAYAS MENESES

Director

Msc. JULIO ANDRÉS MOSQUERA BOLAÑOS

Codirector

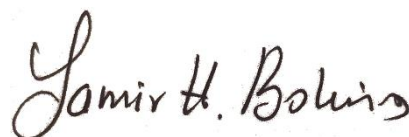
Msc. JULIÁN ANDRÉS CAICEDO MUÑOZ

**CORPORACIÓN UNIVERSITARIA AUTÓNOMA DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
MAYO DE 2021**

NOTA DE ACEPTACIÓN

En cumplimiento de los requisitos legales y reglamentarios, se declara aprobado el trabajo de grado titulado, "**SISTEMA DE DETECCIÓN Y CATALOGACIÓN DE FENOMENOS METEOROLÓGICOS DE MAYOR IMPACTO Y RECURRENCIA, A PARTIR DEL MONITOREO DE VARIABLES HIDRO CLIMATOLÓGICAS EN UNA SUB CUENCA HIDROGRÁFICA DEL MUNICIPIO DE POPAYÁN**" realizado por JUAN MANUEL ESPINOSA RODRIGUEZ y VICTOR MANUEL QUINAYAS MENESES.

Una vez revisado el escrito final y aprobado la sustentación del mismo, se autoriza para que se realice la gestión administrativa correspondiente para optar por el título de: Ingenieros Electrónicos.



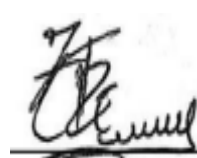
Yamir Hernando Bolaños Muñoz
Jurado



Julio Cesar Vidal Medina
Jurado



Julio Andrés Mosquera Bolaños
Director



Julián Andrés Caicedo Muñoz
Codirector

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, dar gracias a Dios por la vida, por permitir estar con mi familia, por darme salud, sabiduría y permitir culminar con mi trabajo de grado.

A mi familia, amigos, compañeros de estudio, agradecer por brindarme apoyo aun cuando mis ánimos decaían. En especial, quiero hacer mención a mis padres, que siempre estuvieron ahí para darme palabras de apoyo y un abrazo reconfortante para renovar energías.

Agradecer a mis formadores de la Corporación Universitaria Autónoma del Cauca, en especial a mis directores, personas de gran sabiduría quienes se han esforzado para ayudarme a llegar al punto en el que me encuentro.

Victor Manuel Quinayas Meneses

Agradezco a Dios por haberme acompañado en la consecución de este gran logro a pesar de los infortunios que se han presentado, por la sabiduría, y por enseñarme que, con perseverancia, esfuerzo y pasión, puedo lograr todo lo que me proponga.

A toda mi familia y a mi novia por su apoyo incondicional, por su amor, su paciencia y comprensión; porque son ese pilar fundamental en mi vida y además mi motivación.

Por último, quiero agradecer a todos los docentes que con su conocimiento y trayectoria profesional me supieron orientar en esta etapa tan importante de mi vida.

Juan Manuel Espinosa Rodríguez

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	10
1. CAPITULO 1: CONTEXTO GENERAL	12
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	12
1.2. JUSTIFICACIÓN	13
1.3. MARCO REFERENCIAL	15
1.3.1. Marco conceptual	15
1.3.2. Estado actual del conocimiento	18
1.4. OBJETIVOS	21
1.4.1. Objetivo general	21
1.4.2. Objetivos específicos	21
1.5. ESTRUCTURA METODOLÓGICA	21
2. CAPITULO 2: MÓDULO DE MONITOREO REMOTO	25
2.1. COMPONENTE ENERGÉTICO	25
2.1.1. Identificación de los elementos típicos de un sistema fotovoltaico	25
2.1.2. Dimensionamiento energético	26
2.1.3. Bloque Generación energética	26
2.1.4. Bloque Control de carga	27
2.1.5. Bloque Acumulación	32
2.1.6. Bloque Regulación de voltaje	33
2.2. COMPONENTE DE MEDICIÓN	34
2.2.1. Emplazamiento de la estación hidroclimatológica	34
2.2.2. Modelo matemático para la estimación del caudal	38
2.2.3. Bloque Medición	46
2.2.4. Bloque Adquisición Esclavo1	50
2.2.5. Diseño y construcción del prototipo de estación	55
2.2.6. Diagramas de conexión de los componentes del sistema de monitoreo remoto	57
2.3. COMPONENTE DE COMUNICACIÓN	59
2.3.1. Identificación de la tecnología de comunicación	59
2.3.2. Pruebas preliminares en campo	61
2.3.3. Implementación de SigFox en la transmisión de los datos	62
2.3.4. Bloque Medición Esclavo2	64
2.3.5. Bloque Almacenamiento	65
2.3.6. Bloque Adquisición Maestro	65
2.3.7. Bloque Caso1 de transmisión	65
2.3.8. Bloque Caso2 transmisión	66
3. CAPITULO 3: MÓDULO DE PRESENTACIÓN DE DATOS	68
3.1. COMPONENTE DE VISUALIZACIÓN	68
3.1.1. Bloque Recepción y redirección	68
3.1.2. Bloque Interpretación y procesamiento	68
3.1.3. Bloque Almacenamiento	71
3.1.4. Bloque Visualización	74
4. CAPÍTULO 4: MÓDULO DE ANÁLISIS DE DATOS	86
4.1. COMPONENTE DE ANÁLISIS	86
4.1.1. Bloque Construcción del dataset	87
4.1.2. Bloque Procesamiento de datos	92
4.1.3. Bloque Creación de la red	96
4.1.4. Bloque Reconocimiento de patrones	98
4.1.5. Bloque Evaluación e interpretación	99

5.	CAPÍTULO 5: EVALUACIÓN.....	100
5.1.	VALIDACIÓN DEL COMPONENTE DE MEDICIÓN	100
5.1.1.	Calibración de los sensores	100
5.2.	VALIDACIÓN DEL COMPONENTE ENERGÉTICO.....	114
5.3.	VALIDACIÓN DEL COMPONENTE DE COMUNICACIÓN.....	115
5.4.	VALIDACIÓN DEL COMPONENTE DE VISUALIZACIÓN	117
5.4.1.	Validación de la App Móvil	117
5.4.2.	Validación de la aplicación Web	123
5.5.	VALIDACIÓN DEL COMPONENTE DE ANALISIS	126
5.6.	DESPLIEGUE TECNOLÓGICO	129
5.6.1.	Implementación de la estación.....	130
5.6.2.	Verificación de almacenamiento	130
5.6.3.	Verificación de visualización	132
5.6.4.	Verificación de predicción	135
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	137
6.1.	Conclusiones	137
6.2.	Recomendaciones	138
	REFERENCIAS.....	139

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.5.1 Módulos principales de la investigación.....	22
Figura 2.1.1 Estructura del componente energético	25
Figura 2.1.2 Panel solar del sistema energético	26
Figura 2.1.3 Diseño electrónico del controlador de carga PWM.....	27
Figura 2.1.4 Divisor de tensión del controlador de carga PWM.....	29
Figura 2.1.5 Etapas de carga de una batería.....	30
Figura 2.1.6 Lógica del controlador de carga PWM del sistema energético	32
Figura 2.1.7 Batería del sistema energético	33
Figura 2.1.8 Circuito impreso del Regulador y Controlador de carga PWM del sistema energético	34
Figura 2.2.9 Estructura del componente de medición.....	34
Figura 2.2.10 Frontera del casco urbano del municipio de Popayán sobre el Río Molino	35
Figura 2.2.11 Superposición planos de comunas y riesgo por inundación.....	36
Figura 2.2.12 Punto ubicado a 1km desde las primeras urbanizaciones a orillas del Río Molino	36
Figura 2.2.13 Curso bajo, medio y alto del Río Molino	37
Figura 2.2.14 Panorámica del punto de monitoreo La Violeta	38
Figura 2.2.15 Área de la sección transversal del punto de monitoreo La Violeta	40
Figura 2.2.16 Medición de las variables geométricas en la sección trapezoidal del punto de monitoreo La Violeta.....	42
Figura 2.2.17 Aforo en el punto de monitoreo La Violeta.....	43
Figura 2.2.18 Soul One.....	49
Figura 2.2.19 Arduino MEGA 2560 REV3.....	49
Figura 2.2.20 Breakout TST.....	50
Figura 2.2.21 Conexión serial entre Arduino Mega y Breakout	51
Figura 2.2.22 Lógica implementada por el Esclavo1 en la lectura de los sensores	51
Figura 2.2.23 Trama parcial enviada por el Esclavo1	52
Figura 2.2.24 Lógica implementada por el Esclavo1 para la detección y comunicación	54
Figura 2.2.25 Trama de nivel enviada por el Esclavo1 hacia el Sigfox Backend.....	55
Figura 2.2.26 Diseño en 3D del prototipo de estación hidroclimatológica	55
Figura 2.2.27 Caja de protección del prototipo de estación hidroclimatológica	56
Figura 2.2.28 Distribución de los dispositivos al interior de la caja de protección	57
Figura 2.2.29 Montaje de los sensores en el Mástil	57
Figura 2.2.30 Diagrama de conexión del Esclavo1.....	58
Figura 2.2.31 Diagrama de conexión del Maestro	58
Figura 2.2.32 Diagrama de conexión del sistema de alimentación.....	59
Figura 2.3.33 Estructura del componente de comunicación	59
Figura 2.3.34 Verificación de cobertura SigFox en el punto de monitoreo La Violeta	62
Figura 2.3.35 Diagrama modular por bloques del sistema de comunicación	62
Figura 2.3.36 Configuración de Callback en SigFox Backend	64
Figura 2.3.37 Prueba de enlace entre Realtime Database y SigFox Backend	64
Figura 2.3.38 Lógica implementada por el Maestro para el almacenamiento y transmisión	65
Figura 2.3.39 Trama completa enviada por el Maestro hacia el Sigfox Backend	66
Figura 3.1.1 Estructura del componente de visualización.....	68
Figura 3.1.2 Desarrollo en Visual Studio para la fase de interpretación y procesamiento.....	69
Figura 3.1.3 Tablas de la base de datos Realtime Database	72
Figura 3.1.4 Método para escribir en la base de datos desde Node.js.....	72
Figura 3.1.5 Etiquetas de la tabla "MedidasHidroclimatologicas" de la base de datos Realtime Database	73
Figura 3.1.6 Enlace entre el servidor Firebase y la App Móvil	73
Figura 3.1.7 Guía para el desarrollo móvil mediante Android Studio.....	74
Figura 3.1.8 Diagrama navegacional de la App móvil.....	75

Figura 3.1.9 Procesos de la pantalla Inicio	76
Figura 3.1.10 Procesos de la pantalla Históricos	76
Figura 3.1.11 Procesos de la pantalla Probabilidades	77
Figura 3.1.12 Procesos de la pantalla Alarma por nivel	78
Figura 3.1.13 Procesos de la pantalla Intensidad de lluvia y fuerza del viento	78
Figura 3.1.14 Pantallas App Móvil	79
Figura 3.1.15 Pantalla Ajustes	80
Figura 3.1.16 Pantalla Desarrolladores	81
Figura 3.1.17 Diagrama navegacional de la aplicación Web	81
Figura 3.1.18 Sección de conocimiento del riesgo	82
Figura 3.1.19 Sección Variables hidroclimatológicas	83
Figura 3.1.20 Representación gráfica del comportamiento de la temperatura en Campo Real	83
Figura 3.1.21 Tabla “MedidasHidroclimatológicas” vista desde la Página Web	83
Figura 3.1.22 Sección Proyecto	84
Figura 3.1.23 Sección Galería de fotos	84
Figura 3.1.24 Sección Desarrolladores de la investigación	85
Figura 3.1.25 Sección Formulario de contacto	85
Figura 4.1.1 Estructura del componente de análisis	87
Figura 4.1.2 Localización de las estaciones analizadas del IDEAM y Acueducto	88
Figura 4.1.3 Conjuntos de datos recopilados del IDEAM y Acueducto	89
Figura 4.1.4 Eventos geológicos, meteorológicos e hidrológicos ocurridos en Popayán en el periodo 1999-2019	90
Figura 4.1.5 Diagrama de distribución porcentual de los eventos ocurridos en Popayán en el periodo 1999-2019	90
Figura 4.1.6 Terreno, viviendas y personas afectadas por los eventos ocurridos en Popayán en el periodo 1999-2019 ..	91
Figura 4.1.7 Otros sectores afectados por los eventos ocurridos en Popayán en el periodo 1999-2019	91
Figura 4.1.8 Estructura del dataset de entrenamiento y prueba de la Red NNARX	92
Figura 4.1.9 Método de interpolación (1D) para la imputación de datos faltantes mediante	93
Figura 4.1.10 Series de tiempo reconstruidas mediante la técnica de interpolación (1D)	93
Figura 4.1.11 Funciones desarrolladas en Matlab para la limpieza de los datos	94
Figura 4.1.12 Método de escalado MinMax	94
Figura 4.1.13 Función desarrollada en Matlab para el escalado de las variables de entrada	95
Figura 4.1.14 Variables hidroclimatológicas escaladas en el intervalo (0;1)	95
Figura 4.1.15 Creación de la Red NNARX mediante nntool	97
Figura 4.1.16 Arquitectura de la Red NNARX inicial	98
Figura 4.1.17 Entrenamiento del primer caso de prueba de la Red NNARX	99
Figura 5.1.1 Equipo macro gotero	102
Figura 5.1.2 Anemómetro digital unit-t Ut363	103
Figura 5.1.3 Transportador	103
Figura 5.1.4 Etapas para la calibración en campo del sensor de nivel	104
Figura 5.1.5 Diseño 3D de la estación para la prueba de calibración en Campo Real	104
Figura 5.1.6 Instalación de la estación para la prueba de calibración en Campo Real	105
Figura 5.1.7 Conjuntos de datos crudos del Sensor N_05 y MIoT obtenidos en la calibración del sensor de nivel	105
Figura 5.1.8 Reducción de los conjuntos de datos en la calibración del sensor de nivel	106
Figura 5.1.9 Filtración del conjunto de datos del sensor MIoT en la calibración del sensor de nivel	106
Figura 5.1.10 Conjuntos de datos de caudal del Sensor N_05 y MIoT obtenidos en la calibración del sensor de nivel ..	107
Figura 5.1.11 Montaje de prueba para la calibración del pluviómetro	108
Figura 5.1.12 Lógica implementada para el registro de los pulsos en la prueba de calibración del pluviómetro	109
Figura 5.1.13 Registros en la memoria flash durante la prueba de calibración del pluviómetro	109
Figura 5.1.14 Montaje de prueba para la calibración del anemómetro	111
Figura 5.1.15 Lógica implementada para el registro de los pulsos en la prueba de calibración del anemómetro	111
Figura 5.1.16 Curva característica obtenida en la prueba de calibración del anemómetro	112
Figura 5.1.17 Montaje de prueba para la calibración de la veleta	113
Figura 5.2.18 Comportamiento del voltaje de la batería durante la prueba de validación	114
Figura 5.3.19 Datos almacenados en el SigFox Backend y en la Memoria flash durante la semana de prueba en Campo Real	116

Figura 5.4.20 Etapas para la validación de la App móvil	118
Figura 5.4.21 Trama “Soul One” enviada desde Postman.....	118
Figura 5.4.22 Validación de la pantalla Inicio de la App Móvil	120
Figura 5.4.23 Validación de la pantalla Históricos de la App Móvil.....	121
Figura 5.4.24 Validación de las pantallas App móvil.....	122
Figura 5.4.25 Validación de la comunicación de alarmas por la App Móvil	122
Figura 5.4.26 Etapas para la validación de la aplicación Web.....	123
Figura 5.4.27 Validación de la página de Variables hidroclimatológicas del sitio Web.....	123
Figura 5.4.28 Validación de la página de representaciones gráficas del sitio Web	124
Figura 5.4.29 Validación de la información representada en la tabla de Variables hidroclimatológicas del sitio Web	124
Figura 5.4.30 Validación de la información representada en la tabla de Alarmas por nivel del sitio Web	124
Figura 5.4.31 Validación de la información representada en la tabla Intensidad de Lluvia, fuerza del viento del sitio Web	125
Figura 5.4.32 Validación de la información representada en la tabla Probabilidad de ocurrencia del sitio Web.....	125
Figura 5.4.33 Validación de la exportación de las tablas del sitio Web	125
Figura 5.5.34 Comportamiento del MSE de los casos de prueba.....	127
Figura 5.5.35 Arquitectura NNARX del presente estudio.....	127
Figura 5.5.36 Generalización de la red NNARX construida a partir del mejor caso de prueba con la función Sigmoidal para la capa de salida	128
Figura 5.6.37 Diagrama de despliegue tecnológico.....	130
Figura 5.6.38 Implementación de la estación en el punto de monitoreo La Violeta.....	130
Figura 5.6.39 Datos almacenados en la memoria flash durante la prueba de despliegue	131
Figura 5.6.40 Datos obtenidos a un menor intervalo de muestreo durante la prueba de despliegue.....	132
Figura 5.6.41 Contenido de la pantalla Históricos de la aplicación Android durante la prueba de despliegue.....	133
Figura 5.6.42 Contenido de las pantallas Alarma por nivel, Int. Lluvia, Fuerza viento e Inicio en la prueba de despliegue	133
Figura 5.6.43 Contenido de la seccion Gráficas de la Pagina Web en la prueba de despligue	134
Figura 5.6.44 Contenido de las tablas de la base de datos en la prueba de despliegue.....	134
Figura 5.6.45 Predicción del modelo NNARX en la prueba de despliegue.....	135

INDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1.3.1 Niveles de alerta	16
Tabla 1.5.2 Actividades desarrolladas para la implementación del módulo de monitoreo remoto	22
Tabla 1.5.3 Actividades desarrolladas para la implementación del módulo de presentación de datos	23
Tabla 1.5.4 Actividades desarrolladas para la implementación del módulo de análisis de datos	23
Tabla 1.5.5 Actividades desarrolladas para la evaluación de los componentes	24
Tabla 1.5.6 Actividades desarrolladas para el despliegue tecnológico	24
Tabla 2.1.1 Características eléctricas del panel solar	26
Tabla 2.1.2 Características eléctricas del controlador de carga	27
Tabla 2.1.3 Características de la batería del sistema energético	33
Tabla 2.2.4 Área hidráulica de la sección transversal en el punto de monitoreo La Violeta	40
Tabla 2.2.5 Ecuaciones para la estimación del caudal en una sección de área trapezoidal	41
Tabla 2.2.6 Parámetros de relieve del punto de monitoreo La Violeta	41
Tabla 2.2.7 Variables hidráulicas en el punto de monitoreo La Violeta	46
Tabla 2.2.8 Intervalos de muestreo según el estándar ASAE EP505 APR2004	46
Tabla 2.2.9 Dirección del viento en representación decimal	52
Tabla 2.2.10 Niveles de tirante hidráulico máximos y mínimos para el punto de monitoreo La Violeta	53
Tabla 2.2.11 Rangos de niveles de alerta para el punto de monitoreo La Violeta	54
Tabla 2.3.12 Tecnologías de comunicación para soluciones IoT	60
Tabla 3.1.1 Rangos para la verificación de consistencia de las variables	70
Tabla 3.1.2 Rangos para la clasificación de la fuerza del viento	70
Tabla 3.1.3 Clasificación de la lluvia según la intensidad media en una hora	71
Tabla 3.1.4 Programas para el desarrollo de la aplicación Android	74
Tabla 3.1.5 Rangos de probabilidad para el tipo de alerta	77
Tabla 4.1.1 Estaciones del IDEAM y Acueducto para la construcción del dataset de históricos	88
Tabla 4.1.2 Distribución de frecuencias de los eventos ocurridos en Popayán en el periodo 1999-2019	90
Tabla 4.1.3 Sectores afectados por los eventos ocurridos en Popayán en el periodo 1999-2019	91
Tabla 4.1.4 Dataset de entrenamiento y prueba de la red NNARX pre-procesado	96
Tabla 4.1.5 Casos de prueba para la red NNARX	97
Tabla 5.1.1 Estándar ASAE EP505 APR2004 para una estación de monitoreo	100
Tabla 5.1.2 Especificaciones funcionales de la OMM para estaciones meteorológicas automáticas	101
Tabla 5.1.3 Características técnicas del sensor DHT22	102
Tabla 5.1.4 Características técnicas del sensor BMP280	102
Tabla 5.1.5 Medidas de dispersión para la evaluación de los conjuntos de nivel en la calibración del sensor de nivel ...	107
Tabla 5.1.6 Correlación entre los conjuntos de datos de caudal	108
Tabla 5.1.7 Datos obtenidos en la prueba de calibración del anemómetro	111
Tabla 5.1.8 7 Datos obtenidos en la prueba de calibración de la veleta	113
Tabla 5.3.9 Cantidad de mensajes transmitidos y fecha de inicio/parada de la prueba en Campo Real	117
Tabla 5.4.10 Parámetros de ejemplo	119
Tabla 5.4.11 Estimación del caudal para la validación de la App Móvil	120
Tabla 5.5.12 Desempeño de los diferentes casos de prueba en la etapa de entrenamiento y prueba	126
Tabla 5.5.13 Métricas de regresión para evaluar el desempeño de la red NNARX	128
Tabla 5.6.14 Resultados del modelo NNARX en la prueba de despliegue	135

INTRODUCCIÓN

El cambio climático, la variabilidad climática, la influencia antrópica y el grado de vulnerabilidad de la población, son algunos de los agentes responsables de la ocurrencia de eventos catastróficos que cada vez se hacen más recurrentes y severos como es el caso del municipio de Popayán, que desde la historia se ha visto constantemente afectado por fenómenos como “El Niño”, “La Niña” y por eventos hidrometeorológicos, atribuido principalmente por su ubicación en la zona tropical, a sus condiciones hidrológicas, climatológicas, de topografía urbanística y usos del suelo [1]. Por esta razón, las organizaciones de prevención de desastres manifiestan la necesidad de implementar herramientas tecnológicas y promueven el desarrollo de actividades preventivas, que ayuden a mitigar los daños potenciales y a incrementar la capacidad de adaptación de la población vulnerable [2].

La finalidad del presente estudio, además de detectar, es poder estimar la probabilidad de ocurrencia de los eventos de mayor impacto y recurrencia del municipio de Popayán a partir de las observaciones de variables hidroclimatológicas, y que además pueda servir como coadyuvante a un sistema de alertas tempranas en la mitigación del riesgo que representan estos eventos.

A continuación, se describe la estructura de la monografía por capítulos:

Capítulo 1: contiene la información que describe el contexto general sobre el cual se elabora el prototipo, el planteamiento inicial, el marco referencial, objetivos y la estructura metodológica bajo el cual se desarrolló el sistema de detección y catalogación de fenómenos meteorológicos.

Capítulo 2: posteriormente, se presenta toda la información relacionada con la construcción física y lógica del prototipo de estación hidroclimatológica, así como el funcionamiento de cada uno de los elementos que la integran; para ello, se han definido tres componentes principales de un sistema de monitoreo remoto de variables ambientales (i.e. Componente energético, Componente de medición y Componente de comunicación).

Capítulo 3: una vez descrito el proceso de fabricación de la estación, se muestra toda la información relacionada con el tratamiento de los datos comunicados por la estación de monitoreo para la generación de información, así como su almacenamiento y visualización en las aplicaciones Web y Móvil; para ello, se ha definido un componente principal denominado como Componente de visualización.

Capítulo 4: después de disponer en la base de datos de las respectivas series temporales de las variables, se exhibe toda la información relacionada con el sistema de análisis de datos, donde se implementa un modelo predictivo que parte del análisis del vínculo histórico entre las variables interrelacionadas con la generación de los eventos de mayor impacto y recurrencia, y la distribución de estos procesos; para ello, se ha definido un componente principal denominado como Componente de análisis.

Capítulo 5: expone toda la información relacionada con la calibración de los sensores de la estación de monitoreo y con la evaluación de cada uno de los componentes de la investigación, procesos que se realizan a fin de garantizar el correcto funcionamiento del sistema.

Capítulo 6: finalmente, se presenta las recomendaciones para trabajos futuros y conclusiones en la elaboración del prototipo.

1. CAPITULO 1: CONTEXTO GENERAL

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los desastres naturales ocurren en todo el mundo y en cualquier momento, pero sus repercusiones económicas, sociales y ambientales son cada vez más severas, afectando en mayor parte a los países en vías de desarrollo [3]. En el intento de explicar el porqué de la frecuencia de estos alarmantes comportamientos de la naturaleza, se encuentran involucrados dos aspectos importantes, la ausencia de planes robustos de gestión y prevención de desastres, y la influencia antrópica [9]. La influencia antrópica se produce por la gran expansión demográfica y una urbanización masiva en terrenos anegadizos, en áreas costeras vulnerables y cerca de fallas geológicas; desplazamiento de población; industrialización; deforestación e incremento de las actividades agrarias y ganaderas; entre otras; y además es la causa del efecto invernadero incrementado, de la variación de los regímenes de lluvia haciéndolos más severos y recurrentes; dicho de otra manera, la influencia antrópica tiene la capacidad de aumentar la probabilidad de futuros desastres catastróficos y con ello millones de damnificados [4]. A nivel mundial, según la universidad nacional de Colombia para el periodo de 2003 al 2012, se presentaron 6.956 desastres naturales ocasionando 6.043 pedidas humanas [5].

Los desastres naturales tienen la capacidad de generar impactos directo (e.g. víctimas mortales, disminución de la disponibilidad de viviendas e instalaciones de salud y enseñanza, estrés postraumático, escases de alimentos) e indirectos (e.g. reducción de la producción, prestación de servicios, aumento de las tasas de desempleo y subempleo) en los bienes económicos, sociales y ambientales; así como generar efectos secundarios de progresión crónica (e.g. sequías, hambrunas, degradación ambiental, disminución de las reservas monetarias, aumento del déficit del sector público, inflación) [6].

La situación en Colombia no es alentadora, principalmente por la posición estratégica que tiene el territorio nacional, que por ser una zona tropical se ve afectado por la mayoría de las mayores proporciones de energía que el sol le transfiere a la tierra [7]. En consecuencia, la aparición de fenómenos naturales climatológicos conocidos como “El Niño” y “La Niña” se presentan con más intensidad [1].

El fenómeno de “El Niño”, se relaciona con la manifestación del incremento de la temperatura en las aguas del océano pacifico. Por su parte el fenómeno “La Niña”, provoca altas precipitaciones de lluvia y afecta principalmente las regiones costeras del pacifico sudamericano; además en Colombia incrementa las lluvias entre un 40% a 50% por encima de los valores regulares [8]. Por este motivo, Colombia dispone de un plan nacional de riesgos de desastres enfocado al 2025 y además articulado en el marco de acción de Sendai que tiene como objetivo reducir el riesgo de desastre y pérdidas humanas, salud y económicas; por ello fue felicitado y catalogado por la ONU, como el único país de las Américas en disponer de un plan nacional de riesgos de desastres [9].

Según la UNGRD, para el segundo periodo del año 2017 en Colombia, se han presentado 344 eventos de origen climatológico. Al clasificar estos de acuerdo al factor recurrencia se tiene que, las inundaciones se ubican en el primer lugar con un registro de 155 eventos, seguidamente los

movimientos de masa con 93 eventos, avenida torrencial con 82 eventos, granizada y tormenta eléctrica con 10 eventos; de igual manera, al clasificar respecto al nivel de impacto de cada evento en la sociedad (F: familias afectadas, M: pérdidas humanas), las inundaciones ocupan el primer lugar (i.e. M: 2, F: 23.210), seguidamente avenida torrencial (i.e. M: 6, F: 1.099), movimientos de masa (i.e. M:6, F:129) y por ultimo granizada y tormenta eléctrica (i.e. M: 2, F: 2) [10].

A nivel departamental, según datos estadísticos del IDEAM, para el periodo 1999 – 2013 en el Cauca, se han presentado 940 eventos de origen climatológico; clasificando respecto a la recurrencia del evento, se tiene en primer lugar las inundaciones (372), seguidamente vendaval (286), deslizamiento (240), avalancha (22), y otros (20); de igual manera, con respecto al impacto del evento en la sociedad (M: pérdidas humanas, F: familias, Vv: viviendas, v: vías, H: hectáreas afectadas), se tiene en primer lugar las inundaciones (i.e. M: 3, F: 7.000, Vv: 2.751, v: 193, H: 8.104), seguidamente deslizamientos (i.e. M: 12, F: 2.861, Vv: 2.979, v: 25, H: 9.115), vendaval (i.e. M: 2, F: 1.242, Vv: 1.437, v: 5, H: 8.000), y avalancha (i.e. M: 15, F: 449, Vv: 469, v: 2, H: 0) [11].

Teniendo en cuenta los registros presentados en relación con el nivel de recurrencia e impacto del evento de origen climatológico, es clara la necesidad de disponer de medidas para amortiguar los efectos sociales, económicos y ambientales que generan este tipo de desastres naturales, hasta niveles manejables contribuyendo a la adaptabilidad de la población y a los procesos de desarrollo [3].

Generalmente los sistemas de prevención a desastres naturales [12], no disponen de acceso libre y actualización constante de las plataformas digitales de comunicación que garantice información de alta calidad, además de comunicación en tiempo real de los datos; por tal motivo, se hace indispensable encontrar soluciones tecnológicas asequibles, con gran capacidad de cobertura mediante antenas independientes a la red celular, que sean fiables, operen bajo condiciones hostiles, comunicación de forma bidireccional, y mensajería ilimitada; de modo que se pueda dar cumplimiento a los requerimientos técnicos mínimos de comunicación para un sistema de alertas tempranas [2].

Además, resulta clara la necesidad que se tiene de un estudio que incluya un análisis integrado de las variables hidro climatológicas (i.e. nivel, caudal, precipitación, temperatura, humedad relativa, presión atmosférica, velocidad y dirección del viento) que ayude a generar nuevos conocimientos y ayude a través de la exploración construir soluciones innovadoras que permitan determinar la probabilidad de que ocurra algún tipo de fenómeno de origen meteorológico y, además, comuniquen alertas tempranas eficientes de modo que las autoridades de riesgo de desastres puedan anticiparse a los eventos catastróficos y actúen de manera inmediata; de igual manera, es de vital importancia la implementación de plataformas digitales que proporcionen información útil y confiable en materia de desastres.

1.2. JUSTIFICACIÓN

Los fenómenos naturales son parte importante para la formación de lo que hoy se conoce como planeta tierra; sin embargo, estos tienen la capacidad de convertirse en desastres cuando superan un límite de normalidad afectando directa o indirectamente a la población humana y todo lo relacionado con ella [5]. Asimismo, cada vez los desastres naturales se presentan con mayor frecuencia e intensidad lo cual es atribuido, particularmente, a dos factores (i.e. por origen natural y por influencia

antrópica) [4]. que, para el año 2018, a nivel mundial, se registró un número de víctimas mortales de 12.800 y un impacto económico de 140,000 millones de USD, ocasionados por un total de 850 catástrofes naturales donde el 38% fueron por inundaciones [13]. Por consiguiente, es de gran importancia disponer de medidas de preparación que permitan mejorar las respuestas, principalmente, a los impactos del cambio climático y la variabilidad climática.

Por su parte, Colombia es un país con una diversidad climática determinada por su ubicación geográfica; el estado del tiempo en este territorio está influenciado por varios fenómenos que establecen las condiciones de lluvia en condición estacional e intraestacional, es decir, vientos alisios, ciclones tropicales, ondas del este del caribe, entre los principales. De igual manera, se encuentran las condiciones interanuales dentro de las que se destacan los fenómenos enmarcados dentro del ciclo ENOS, el cual se representa en los fenómenos de “La Niña” y “El Niño” [14]. El fenómeno de “La Niña” en Colombia incrementa las lluvias considerablemente, las cuales son la causa de eventos catastróficos (i.e. inundación 35%, vendaval 21%, deslizamiento 27%, creciente súbita 12%, tormenta eléctrica 2%, avenidas torrenciales 1% y granizada 1%) que, para el reporte del 15 de septiembre al 15 de diciembre del 2017 afectaron 195 municipios de 27 departamentos y 17.649 familias, 19 personas fallecidas, 85 personas heridas y 2 desaparecidas. Entre los departamentos más afectados del país se encuentra el Cauca, Antioquia, Caquetá y Chocó [10], algunos de ellos, a su vez, conforman la región del pacífico, la cual es considerada una de las regiones de mayor biodiversidad y pluviosidad del planeta [13]; adicionalmente, desde la historia el Cauca ha sido uno de los departamentos más afectados por el fenómeno de “La Niña”, siendo las zonas del Centro y del Pacífico las más propensas a las altas precipitaciones de lluvias, como resultado, según el gobierno de Colombia desde el año 1999 hasta 2013 se han presentado 1162 desastres de los cuales 372 son inundaciones, 240 son deslizamientos, 22 son avalanchas y 1 por creciente súbita [11]; en particular, el municipio de Popayán se encuentra en zona de alto riesgo, debido a que es atravesado por diez sub cuencas hidrográficas, motivo por el cual los entes de prevención y atención a desastres construyen planes que apoyen la gestión del riesgo de desastres naturales en la población más vulnerable; las sub cuencas hidrográficas con mayor riesgo para la población son las que atraviesan el casco urbano del municipio, principalmente el Río Molino y el Río Ejido [8]. Según el IDEAM, el evento más reciente que se presentó en el Río Molino ocurrió el 25 de diciembre del 2013 por causa de lluvias torrenciales, deterioro ambiental, mal manejo de basuras e invasión de viviendas en zonas protegidas, el cual ocasionó grandes pérdidas económicas [4].

En un esfuerzo por combatir estos fenómenos naturales en el municipio de Popayán, se decide analizar la correlación de las variables hidroclimatológicas (i.e. nivel, caudal, precipitación, temperatura, humedad relativa, presión atmosférica, velocidad y dirección del viento) y su participación en la generación de este tipo de eventos; esto permitiría, en últimas, estimar la probabilidad en la que podrían presentarse nuevamente [15]. En otras palabras, la presente investigación propone desarrollar un sistema que permita monitorear y comunicar el conjunto de variables hidroclimatológicas de una subcuenca hidrográfica, con el ánimo de generar información de utilidad que contribuya con los planes de atención y prevención de desastres naturales, finalmente, representar dicha información por medio de una aplicación Móvil y Web.

1.3. MARCO REFERENCIAL

Para establecer el contexto investigativo del presente estudio, se ha establecido un marco conceptual y un estado actual del conocimiento como elementos científico-tecnológicos que orientan el objeto de estudio de la propuesta.

1.3.1. Marco conceptual

En esta sección se detalla los modelos teóricos, definiciones, argumentos, ideas y características que se han desarrollado en relación a los Sistemas de Alertas Tempranas (SAT, del inglés), sistemas de monitoreo remoto y análisis de datos.

1.3.1.1. Sistema de alertas tempranas

Los SAT, se definen como aquel conjunto de dispositivos, procesos y procedimientos encaminados a generar avisos y advertir a la comunidad en zonas de alto riesgo con anticipación ante un posible acontecimiento, que puede ser un fenómeno natural desencadenado por procesos antrópicos, con la capacidad de causar desastres [2].

Según la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (NOAA, del inglés) [16], un sistema de alertas tempranas completo y eficaz debe comprender 4 componentes principales (i.e. información del riesgo, datos de amenazas y pronósticos, comunicación y respuesta). La presente investigación, dispone de la condición de poder ser integrado posteriormente a un SAT, de esta manera, cumpliendo con la red de monitoreo, divulgación de alertas tempranas por medio de diferentes medios para la presentación de datos.

Un fenómeno natural, hace referencia a los cambios producidos por la naturaleza, esto es: fenómenos hidrológicos (e.g. maremotos, tsunamis), meteorológicos (e.g. huracanes, inundaciones, avenidas torrenciales), geofísicos (e.g terremotos, erupción de volcanes) y biológicos (e.g. epidemias de los animales que afectan la humanidad) [5]. Un fenómeno antrópico, hace referencia aquellas amenazas provocadas por las malas acciones del hombre. Algunos autores distinguen entre las amenazas por contaminación y las directamente referidas a procesos tecnológicos [4].

Los fenómenos naturales tienen la capacidad de convertirse en desastre, cuando superan un límite de normalidad [5]; el SAT tiene como objetivo mitigar o prevenir el desastre más allá de prevenir el fenómeno, mediante la ejecución de medidas de prevención y reducción de riesgos como la difusión de alertas a la comunidad vulnerable [2].

Los estados de alerta corresponden a la evolución de la amenaza y a la inminencia del evento adverso asociado a ella. Los entes técnico científicos realizan el monitoreo y deben informar inmediata y permanentemente a el SNGRD siguiendo el protocolo establecido, y proponer el estado de alerta adecuado. La tabla 1.3.1, corresponde a la clasificación del nivel de alerta, la cual va depender del nivel de amenaza existente en la zona de estudio y es determinada por diferentes colores [17].

Tabla 1.3.1 Niveles de alerta

Fuente: adaptada de [19]

COLOR	SIGNIFICADO
Amarillo	Presencia de un evento (natural o antrópico) que puede afectar el territorio. Hay que monitorear su comportamiento y evolución.
Naranja	Preparación de la emergencia.
Rojo	Atención de la emergencia.

1.3.1.2. Monitoreo remoto

- **Sistema fotovoltaico**

La tecnología solar fotovoltaica [18], consiste en la conversión directa de la radiación del Sol en electricidad. Esta conversión se realiza por medio de un panel solar, unidad básica en la que se produce el efecto fotovoltaico. Además, la tecnología fotovoltaica es adecuada para muchas aplicaciones donde sea prioritario generar electricidad (i.e. zonas no interconectadas), bien sea para satisfacer las insuficiencias energéticas de aquellos que no disponen de la red eléctrica (sistemas fotovoltaicos autónomos) o bien para proporcionar energía a la red eléctrica (sistemas conectados a la red). Los componentes básicos de una instalación fotovoltaica en sistemas autónomos son: generador fotovoltaico (Panel solar), sistema de baterías de acumulación y un controlador regulador de carga [18].

- **Subcuenca hidrográfica**

Una sub cuenca hidrográfica se define como el afluente o río secundario capaz de transportar precipitaciones de lluvia y yacimientos acuíferos captados en todo su tramo de escurrimiento. Su tramo se denomina como cauce o canal natural, y se encuentra dividido en tres partes: curso superior, ubicado en la zona más alta de su relieve, aquí se encuentra su nacimiento y una de sus características es la baja profundidad y gran velocidad de las aguas; Curso medio, el afluente gana masa de agua gracias a el abastecimiento de micro cuencas, su característica más pronunciada recae en el zigzaguo que logra el canal en tramos cerca al curso inferior, también aumenta su profundidad cada vez que se acerca al siguiente curso; Curso inferior, se denota en las partes más bajas de la sub cuenca, en este tramo el caudal del río pierde fuerza y es donde normalmente se encuentran las poblaciones humanas [19].

- **Climatología**

La climatología, se define como la rama encargada del estudio de la localización y distribución espacial de las variables del clima. El clima, se describe como los valores medios y extremos de los elementos climáticos (i.e. temperatura, precipitación, viento, presión, entre otros), que deben ser considerados durante un intervalo de tiempo largo con el fin de asignar de forma eficaz las probabilidades de ocurrencia de los valores inhabituales de los elementos climáticos, que originan la aparición de los distintos fenómenos climáticos de mayor impacto, y más aún si por su magnitud afectan a la sociedad [20].

El conocimiento de la magnitud y frecuencia de los valores extremos de las variables climatológicas tales como precipitación, dirección y velocidad del viento, presión atmosférica, temperatura y humedad relativa; permite detectar fenómenos de mayor impacto y recurrencia, con el fin de prevenir desastres naturales [15].

➤ **Hidrología**

La hidrología, es la rama encargada de estudiar el agua en todos sus aspectos y destinos en la tierra (i.e. ciclo hidrológico). El ciclo hidrológico se ve afectado por factores climáticos, como la altura del territorio, el viento, la radiación solar y la presión que influyen en la humedad del aire; para ello, es necesario conocer el recurso hidrológico que se produce solamente midiendo sistemáticamente las variables hidrológicas (i.e. caudal, nivel), las cuales permiten describir y cuantificar las características presentadas durante la manifestación de fenómenos como precipitación, escorrentía superficial, evaporación, entre otros [21].

● **Internet de las cosas**

Como la próxima evolución de internet lo cambiará todo, incluso a la población misma y la manera en que realizan las actividades más cotidianas. Según *Internet Business Solutions Group* (IBSG, del inglés) de Cisco, se considera internet de las cosas (IoT, del inglés), al periodo de tiempo en el que se conectaron a Internet más objetos que personas, basándose en datos actualmente validos estimaron que para el 2020 se conectaran 50 mil millones de objetos a internet [22]. Las tecnologías como RFID, comunicaciones inalámbricas de corto alcance, localización en tiempo real y redes de sensores son cada vez más generalizadas, lo que hace que el IoT sea una realidad [22].

Este concepto permitirá que internet mejore su capacidad para reunir, investigar, y distribuir datos que pueden convertirse en información y conocimiento. Actualmente, se compone de redes dispersas diferentes cada una con distintos fines (e.g. industria automovilística, edificios comerciales, salud, agricultura), pero a medida que evoluciona IoT ha logrado que estos subsistemas sean interconectados creando sistemas de subsistemas [22]. A medida que la población humana incrementa, se hace imprescindible que las personas se conviertan en guardianes del planeta y sus recursos; además de la búsqueda de una vida más cómoda y saludable; es por ello que IoT se convierte en una herramienta vital que permite por medio de la manipulación de los datos que la humanidad adquiera el conocimiento necesario para progresar [22].

1.3.1.3. Análisis de datos

● **Inteligencia artificial**

En la actualidad, no se tiene una definición contundente sobre que es inteligencia artificial (IA, del inglés), debido a que puede llegar a ser un término muy ambiguo, sin embargo, Rich et. al, en [23] para el año 2009, definen la IA como “*El estudio de cómo hacer que los computadores hagan cosas que por el momento los humanos hacen mejor*”, mientras que, Poole y Mackworth en [24] presentan la IA como “*El campo que estudia la síntesis y el análisis de los agentes computacionales que actúan inteligentemente*”. La IA, básicamente tiene dos enfoques, el primero, enfoque científico, trata de

comprender los principios de la inteligencia debido a que la IA sugiere en gran medida una guía útil para entender el pensamiento humano; el segundo, enfoque aplicado a la ingeniería, es útil para ingenieros de la computación, debido a que se requiere conocer las técnicas de la IA, con el fin de solucionar problemas de la vida real, por consiguiente, lograr alta eficiencia en sus tareas [25].

Algunas de las técnicas más utilizadas en el campo de la IA para el pronóstico de fenómenos y elementos naturales de origen hidro-climatológico (e.g. inundaciones, temperatura, precipitación, sequía), son las Redes Neuronales Artificiales (ANNs), que a través de modelos matemáticos son capaces de emular el funcionamiento del cerebro humano, principalmente el de las neuronas y sus conexiones (i.e. la manera en la que toman las decisiones, razonan y aprenden), para la resolución de distintos tipos de problemas que resultan muy complejos para los métodos convencionales [26].

- **Eventos de mayor impacto y recurrencia**

Un evento de mayor impacto, se describe o sucede cuando la magnitud de las variables meteorológicas, hidrológicas, climatológicas, entre otras, obtienen valores extremos o inhabituales durante un periodo corto o largo de tiempo, lo que provoca que el fenómeno natural se convierta en desastre, afectando directa e indirectamente a la población vulnerable. El termino recurrencia, hace referencia a conocer con qué frecuencia se están presentado los fenómenos naturales, y así determinar la vulnerabilidad de la población ante estos fenómenos, de tal forma, poder encontrar planes de prevención y mitigación [15].

1.3.1.4. Normatividad para la implementación de estaciones meteorológicas

Las estaciones hidro climatológicas automáticas deben registrarse bajo parámetros y normas técnicas de funcionamiento determinadas por el IDEAM [27], con el fin de garantizar la calidad, disponibilidad, mínimo error en la medida y transmisión de los datos. De igual manera, la instalación y puesta en marcha de la misma, se debe realizar dando cumplimiento a la normativa ambiental vigente [28], con el fin de evitar la generación de desperdicios o sobrantes que puedan generar contaminación o emisión de residuos nocivos o peligrosos al suelo, agua o aire.

1.3.2. Estado actual del conocimiento

Esta sección sirve como referencia para asumir una postura crítica frente a lo que se ha hecho y lo que falta por hacer en torno a los ejes temáticos (i.e. SAT, monitoreo remoto y análisis de datos), para evitar duplicar esfuerzos o repetir lo que ya se ha dicho y, además, para localizar errores que ya fueron superados.

1.3.2.1. Sistema de alertas tempranas

Este sistema [29], desarrollado en el año 2013 por J. Pérez, y denominado “**Sistema de alertas agroclimáticas tempranas (SAAT) participativas con organizaciones y familias de custodios indígenas y campesinos de la cuenca alta del río cauca**”, tiene como eje principal de toda su estructura, la participación de la comunidad representada en las organizaciones campesinas y como fin, apoyar al fortalecimiento de capacidades para prevenir los riesgos agroclimáticos a partir de la

generación de conocimiento cultural, institucional y participativo. Como resultado, las comunidades locales conocen el clima, investigan sobre los indicadores biológicos y planifican sus sistemas productivos. La evaluación de las predicciones climáticas internacionales se realiza con base en la información de la NOAA. Para la evaluación de las predicciones climáticas nacionales y regionales se recurre a los pronósticos trimestrales del IDEAM. Por último, tiene en cuenta los indicadores biológicos a nivel comunitario, incluido el conocimiento ancestral de las comunidades indígenas y campesinas. Presenta una información desactualizada en la página web, lo cual genera desconfianza.

Para el año 2017, los autores W. Quintero, C. Robles, et. al, desarrollaron un sistema [30], denominado **“Sistema de Información para Detección de Crecientes Súbitas en la Cuenca del Río Manzanares en Santa Marta, Colombia”** que tiene como objetivo ser parte de un SAT, contribuyendo en el procesamiento de datos de equipos para el monitoreo de variables como humedad del suelo, precipitación, y nivel del agua; con el fin de detectar crecientes súbitas y emitir tres tipos de alerta, amarilla, naranja y roja. La comunicación está basada en la red GSM o 3G dependiendo de la disponibilidad del proveedor, además, para el desarrollo tecnológico se utilizó *Java Enterprise Edition* en conjunto con interfaces de programación como Google Maps, Google Cloud Messaging, Google Play Services y una base de datos para almacenar la información. Por último, se desarrolló una aplicación móvil SIPNAT, con el fin de recibir alertas y conocer los datos que se encuentran en la base de datos del servidor.

1.3.2.2. Monitoreo remoto

Esta investigación [31], desarrollada por A. Pinto, G. Espitia, et. al, en el año 2016, denominada **“Diseño de una red de sensores inalámbricos para la monitorización de inundaciones repentinas en la ciudad de Barranquilla, Colombia”**, muestra el diseño de una arquitectura de red de sensores inalámbricos para monitorear en tiempo real parámetros atmosféricos que influyen en la detección de nivel de peligrosidad de inundaciones repentinas o arroyos que son producto de las intensas lluvias en un breve periodo de tiempo. El diseño de la red se hizo por medio de un estudio de sitio site survey para obtener los datos. Además, se prueba la plataforma Waspote y los módulos XBee-PRO ZB (S2) como herramienta para la WSN. Se ha desarrollado una aplicación web móvil, basado en un listado de requerimientos que muestra en tiempo real, sobre un mapa de las calles de la ciudad el nivel de peligrosidad del arroyo en diferentes puntos de su trayectoria. Por último, el sistema es de utilidad para la toma de decisiones preventivas por parte del usuario final.

Por otra parte, en el año 2013, J. Ramírez, J. Buitrago, et. al, desarrollaron la investigación [32] denominada **“Red de sensores de larga distancia usando ZigBee para el monitoreo y la gestión del riesgo en el departamento del Quindío, Colombia”** que trata del diseño de una red de sensores de bajo costo para el monitoreo de variables hidro climatológicas (i.e. presión atmosférica, humedad del ambiente, temperatura, velocidad y dirección del viento, precipitación) basado en tecnología de comunicación ZigBee que permite transmisión a distancias de hasta 8 km; además, dispone de una plataforma tecnológica altamente flexible como una alternativa de menor costo para la instrumentación de las variables hidro climatológicas y la investigación y desarrollo en temas como redes de sensores inalámbricos, GIS, sistemas embebidos (Waspote) en tiempo real y la integración de estas tecnologías en la solución de problemas reales de alta pertinencia para la sociedad Quindiana; además, permite la fácil expansión y mantenimiento de la red, por medio de los módulos Waspote,

que pueden ser reprogramados de manera remota empleando el protocolo OTA, disminuyendo los costes. Para el monitoreo de las variables se implementa la placa de agricultura.

En relación a modelos utilizados para la estimación de variables como caudal, L. Cea, E. Bladé, en el año 2009, desarrollaron la investigación [32] denominada **“Modelización matemática en lecho fijo del flujo en ríos. Modelos 1D y 2D en régimen permanente y variable”**, la cual tiene como fin, la estimación de variables hidráulicas a partir de modelos matemáticos e hidráulicos implementados con valores obtenidos por estudios geomorfológicos y atmosféricos del sitio de estudio. Su metodología se basa en comprender los respectivos hidrogramas de las zonas de estudio, para luego aplicar modelos unidimensionales en laboratorios hidráulicos, con base a esto, lograr tener un punto de inicio en el comportamiento del flujo en una zona natural.

1.3.2.3. Análisis de datos

Los modelos de pronóstico hidrometeorológico, tradicionalmente han implementado técnicas de predicción lineales (e.g. técnicas de Regresión Múltiple Lineal (RML) y múltiple no lineal (RMNL)), que resultan ser eficientes en casos donde el comportamiento del fenómeno es lineal; sin embargo, los fenómenos naturales como las inundaciones presentan un comportamiento altamente no lineal, haciendo imposible su representación a través de estos métodos convencionales y más aún cuando las cuencas hidrográficas no han sido lo suficientemente caracterizadas (i.e. sitios no calibrados) [33]. Otras de las limitaciones que se han presentado en el campo de la predicción ha sido por la desactualización de los datos debido a que las cuencas presentan un cambio continuo provocado por causas naturales o antrópicas (e.g. cambio climático); por la complejidad en la calibración de los mismos modelos necesitando de herramientas de optimización robustas [34]; y por la alta volatilidad de los elementos hidráulicos (e.g. lámina de flujo), lo que genera la acumulación de errores, requiriendo de ecuaciones diferenciales parciales de solución compleja y costosa para los problemas no lineales, aún con el uso de las más modernas herramientas computacionales [32].

Estos problemas han llevado a la exploración de otros modelos predictivos que proporcionen mejor precisión y confiabilidad, orientados al manejo de grandes cantidades de datos; como resultado, se han diseñado modelos basados en Inteligencia Artificial, sencillos o combinados con otras técnicas de aprendizaje automático (Machine Learning), con la capacidad de aprender y adaptarse a los comportamientos hidrometeorológicos del sitio de estudio, permitiendo manejar grandes cantidades de datos ruidosos de sistemas lineales y no lineales (i.e. emulan el comportamiento no lineal del fenómeno); que en las últimas décadas han ganado popularidad demostrando ser altamente eficientes en la precisión de la predicción (i.e. resultados cercanos a los datos reales) de eventos futuros empleando menos tiempos de cálculo especialmente en sitios que no han sido calibrados [35] y [36].

Reiteradamente, estudios basados en el pronóstico de eventos hidro-climatológicos como [37] y [38] han demostrado el alto desempeño que presentan las diferentes técnicas de IA en términos de precisión y velocidad de respuesta, de igual manera han demostrado la importancia que tiene la correcta interpretación no solo del resultado, sino del cómo y porqué se genera dicho fenómeno. Algunas de las técnicas más utilizadas en el campo de la IA para el pronóstico de fenómenos y elementos naturales de origen hidro-climatológico (e.g. inundaciones, temperatura, precipitación, sequía), son las Redes Neuronales Artificiales (ANNs), que a través de modelos matemáticos son

capaces de emular el funcionamiento del cerebro humano, principalmente el de las neuronas y sus conexiones (i.e. la manera en la que toman las decisiones, razonan y aprenden), para la resolución de distintos tipos de problemas que resultan muy complejos para los métodos convencionales [26]. En los últimos años, se ha masificado el uso de las ANNs por diversas razones, entre ellas: sencilla implementación, alta flexibilidad para la adaptación y el aprendizaje "socrático" (i.e. a través de ejemplos), distribución paralela, su capacidad de modelar sistemas dinámicos en tiempo real y además permiten hallar una relación entre las entradas y salidas de la red cuando no se conoce la naturaleza exacta de la misma [39].

Lapdes y Farber en [40], al igual que Johannet et al. en [41] se enfocaron en encontrar características que le permitieran a las ANNs proporcionar una respuesta más precisa por parte del sistema, ambos estudios recomiendan utilizar capas ocultas adicionales; además, Lapdes y Farber en el mismo libro, también afirman que dos capas son suficientes para resolver la mayoría de los problemas, debido a que la precisión de la aproximación está determinada por el número de neuronas por capa mas no por el número de capas, esta declaración también fue realizada por J. Denker et al. en [42] y Flood y Kartam en [43].

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo general

- Desarrollar un prototipo de detección y catalogación de fenómenos meteorológicos de mayor impacto y recurrencia, a partir del monitoreo de variables hidro climatológicas en la sub cuenca "Rio Molino" del municipio de Popayán.

1.4.2. Objetivos específicos

- Desarrollar un sistema de medición de variables hidro climatológicas (i.e. nivel, caudal, precipitación, temperatura, humedad relativa, presión atmosférica, velocidad y dirección del viento), con una frecuencia de muestreo que se ajuste a los requerimientos del estudio.
- Implementar una arquitectura de comunicación basada en el concepto de IoT, para la transmisión de datos que serán visualizados mediante los aplicativos web y móvil, con una frecuencia de transmisión que se ajuste a los requerimientos técnicos del estudio.
- Desarrollar un mecanismo de detección, registro y clasificación del tipo de fenómeno meteorológico y del nivel de alerta.
- Evaluar el desempeño del sistema a partir de la validación del mecanismo de detección, registro y clasificación, y el cumplimiento en la generación y difusión de las alertas; de acuerdo a parámetros establecidos por institutos competentes.

1.5. ESTRUCTURA METODOLÓGICA

Para el desarrollo de la propuesta de investigación se establecieron tres módulos principales (i.e. Módulo de monitoreo remoto, módulo de presentación de datos y módulo de análisis de datos), cada uno de estos módulos contienen los componentes de desarrollo los cuales responden a los objetivos

específicos planteados en el contexto general. La integración total de los tres módulos anteriores, diagrama modular de la figura 1.5.1, permitirá, en definitiva, la consecución del objetivo general planteado en el contexto general.

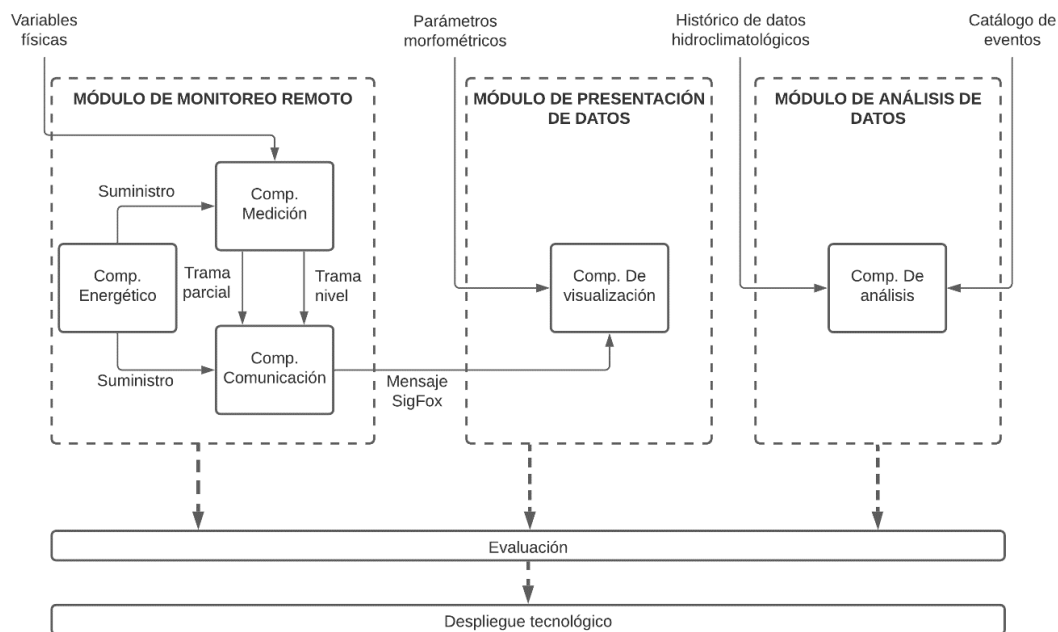


Figura 1.5.1 Módulos principales de la investigación
Fuente: Propia

Del mismo modo, para la implementación del Módulo de monitoreo remoto (i.e. Capítulo 2) se han desarrollado una serie de actividades que están encaminadas a la elaboración y construcción del prototipo de estación de monitoreo de variables hidroclimatológicas, en la cual se llevan a cabo tres procesos (i.e. Medición, almacenamiento y transmisión); además, toda la estación es alimentada por medio de un sistema fotovoltaico. En la tabla 1.5.2, se plantean las actividades desarrolladas para cada uno de los componentes del presente módulo.

Tabla 1.5.2 Actividades desarrolladas para la implementación del módulo de monitoreo remoto
Fuente: Propia

ID	ACTIVIDADES
A	COMPONENTE ENERGÉTICO
A1	Identificar los elementos típicos de un sistema fotovoltaico para la alimentación de cargas en corriente directa
A2	Realizar el dimensionamiento energético del sistema fotovoltaico que permita cumplir con los requerimientos técnicos del caso de estudio
A3	Construcción de un dispositivo de control y regulación de energía para la estación
A4	Definir la lógica implementada por el dispositivo de control en el proceso de carga de la batería
B	COMPONENTE DE MEDICIÓN
B1	Determinar el punto de emplazamiento de la estación acorde a las buenas prácticas recomendadas por el IDEAM
B2	Describir e implementar el modelo matemático para la estimación del caudal
B3	Establecer los intervalos de muestreo de cada una de las variables en conformidad con lo establecido con organizaciones nacionales o internacionales
B4	Determinar los dispositivos necesarios en el sistema de monitoreo remoto, que se ajusten a los requerimientos técnicos del caso de estudio

B5	Definir la lógica implementada en las etapas de lectura, detección y comunicación del sistema de monitoreo remoto.
B6	Diseño, montaje y conexión física de los elementos que componen el prototipo de estación hidroclimatológica
C	COMPONENTE DE COMUNICACIÓN
C1	Determinar la tecnología de comunicación que mejor se ajuste a las condiciones ambientales y requerimientos técnicos del caso de estudio
C2	Implementar la arquitectura de comunicación establecida por la tecnología, para la transmisión de los datos
C3	Definir la lógica implementada en la etapa de almacenamiento y transmisión

Para la implementación del módulo de presentación de datos (i.e. Capítulo 3), de igual manera se han desarrollado una serie de actividades que están encaminadas al tratamiento y representación de la información transmitida, a fin de que los usuarios puedan ver e interactuar con dicha información; durante esta etapa se llevan a cabo cuatro procesos (i.e. Recepción, interpretación, almacenamiento y visualización), unos del lado del cliente y otros del lado del servidor. En la tabla 1.5.3, se plantean las actividades desarrolladas para cada uno de los componentes del presente módulo.

Tabla 1.5.3 Actividades desarrolladas para la implementación del módulo de presentación de datos

Fuente: Propia

ID	ACTIVIDADES
D	COMPONENTE DE VISUALIZACIÓN
D1	Interpretar y procesar los mensajes transmitidos desde la estación hidroclimatológica
D2	Almacenar la información en la base de datos
D3	Desarrollar los aplicativos Web y Móvil con base a los requerimientos técnicos del caso de estudio

Para la implementación del módulo de análisis de datos (i.e. Capítulo 4) se desarrollaron una serie de actividades que están encaminadas al pronóstico de eventos de mayor impacto y recurrencia a partir de la información histórica de las variables hidroclimatológicas de acuerdo al principio de uniformidad, es decir que, para el área estudiada, los eventos ocurrirán, en promedio, bajo las mismas circunstancias y debido a las mismas condiciones en las que fueron desencadenados en el pasado; durante esta etapa se llevan a cabo seis procesos (i.e. Construcción, preprocesamiento, creación, reconocimiento, evaluación e interpretación). En la tabla 1.5.4, se plantean las actividades desarrolladas para cada uno de los componentes del presente módulo.

Tabla 1.5.4 Actividades desarrolladas para la implementación del módulo de análisis de datos

Fuente: Propia

ID	ACTIVIDADES
E	COMPONENTE DE ANÁLISIS
E1	Identificar el algoritmo de predicción más adecuado para el presente estudio, que permita estimar la probabilidad temporal en la que algún evento meteorológico podría ocurrir nuevamente en un tiempo determinado
E2	Construir el dataset que contiene los datos históricos de estaciones hidrometeorológicas y los eventos de mayor impacto y recurrencia, los cuales deben estar organizados cronológicamente
E3	Identificar y desarrollar cada etapa del modelo predictivo en su fase de entrenamiento y prueba

Para la evaluación de cada uno de los componentes del sistema (i.e. Capítulo 5), se desarrollaron una serie de actividades que están encaminadas a comprobar si lo planteado en cada componente produce el efecto esperado; en la tabla 1.5.5, se describen dichas actividades.

Tabla 1.5.5 Actividades desarrolladas para la evaluación de los componentes

Fuente: Propia

ID	ACTIVIDADES
F	EVALUACIÓN
F1	Calibrar los sensores de la estación con respecto a patrones de referencia
F2	Verificar la capacidad de recarga de la batería por parte del sistema fotovoltaico
F3	Validar la totalidad e integridad de los datos en el proceso de comunicación
F4	Verificar la información generada en las aplicaciones Web y Móvil
F5	Verificar la comunicación de las alarmas
F6	Validar los resultados del modelo predictivo

Por último, en la fase de despliegue tecnológico (i.e. Sección 5.6) se muestra el funcionamiento del sistema en condiciones reales; para ello, se plantearon una serie de actividades descritas en la tabla 1.5.6.

Tabla 1.5.6 Actividades desarrolladas para el despliegue tecnológico

Fuente: Propia

ID	ACTIVIDADES
G	DESPLIEGUE TECNOLÓGICO
G1	Realizar el emplazamiento de la estación en el punto de monitoreo
G2	Monitorear las variables hidroclimatológicas durante cuatro días consecutivos
G3	Verificar la información almacenada en la memoria flash de la estación
G4	Verificar la información visualizada en las aplicaciones Web y Android
G5	Verificar los resultados del modelo predictivo

En síntesis, en este capítulo se abordó el contexto general del presente estudio (i.e. problemática, justificación, objetivos y metodología), con el fin de comprender el desarrollo de la investigación. Posteriormente, el siguiente capítulo está encaminado a explicar el monitoreo de las variables hidroclimatológicas, además del suministro energético de la estación y la comunicación de los datos.

2. CAPITULO 2: MÓDULO DE MONITOREO REMOTO

Este capítulo presenta toda la información relacionada con la construcción física y lógica del prototipo de estación hidroclimatológica, así como el funcionamiento de cada uno de los elementos que la integran; para ello, se han definido tres componentes principales de un sistema de monitoreo remoto de variables ambientales (i.e. Componente energético, Componente de medición y Componente de comunicación) de acuerdo con lo establecido por el IDEAM en [44] y L. María en [45].

2.1. COMPONENTE ENERGÉTICO

Los problemas de calentamiento global y el agotamiento de los recursos naturales, han generado la necesidad de implementar fuentes de energía renovables no convencionales y amigables con el medio ambiente como la energía solar fotovoltaica, que ha sido, por mucho, la manera más adecuada de cubrir la demanda energética de aplicaciones en ubicaciones remotas, de difícil acceso y en zonas no interconectadas (ZNI), como las estaciones hidrometeorológicas [18]. La figura 2.1.1, presenta los bloques definidos para el desarrollo del componente energético.

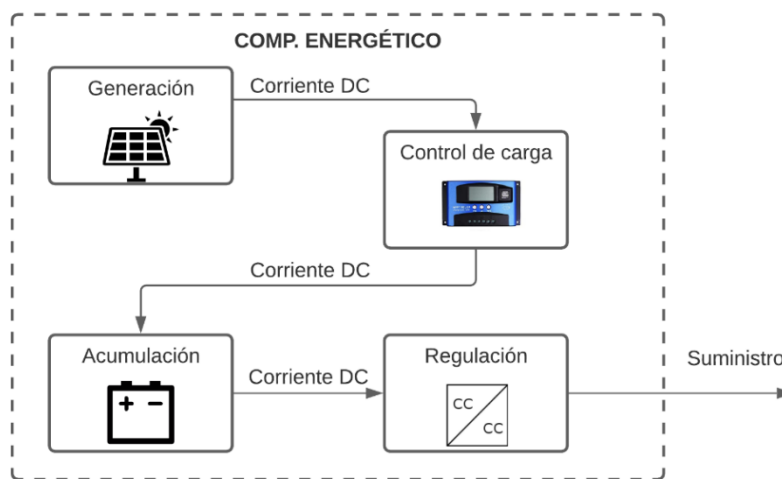


Figura 2.1.1 Estructura del componente energético

Fuente: Propia

2.1.1. Identificación de los elementos típicos de un sistema fotovoltaico

Dependiendo de la finalidad de la aplicación, generalmente existen tres tipos de instalaciones fotovoltaicas a saber, la instalación aislada de la red (i.e. Off-Grid), la instalación conectada a la red (i.e. On-Grid) y la instalación híbrida (i.e. Off-Grid-On-Grid) [18]. De acuerdo con lo anterior, y teniendo en cuenta que la estación estará ubicada en una zona no interconectada y que las cargas a alimentar serán únicamente en corriente directa (DC, del inglés), se decide implementar una instalación Off-Grid, la cual consta básicamente de un generador fotovoltaico, un controlador de carga y un acumulador eléctrico, tal como se indica en el diagrama de la figura 2.1.1; de igual manera, es necesario emplear un sistema de regulación, debido a que las cargas se deben alimentar a un voltaje específico.

2.1.2. Dimensionamiento energético

El primer paso que se debe realizar antes de implementar un sistema fotovoltaico, es calcular las capacidades eléctricas de los elementos principales (i.e. Panel, controlador de carga, batería) a fin de garantizar que el sistema cumpla con la demanda energética el tiempo necesario; para ello se deben desarrollar una serie de ecuaciones establecidas por las Normas Técnicas Colombianas para la energía solar (i.e. NTC 1736 y NTC 2775). Este procedimiento se explica en detalle en el Anexo A; en él se encuentran las definiciones, formulas, normas, procedimientos y nomenclaturas, para el cálculo de las capacidades del panel solar, la batería y el controlador de carga.

2.1.3. Bloque Generación energética

De acuerdo a los resultados obtenidos para el panel solar en el Anexo A, se eligió, en el presente estudio, un panel solar policristalino de la empresa Victron, figura 2.1.2; de igual manera, en la tabla 2.1.1, se listan sus respectivas características eléctricas.



Figura 2.1.2 Panel solar del sistema energético

Fuente: Propia

Tabla 2.1.1 Características eléctricas del panel solar

Fuente: Propia

PANEL SOLAR	
Característica	Valor
Potencia máxima	10 W
Voltaje nominal	12 V
Voltaje de máxima potencia (Vmp)	16,3 V
Corriente de máxima potencia (Imp)	0,61 A
Voltaje de circuito abierto (Voc)	20,7 V
Corriente de corto circuito (Isc)	0,68 A
Máxima tensión del sistema	600 V
Eficiencia	15%

2.1.4. Bloque Control de carga

El objetivo principal de un controlador de carga en un sistema fotovoltaico aislado es realizar un proceso óptimo de carga de la batería, permitiendo la carga completa y a la vez evitando la sobrecarga y sobre descarga, procesos que conducen a una pérdida de capacidad y vida útil de la batería.

En el presente estudio, se construye un controlador de carga que utiliza la Modulación por Ancho de Pulsos (PWM, del inglés) mediante un MOSFET que se encuentra conectado en paralelo entre el panel y la batería, para la regulación de energía. Este tipo de controladores limitan la corriente que llega a la batería cuando la tensión está por encima de un valor preestablecido, manteniendo la tensión en un valor de flotación; característica que permite una carga más completa de la batería y un mejor aprovechamiento de la energía solar recolectada por el módulo. La respectiva construcción se debe realizar con base a los resultados obtenidos para el controlador de carga en el Anexo A, donde se establecieron las características descritas en la tabla 2.1.2.

Tabla 2.1.2 Características eléctricas del controlador de carga

Fuente: Propia

CONTROLADOR DE CARGA	
Característica	Valor
Potencia	14,076 W
Corriente de entrada	0,85 A
Corriente de salida	0,089 A
Voltaje de operación	12V
Corriente de carga	0,68 A
Voltaje de sobrecarga	15 V
Voltaje de sobre descarga	11,5 V

En la figura 2.1.3, se observa el diseño electrónico del controlador de carga PWM, junto con sus diferentes etapas de control, protección y sensores de voltaje.

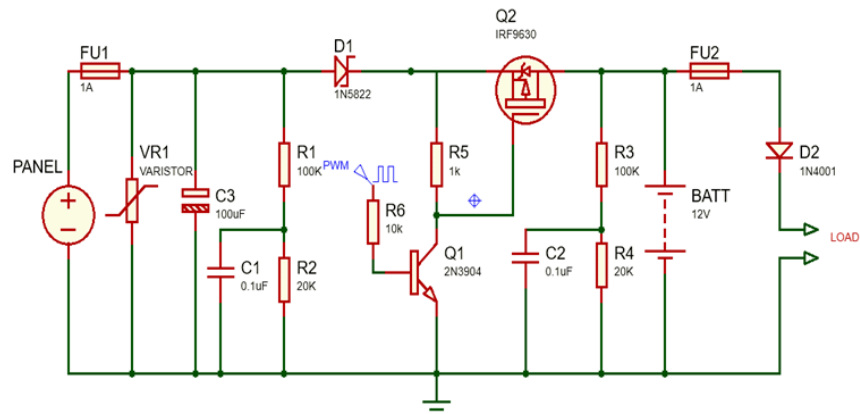


Figura 2.1.3 Diseño electrónico del controlador de carga PWM

Fuente: Propia

Este controlador de carga consta básicamente de dos etapas: la etapa de potencia que consiste en la implementación de transistores de unión bipolar (Bipolar Junction Transistor, BJT) y transistores de

efecto de campo Metal-Óxido-Semiconductor (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor, Mosfet) para amplificar las señales PWM y generar conmutaciones entre las conexiones del panel y la batería; y la etapa de control basada en un microcontrolador programable Atmega2560 que permite leer variables analógicas como voltaje y corriente, y generar señales PWM cuyos ciclos de trabajo se modifican dependiendo del nivel de voltaje instantáneo de la batería.

2.1.4.1. Etapa de potencia

En esta etapa se definen los elementos que se emplearon para la regulación, potencia, y protección en el controlador de carga.

- **Elementos de control y potencia del controlador**

Los dispositivos de regulación pueden ser dispositivos de estado sólido o relés electromecánicos; generalmente se utilizan MOSFET's debido a que tienen un menor consumo, menor tamaño, operan por más tiempo y son ideales para implementar conmutaciones a altas frecuencias ya que no es audible su cambio de estado a alta velocidad alcanzando valores hasta de 30kHz, adecuados a las señales PWM a implementar [46]; estos elementos deben estar dimensionados adecuadamente para cada aplicación, al menos el 125% de la corriente de cortocircuito del panel solar (i.e. Generador fotovoltaico) [18] para evitar su destrucción, como se indica en la ecuación 2.1.1:

$$I_{DCONM} = I_{scP} * 1.25 \quad 2.1.1$$

Donde;

- I_{DCONM} : es la corriente mínima del dispositivo de conmutación.
- I_{scP} : corriente de cortocircuito del panel, tabla 2.1.1.
- 1.25: factor de seguridad.

Al desarrollar la ecuación, se obtiene que,

$$I_{DCONM} = 0.68A * 1.25$$

$$I_{DCONM} = 0.85 A$$

el dispositivo de regulación debe soportar una corriente mínima de 0.85 A. Con base a este resultado, se seleccionó un transistor MOSFET tipo P IRF9630 con voltaje Drine-Source máximo de -100V y corriente de drenado máxima de -13A; de igual manera, el transistor PNP 2N3904 para amplificar el voltaje de la salida digital del microcontrolador (5V) lo cual es necesario para llevar el MOSFET a conducción, de esta manera se obtiene un voltaje mínimo de -6V en VGS para el disparo.

- **Elementos de protección**

El controlador de carga, figura 2.1.3, emplea elementos pasivos (i.e. Diodo Schottky, fusibles y varistor) para la protección del panel, la batería y las cargas, ante fenómenos como corrientes inversas, sobre corrientes y sobretensiones, respectivamente.

2.1.4.2. Etapa de control

En esta etapa se definen los sensores que se emplearon para la lectura de los valores de voltaje de la batería y el panel, los cuales serán empleados en el algoritmo de control para calcular los valores del PWM necesario en cada una de las fases de carga de la batería.

- **Sensor de voltaje**

El Arduino Mega de la estación integra un microcontrolador Atmega 2560 capaz de leer señales analógicas realizando aproximaciones discretas con una resolución de 0 a 1023, por medio de convertidores ADC de 10 bits. Para realizar el control de carga de la batería es necesario conocer su voltaje, sin embargo, este voltaje puede alcanzar valores hasta de 15V que es superior al voltaje máximo de la entrada analógica del microcontrolador (i.e. 5V); para ello se hace uso de un método sencillo conocido como divisor de tensión, indicado en la figura 2.1.4.

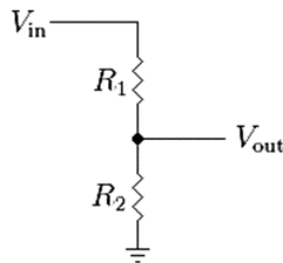


Figura 2.1.4 Divisor de tensión del controlador de carga PWM
Fuente: Propia

El voltaje de salida del divisor se calcula por medio de la ecuación x:

$$V_{out} = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) * V_{in} \quad 2.1.2$$

Donde;

- V_{out} : es el voltaje de salida del divisor.
- V_{in} : es el voltaje de entrada del divisor.

Por medio de la ecuación anterior se obtiene la relación entre las resistencias al despejar la variable R_2 en términos de R_1 ; generalmente se recomienda que sean valores altos con el fin de representar una baja disipación de energía por parte del divisor, también se recomienda utilizar un condensador cerámico en paralelo a la resistencia R_2 con el fin proporcionar una lectura más precisa al microcontrolador; en la figura 2.1.3, se puede observar dicha configuración. Para el cálculo de los valores de las resistencias del divisor de tensión del panel, se debe seguir el mismo procedimiento.

- **Algoritmo de controlador de carga PWM**

La modulación por ancho de pulsos es la técnica que permite regular la cantidad de energía entre el panel y la batería a través del Mosfet del controlador. En Arduino, esta modulación se logra a través de la instrucción `analogWrite(pin, value)` [47]; donde (*pin*) es el pin de Arduino en el cual se desea escribir, y (*value*) es el ciclo de trabajo que va de 0 (siempre apagado) a 255 (siempre encendido). Asimismo, se debe tener en cuenta que las salidas analógicas PWM del Arduino Mega están comprendidas dentro de los rangos de pines digitales D2 a D13 y D44 a D46, y que estas salidas presentan una frecuencia de 490Hz excepto lo pines D4 y D13 que es de 980Hz.

Usualmente, la frecuencia de conmutación del dispositivo de control, que se trata realmente de conectar y desconectar el suministro de energía hacia la batería en la etapa de potencia mediante el Mosfet, es del orden de los kHz; con el fin de obtener un comportamiento de carga idéntico al alimentar la batería con una tensión análoga. Debido a que la frecuencia máxima de las salidas analógicas del Arduino Mega es del orden de los Hz, es necesario incrementar dicha frecuencia; para ello se debe configurar los registros que controlan los Timers asociados a los pines PWM; este proceso se logra implementando la instrucción `TCCR1B = TCCR1B & B11111000 | B00000001` en el Void Setup () del código de control de carga, de esta manera, es posible conmutar el Mosfet a una frecuencia de 62.5 kHz a través de los pines digitales D4 y D13 del Arduino Mega.

Después de haber incrementado la frecuencia de conmutación, es necesario conocer las diferentes etapas de carga de la batería, para, finalmente, definir la lógica que debe implementar el microcontrolador con el fin de determinar los valores de la señal PWM. De acuerdo con estas etapas se modifica el nivel de voltaje al que se debe someter la batería a medida que transcurre el tiempo de carga. Actualmente existen tres etapas de carga para la batería de un SFV: Bulk, Absorción y flotación [48], como se indica en la figura 2.1.5.

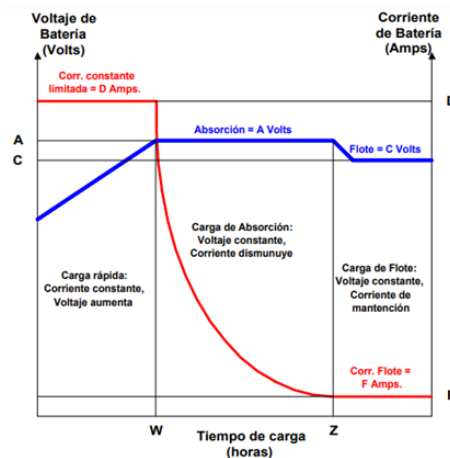


Figura 2.1.5 Etapas de carga de una batería
Fuente: tomado de [48]

Donde;

- Punto "A": es el valor de voltaje máximo (14.4V) mantenido constante por el cargador durante la etapa de absorción.
- Punto "C": es el valor de voltaje mantenido constante por el cargador durante la etapa de flotación.
- Punto "D": es el límite de corriente regulada o el valor de corriente mantenido constante por el cargador durante la etapa Bulk.
- Punto "F": es la corriente de mantenimiento provista por el cargador durante la etapa Bulk.
- Punto "W": es el tiempo transcurrido en el proceso de carga rápida.
- Punto "Z": es el tiempo total transcurrido en la etapa de carga rápida y la etapa de Absorción.

En la etapa Bulk, la batería se encuentra total o parcialmente descargada, es donde se suministra la corriente de carga a intensidad máxima, de manera que el voltaje en la batería aumenta rápidamente hasta llegar al voltaje de la etapa de absorción "A" (valor típico ente 14.2 y 15 V), una vez alcanzado este punto la batería se encuentra entre un 80 a 90% de carga. En esta etapa la corriente de carga se mantiene constante y el voltaje de la batería aumenta gradualmente [48].

En la etapa de absorción, es donde realmente juega un papel importante el controlador debido a que debe mantener el voltaje constante mientras la batería sigue absorbiendo corriente de carga, que irá disminuyendo gradualmente a medida que la batería completa su proceso de carga al 100%; a diferencia de la etapa anterior, aquí el voltaje se mantiene constante mientras que la corriente disminuye, la finalidad de esta etapa es recuperar el electrolito que pudo alterarse en procesos de descarga profunda [48].

Finalmente, en la etapa de flotación, la batería ya se encuentra cargada al 100%, lo que se hace es proporcionar la corriente necesaria para compensar la auto descarga, de manera que permanezca al 100%, se trabaja a potenciales bajos y constantes por el cargador [48].

Con respecto al algoritmo de carga que es desarrollado en el IDE de Arduino, es el método por el cual el cargador restablece la carga de la batería mediante técnicas de control de voltaje y corriente suministrados sistemáticamente; la lógica implementada para el proceso de carga se explica en el diagrama de flujo de la figura 2.1.6.

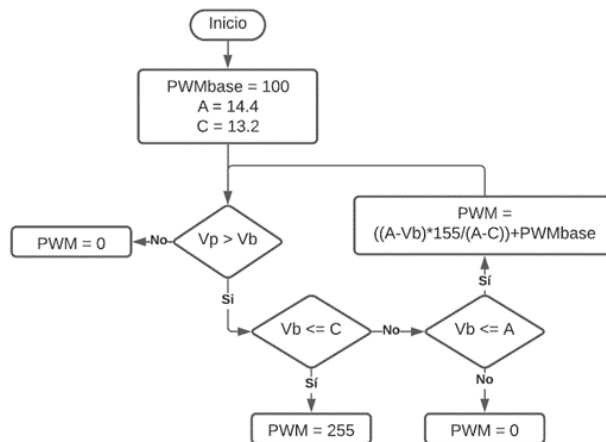


Figura 2.1.6 Lógica del controlador de carga PWM del sistema energético
Fuente: Propia

Donde;

- V_b : es el voltaje de la batería, medido a través del divisor de tensión en la batería.
- V_p : es el voltaje del panel, medido a través del divisor de tensión en el panel.
- PWMbase: es el valor mínimo del PWM, es decir, este valor suministra la corriente necesaria para compensar la autodescarga y el consumo de la estación, y así conservar el nivel de carga de la batería al 100%.

Es un requisito de que el voltaje entregado por el panel deba ser mayor al voltaje en los bornes de la batería en un sistema aislado, es decir, el panel debe proporcionar una potencia inmediatamente mayor para que pueda darse el proceso de recarga. La etapa Bulk se da cuando el voltaje de la batería se encuentra por debajo del punto C, mientras que la etapa de Absorción se da cuando dicho voltaje se encuentra entre el punto C y el punto A.

2.1.5. Bloque Acumulación

La batería, en un sistema fotovoltaico (SFV), se utiliza principalmente como sistema de almacenamiento energético, debido al desplazamiento temporal que puede existir entre los periodos de generación durante el día y los periodos de consumo durante la noche, permitiendo la operación de las cargas cuando el generador FV por sí mismo no puede generar la potencia suficiente para abastecer el consumo [18]. Finalmente, de acuerdo a los resultados obtenidos para la batería en el Anexo A, se elige una batería de plomo ácido tipo gel de 12V y 7.5 Ah, de la empresa Full Battery, figura 2.1.7; de igual manera, en la tabla 2.1.3, se listan sus respectivas características eléctricas.



Figura 2.1.7 Batería del sistema energético

Fuente: Propia

Tabla 2.1.3 Características de la batería del sistema energético

Fuente: Propia

BATERÍA	
Característica	Valor
Capacidad nominal	7.5 Ah
Voltaje nominal	12 V
DOD	50%
Ciclos de vida útil	500
Capacidad 25 °C	20HR
Corriente de carga Max	3,6 A
Corriente de descarga Max	180 A (5s)
Vida flotante	5 años

2.1.6. Bloque Regulación de voltaje

En aplicaciones con voltajes de alimentación definidas como equipos de telemetría, donde el consumo debe trabajar a un voltaje específico dentro de un rango de variación; se suele incorporar convertidores DC/DC o reguladores de tensión para propiciar un voltaje de operación específico requerido por la carga, en caso de que sea menor al suministrado por la batería.

En la figura 2.1.8, se observa el controlador de carga montado en una baquela de 10cm x 10cm; además del controlador, también se implementó un convertidor DC/DC reductor, el cual tiene como función reducir el voltaje de la batería para alimentar dos reguladores de tensión (i.e. LM7805 y LM7806) y así evitar, en gran medida, la disipación de energía en forma de calor por parte de estos; asimismo, los reguladores de tensión se encargan de proporcionar el voltaje preciso requerido por los sensores, las dos placas de desarrollo (i.e. Arduino Mega y Soul One) y el segundo módulo transmisor (i.e. Breakout); estos reguladores funcionan también como protecciones de sobre voltaje.

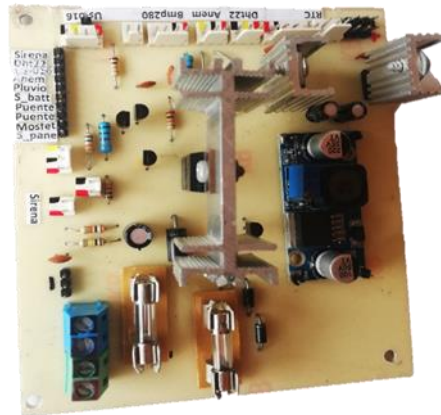


Figura 2.1.8 Circuito impreso del Regulador y Controlador de carga PWM del sistema energético
Fuente: Propia

2.2. COMPONENTE DE MEDICIÓN

Este componente se encarga de la etapa de medición de las variables hidroclimatológicas en el sistema de monitoreo remoto, en él se describen una serie de actividades que parten desde la caracterización del área de estudio para la estimación del caudal y emplazamiento de la estación, hasta el diseño y construcción del prototipo. En el diagrama de la figura 2.2.9, se identifican los elementos del componente de medición y su interconexión, así como las entradas y salidas de cada uno.

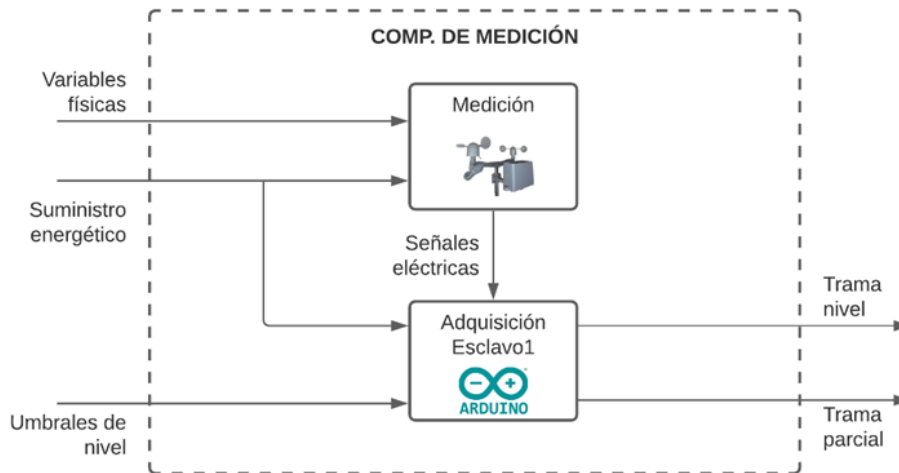


Figura 2.2.9 Estructura del componente de medición
Fuente: Propia

2.2.1. Emplazamiento de la estación hidroclimatológica

Uno de los aspectos más importantes para obtener una información fiable hidrometeorológica es el correcto y funcional emplazamiento de las estaciones; de igual manera, la elección del emplazamiento se encuentra forzado por una serie de criterios que abarcan disciplinas muy diferentes relacionadas

con la geografía, orografía, climatología, de seguridad, de accesibilidad y cobertura de comunicación en el punto de monitoreo. Algunos de los criterios establecidos por el IDEAM en documentos como [49], [50] y [51], para la ubicación de las estaciones hidrológicas y meteorológicas, se describen en detalle en el Anexo B.

La ubicación del punto de monitoreo sobre la subcuenca Río Molino se realiza atendiendo dichos reglamentos técnicos del IDEAM y con base a las consideraciones propias de la investigación, las cuales, para la elección del punto de monitoreo, son las siguientes:

- **Zona de estudio:** Debido que, el municipio de Popayán por sus condiciones geográficas, hidrológicas, de topografía urbanística, climatológicas y usos del suelo, presenta alta vulnerabilidad, generalmente en temporada de lluvia, ante amenazas como flujos torrenciales, movimientos en masa, desbordamientos de los ríos, entre otros; afectando principalmente a barrios normales y subnormales construidos en las riberas de los ríos y quebradas que atraviesan el casco urbano. En el mapa de la figura 2.2.10, se muestra el límite geográfico del casco urbano del municipio de Popayán sobre el Río Molino, para efectos de localización del sitio de estudio.

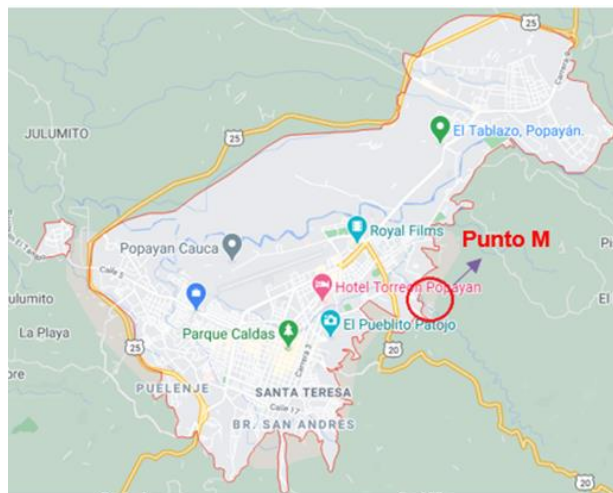


Figura 2.2.10 Frontera del casco urbano del municipio de Popayán sobre el Río Molino
Fuente: adaptada de Google Maps

- **Zonas de susceptibilidad alta:** según L. Villaquirán en [4] al cruzar las zonas de susceptibilidad de inundación y de vulnerabilidad, se demuestra que el riesgo está presente a lo largo de la subcuenca Río Molino; de igual manera, describe que los sectores con menores capacidades para hacer frente a eventos como las inundaciones por motivos de gran densidad de población y desconocimiento del riesgo, se encuentran ubicados en las inmediaciones del Río Molino en su llegada al municipio (Salida hacia el departamento del Huila). Con base a esto, sobre las comunas 3 y 4, figura 2.2.11, existe una amenaza latente y permanente, de inundaciones provocadas básicamente en este sector por avalanchas que se originan en el curso alto del río, por los movimientos en masa sobre su cauce; además, es importante resaltar que, en estas zonas, se encuentran equipamientos importantes urbanos como

colegios, universidades, instituciones bancarias y gubernamentales, espacios deportivos, y principalmente la zona hospitalaria más grande de la ciudad.

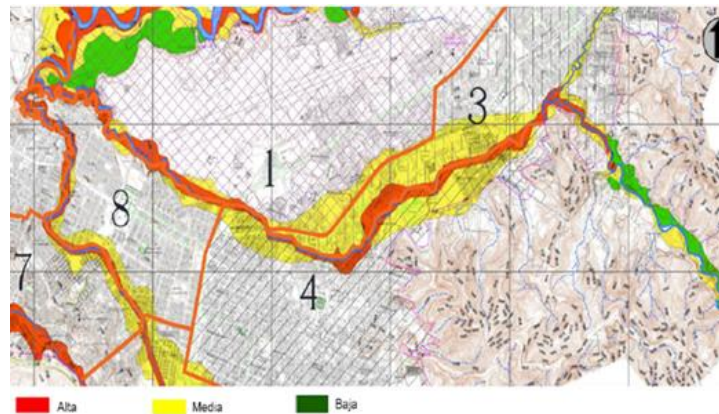


Figura 2.2.11 Superposición planos de comunas y riesgo por inundación
Fuente: tomado de [4]

- **Tiempo de respuesta ante emergencia:** todo sistema de alerta temprana debe brindar maniobrabilidad a los organismos de socorro (i.e. Defensa civil, cruz roja, cuerpo de bomberos), es decir, debe garantizar el tiempo suficiente para ejecutar los protocolos de evacuación pertinentes en las situaciones de peligro para la comunidad[5]; por ello, el punto de observación debe estar ubicado a una distancia considerada de tal forma que, después de ser detectado el evento por el sistema, el cuerpo de agua tarde el mayor tiempo posible en llegar a la población ubicada en zonas de alto riesgo. En un caso hipotético, si la velocidad del agua fuese aproximadamente de 1m/s (i.e. Alta velocidad), esta tardaría 16.6 minutos en recorrer 1km de distancia. En el mapa de la figura 2.2.10, se indica un punto geográfico (definido como Punto M) ubicado a 1km de longitud desde el punto C (punto de referencia de las primeras urbanizaciones en la ribera del Río Molino en su llegada al municipio), que además coincide con el punto de intercepción del mapa de la figura 2.2.12.



Figura 2.2.12 Punto ubicado a 1km desde las primeras urbanizaciones a orillas del Río Molino
Fuente: adaptada de Google Maps

- **Epicentro de los eventos históricos:** históricamente, los fenómenos naturales que han generado mayor impacto en Popayán han tenido como epicentro el curso medio y alto del Río

Molino, situados en la zona rural del municipio [4]. Por tal motivo, es imperioso que el punto de monitoreo se encuentre ubicado en cualquiera de estos cursos. En el mapa de la figura 2.2.13, se indican los sectores que comprende el curso bajo, medio y alto del Río Molino.

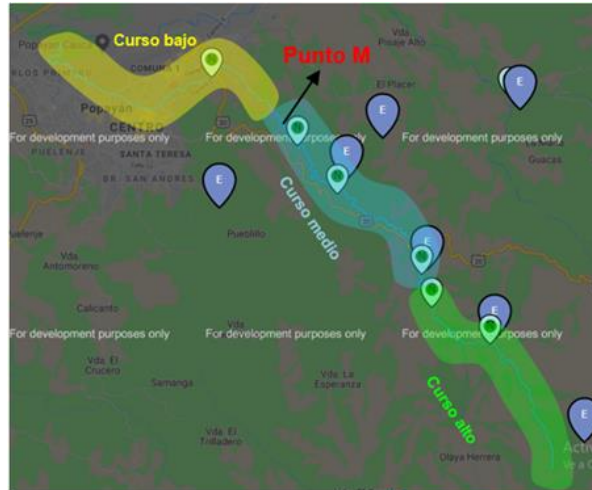


Figura 2.2.13 Curso bajo, medio y alto del Río Molino
Fuente: adaptado de [52]

Como se ha podido observar en cada una de las figuras anteriores, el punto M cumple con cada una de las consideraciones expuestas. El siguiente paso es determinar si en dicho punto geográfico también se cumplen los requerimientos técnicos del IDEAM para el emplazamiento de estaciones hidrometeorológicas; para ello, el reconocimiento en campo fue requerido con el ánimo de verificar el cumplimiento de dichos requerimientos. Los resultados obtenidos en la caracterización de la zona, algunos de ellos por método de observación directa, fueron los siguientes:

- Corresponde a la urbanización La Violeta, de latitud: 2.449004 y longitud: -76.583415.
- Con respecto a la vegetación se observó que la especie predominante pertenece a la familia de las gramíneas (Poaceae).
- Como actividad económica está la extracción de arena a través de métodos artesanales e industriales.
- Presenta una zona despejada de terreno llano, cubierta de hierba baja, con un área aproximadamente de 100m²; lo cual permite además de aprovechar al máximo el recurso solar, realizar la instalación y ubicación de los instrumentos de medida con facilidad.
- Es de fácil acceso, debido a que es posible llegar al sitio mediante cualquier transporte terrestre particular.
- Debido a que se encuentra a una altura entre 1200 y 2000 msnm, se considera de clima templado y de topografía suave, con una temperatura promedio anual variante entre 16 y 20°C, y una precipitación anual entre 2000 y 2300mm.
- No hay viviendas construidas cerca de la ribera del río.

La figura 2.2.14, contiene la panorámica del punto de monitoreo La Violeta, correspondiente al punto geográfico M.



*Figura 2.2.14 Panorámica del punto de monitoreo La Violeta
Fuente: Propia*

A continuación, se describen las características fisiográficas más sobresalientes:

- Presenta un tramo recto de longitud aproximada de 40m.
- Anchura promedio del canal durante el tramo, aproximadamente de 9.4m.
- Canal de orillas paralelas, de perfil longitudinal, sin presencia de pozos o escalones y de pendiente suave típica de llanura.
- Predomina un flujo laminar durante el tramo, sin remolinos ni remansos.
- No hay aprovechamientos de agua como bocatomas o suministros a plantas de tratamientos, en la vecindad.
- No se presenta ningún tipo de afluentes o efluentes, en las cercanías del sitio.
- Tramo de sección transversal tipo trapezoidal.
- Se observaron huellas de avenidas por encima del margen del canal, lo que quiere decir que eventualmente la zona es inundada.
- El tramo se encuentra libre de obstrucciones de flujo como rocas, empalizadas o vegetación acuática.
- El lecho está formado por una capa de arena gruesa.

Se infiere que el sitio en cuestión también cumple aproximadamente en un 90% los criterios establecidos por el IDEAM para el emplazamiento de estaciones hidrometeorológicas descritos en el Anexo B; finalmente, se elige este lugar (Punto M) como el punto de monitoreo del presente estudio.

2.2.2. Modelo matemático para la estimación del caudal

La modelización matemática del flujo de agua en un río consiste en obtener un aproximado de los valores que toman las variables hidráulicas (e.g. velocidad, caudal) a partir de la resolución de ecuaciones de flujo que involucran parámetros propios del dimensionado de canales (i.e. características morfométricas y físico-hidráulicas). La morfometría de cada cuenca es proporcional a

la capacidad de cosecha hídrica ante eventos climáticos, y a la generación de respuesta a los mismos mediante la formación de escorrentía superficial expresada en términos de caudales [53]. La estimación del caudal, que también se conoce como aforo, se puede desarrollar a través de diferentes métodos, que en últimas instancias depende de las características del sitio y sus condiciones ambientales; los métodos prácticos de aplicación más utilizados son [54]:

- Método volumétrico
- Método de vertederos y orificios
- Método de área-pendiente
- Dilución con trazadores
- Estructuras hidráulicas
- Método de área-velocidad

El método implementado en el presente estudio se encuentra basado en el método de área-pendiente, el cual se fundamenta en el principio de una ecuación de hidráulica de canales de esfuerzo cortante (i.e. Chezy-Manning); sin embargo, difiere en el sentido en que se estudia solo un área transversal en lugar de dos. Este método consiste básicamente en medir en un área transversal de la corriente, previamente determinada, la velocidad promedio de flujo con la cual se obtiene el valor del caudal, que en la hidráulica de canales se define como el volumen desplazado en una unidad de tiempo [55].

En este método se calcula la velocidad promedio del flujo mediante la fórmula de Manning para canales abiertos, a partir de las características hidráulicas de la sección transversal del cauce obtenidas mediante un levantamiento topográfico. Atendiendo a esta consideración, el área hidráulica o mojada, A_{sm} , que se define como el área de la sección transversal ocupada por el flujo de agua en un canal y se mide en metros cuadrados, se calculó mediante el método de sección promedio, descrito a continuación:

- a) Una vez determinado el punto de observación se colocan dos estacas, una en cada orilla y se unen mediante la cinta métrica, fijándose que la línea de unión sea lo más perpendicular posible a la dirección del río para determinar el ancho del espejo de agua, T , que corresponde al ancho de la sección horizontal superior del canal medido al nivel de la superficie y se mide en metros.
- b) Se divide el ancho del canal en seis tramos iguales, d_i (la precisión de este método depende del número de tramos), después se mide cada vertical, h_i , utilizando para ello otra cinta métrica, como se indica en la figura 2.2.15.

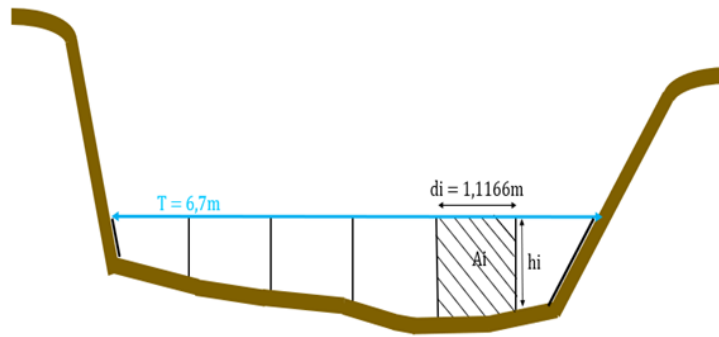


Figura 2.2.15 Área de la sección transversal del punto de monitoreo La Violeta

Fuente: Propia

- c) De esta manera, el área Asm , corresponde a la sumatoria de cada una de las áreas para cada tramo, A_i , teniendo en cuenta que cada tramo representa una figura tipo trapecioide, como se expresa en las ecuaciones 2.2.3 y 2.2.4.

$$Asm = \sum_{i=1}^n A_i \quad 2.2.3$$

$$A_i = \left(\frac{h_i + h_{i+1}}{2} \right) * d_i \quad 2.2.4$$

Donde;

- n : es el número de verticales (7 para el presente caso).
- A_i : es el área de cada tramo, en m^2 .
- h_i : profundidad inicial del tramo, en m.
- h_{i+1} : profundidad final del tramo, en m.
- d_i : ancho del tramo, en m.

Los resultados obtenidos en este proceso, se listan en la tabla 2.2.4:

Tabla 2.2.4 Área hidráulica de la sección transversal en el punto de monitoreo La Violeta

Fuente: Propia

LONGITUD DEL TRAMO [m]	PROFUNDIDAD DEL TRAMO [m]	AREA DEL TRAMO [m2]
d1	h1	A1
1,116	0,30	0,391
d2	h2	A2
1,116	0,40	0,474
d3	h3	A3
1,116	0,45	0,525
d4	h4	A4
1,116	0,49	0,619
d5	h5	A5
1,116	0,62	0,686
d6	h6	A6
1,116	0,61	0,619
	h7	
	0,50	
Asm [m2]		3,315

Como es evidente que la sección transversal del punto de monitoreo La Violeta corresponde a una sección tipo trapecioide, se implementan las ecuaciones de la tabla 2.2.5 para determinar las variables geométricas intrínsecas de un trapecioide, así como las demás ecuaciones de relieve, forma, y de drenaje del cauce y sección transversal del punto de monitoreo.

Tabla 2.2.5 Ecuaciones para la estimación del caudal en una sección de área trapezoidal
Fuente: Propia

FORMULA	REPRESENTACIÓN ALFANUMERICA	NOMBRE DE LA VARIABLE	UNIDAD DE MEDIDA	ECUACIÓN
1	B1, B2	Angulo entre el tirante hidráulico y paredes laterales	°	$\text{Arccos}\left(\frac{P_{ci}}{I_i}\right) * y$
2	Asm	Área hidráulica o área mojada	m ²	$\left(\frac{T + b}{2}\right) * y$
3	S	Pendiente media del cauce	$\frac{m}{m}$	$\frac{H_{max} - H_{min}}{L_c}$
4	W1, W2	Catetos opuestos de los triangulos formados dentro del área mojada	m	$\frac{y}{\cos(Bi)}$
5	P	Perimetro mojado	m	$W1 + W2 + b$
6	R	Radio hidráulico	m	$\frac{Asm}{P}$
7	Vm	Velocidad media (Ec. Manning)	$\frac{m}{s}$	$\frac{1}{n} * \sqrt[3]{R^2} * \sqrt{S}$
8	Q	Caudal	$\frac{m^3}{s}$	$Vm * Asm$

Ahora que ya se conocen todas las expresiones necesarias, se calcula la pendiente media del cauce hasta el punto de monitoreo, S_m ; que se define como el valor medio del declive del terreno y la inclinación respecto a la horizontal de la vertiente sobre la cual se ubica la subcuenca [56]. Para ello, se deben conocer los parámetros de relieve como altura máxima del cauce medida en el punto de nacimiento en msnm (H_{max}), altura métrica en el punto de monitoreo medida en msnm (H_{min}) y la longitud del cauce desde el nacimiento hasta el punto de monitoreo (L_c); dichos parámetros se presentan en la tabla 2.2.6, y el valor de la pendiente se obtiene mediante la ecuación 2.2.5.

Tabla 2.2.6 Parámetros de relieve del punto de monitoreo La Violeta
Fuente: Propia

Hmax [msnm]	Hmin [msnm]	Lc [m]
2850	1756	16630

$$S_m = \frac{H_{max} - H_{min}}{L_c}$$

2.2.5

$$S_m = \frac{2850m - 1756m}{16630m}$$

$$S_m = 0.065 [m/m]$$

El siguiente paso es medir las variables físico-hidráulicas propias de una sección transversal irregular no prismática de tipo trapezoidal, donde, mediante el uso de ecuaciones aritméticas y trigonométricas,

se obtienen los valores de radio hidráulico (R) que es definido como el parámetro utilizado para medir el efecto de la forma del canal y determina la longitud total del borde mojado de la sección transversal del cauce [57]; el perímetro mojado (P) que se define como la longitud de la línea de contacto entre el agua y la superficie mojada y se mide en metros [57]; los catetos opuestos de los triángulos formados dentro del área mojada (W_i) y los ángulos (β_i) formados entre la profundidad media del cauce (P_{Ci}) y las paredes laterales (I_i). De todas las mediciones que se pueden realizar en una figura trapezoidal utilizando una cinta métrica, las requeridas para determinar la velocidad del flujo, serán únicamente las indicadas en la figura 2.2.16.

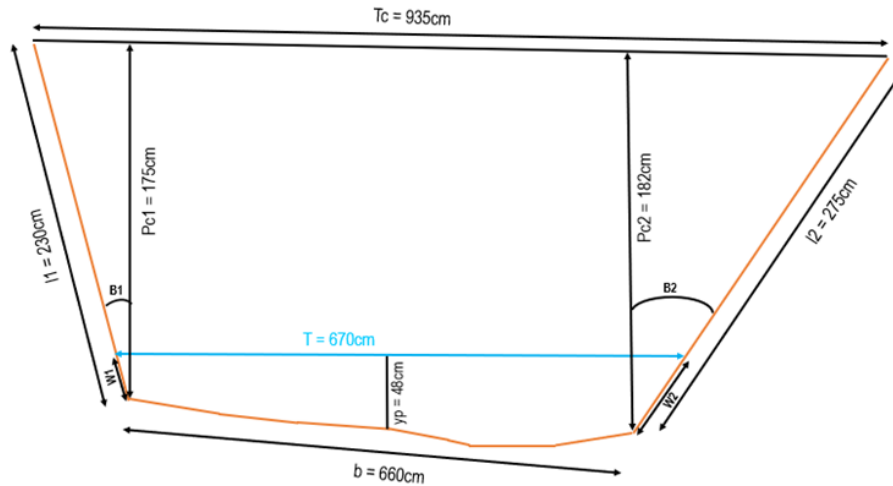


Figura 2.2.16 Medición de las variables geométricas en la sección trapezoidal del punto de monitoreo La Violeta
Fuente: Propia

y_p , corresponde a la profundidad del flujo o tirante hidráulico promedio, que se define como la distancia vertical del cuerpo de agua, medida desde la superficie del agua hasta el punto más bajo de la sección transversal o lecho. Este valor se obtuvo del promedio de las siete profundidades del tramo, h_i , de la tabla 2.2.4.

En la figura 2.2.17, se muestra el respectivo aforo donde se realizaron las mediciones de la sección trapezoidal en el punto de monitoreo La Violeta.



Figura 2.2.17 Aforo en el punto de monitoreo La Violeta
Fuente: Propia

Conociendo los valores de los lados laterales (I_1, I_2) y las profundidades medias (P_{C1}, P_{C2}) del trapecio, se hace uso la ecuación trigonométrica 2.2.6 del coseno, para obtener las ecuaciones 2.2.7 y 2.2.8 y de esta manera calcular los valores de los ángulos (β_1, β_2).

$$\cos(\beta_i) = \frac{P_{ci}}{I_i} \quad 2.2.6$$

Despejando el ángulo mediante la propiedad $\text{Arccos}(\cos(\beta)) = \beta$ se obtiene que:

$$\beta_1 = \text{Arccos}\left(\frac{P_{c1}}{I_1}\right) \quad 2.2.7$$

$$\beta_1 = \text{Arccos}\left(\frac{1.75m}{2.3m}\right)$$

$$\beta_1 = 40.45 [^\circ]$$

$$\beta_2 = \text{Arccos}\left(\frac{P_{c2}}{I_2}\right) \quad 2.2.8$$

$$\beta_2 = \text{Arccos}\left(\frac{1.82m}{2.75m}\right)$$

$$\beta_2 = 48.56 [^\circ]$$

Las hipotenusas de los triángulos formados en la sección mojada (W_1, W_2) se obtienen a partir de la ecuación 2.2.9, que igualmente resulta de la expresión del coseno.

$$W_i = \frac{y_p}{\cos(\beta_i)} \quad 2.2.9$$

Teniendo en cuenta que y_p equivale a 0.48m, figura 2.2.16, se obtienen los valores de triángulos.

$$W_1 = \frac{y_p}{\cos(\beta_1)}$$

$$W_1 = \frac{0.48m}{\cos(40.45)}$$

$$W_1 = 0.630 [m]$$

$$W_2 = \frac{y_p}{\cos(\beta_2)}$$

$$W_2 = \frac{0.48m}{\cos(48.56)}$$

$$W_2 = 0.725 [m]$$

Por último, para obtener el valor de velocidad media del flujo se deben conocer los valores del área mojada (i.e. perímetro mojado (P) y el radio hidráulico (R)), que se hallan mediante las ecuaciones 2.1.10 y 2.1.11.

$$P = W_1 + W_2 + b \tag{2.2.10}$$

$$P = 0.630m + 0.725m + 6.6m$$

$$P = 7.955 [m]$$

$$R = \frac{A_{sm}}{P} \tag{2.2.11}$$

$$R = \frac{3.315m^2}{7.955m}$$

$$R = 0.416 [m]$$

La relación sección-pendiente, permite obtener el caudal de una corriente a partir de la velocidad media del flujo (V_m), que se define como la rapidez promedio de una partícula de cualquier fluido que pasa por un punto espacio temporal determinado [57]; esta velocidad puede ser expresada mediante la fórmula de *Manning* que es, en definitiva, la más usada de todas las fórmulas de flujo uniforme para el cálculo práctico de escurrimiento en canales abiertos; para esto se requiere conocer primeramente las características topográficas y fisiográficas del tramo del río donde se quiere valorar el gasto (i.e. caudal). El cálculo se realiza mediante la ecuación 2.2.12.

$$V_m = \frac{1}{n} * \sqrt[3]{R^2} * \sqrt{S_m} \tag{2.2.12}$$

Donde;

- n : coeficiente de rugosidad de *Manning*.

Al aplicar la ecuación de Manning en el método de sección pendiente, la mayor dificultad o incertidumbre del método está en la determinación del coeficiente de rugosidad, n , que se define como el contacto entre el agua y los márgenes de la corriente que causa una resistencia, la cual depende de la rugosidad o suavidad del canal. Debido a que no existe un método exacto para la selección de su valor, una de las metodologías más prácticas para aproximar valor es mediante el uso de tablas [58], donde se tiene en cuenta el tipo y tamaño de los materiales que componen el cauce y las planicies, y la forma e irregularidades tanto del canal como la planicie de inundación. De acuerdo a [57], el valor del coeficiente para el presente estudio es 0.03, que es el valor típico de canales con corrientes en planicies limpias, rectas, máximo nivel sin montículos ni pozos profundos, y de arena gruesa.

Una vez definido el valor del coeficiente de Manning, se obtiene el valor de la velocidad media.

$$V_m = \frac{1}{0.03} * \sqrt[3]{(0.416m)^2} * \sqrt{0.065}$$

$$V_m = 0.473 [m/s]$$

Finalmente, se utiliza el valor de velocidad para determinar el caudal del río en el momento y lugar en que se realizó el respectivo aforo. Dos de las ecuaciones básicas que describen la física del ciclo hidrológico son también pertinentes para describir los sistemas utilizados con el fin de medir sus propiedades en movimiento: a) la ecuación de continuidad de la masa; y b) la ecuación de continuidad de la energía. Así, por ejemplo, una de las formulaciones de la ecuación de continuidad de la masa describe el caudal como:

$$Q = V_m * A_{sm} \tag{2.2.13}$$

Esta ecuación permite calcular el caudal instantáneo a través de la sección transversal del canal de área mojada (A_{sm}), y la velocidad media del flujo, V_m . Tradicionalmente, no es posible medir directamente el caudal por su complejidad y costo, sin embargo, es posible obtener una aproximación midiendo el nivel del río; así, la aplicación de esta ecuación ha permitido determinar el caudal incluso de los ríos más grandes del mundo[54].

$$Q = 0.473m * 3.315m^2$$

$$Q = 1.567 [m^3/s]$$

Este valor, representa el valor del caudal para un tirante hidráulico y_p registrado mediante datos de aforo, para la sección transversal del punto de monitoreo La Violeta. El valor del caudal en el método de sección-pendiente está ligado al valor del nivel del río, que en el presente estudio se mide constantemente a través de un sensor que emplea el ultrasonido para determinar la distancia.

En la tabla 2.2.7, se expresan los valores de las variables hidráulicas obtenidos mediante mediciones empleando herramientas manuales y los valores obtenidos mediante las ecuaciones de flujo para la estimación del caudal; correspondiente al punto de monitoreo La Violeta.

Tabla 2.2.7 Variables hidráulicas en el punto de monitoreo La Violeta

Fuente: Propia

CONNOTACIÓN	NOMBRE	VALOR	UNIDAD
T	Espejo de agua	6,70	m
Y_p	Tirante medio hidráulico	0,48	m
R	Radio hidráulico	0,42	m
P	Perímetro mojado	7,96	m
As_m	Área de sección mojada	3,32	m^2
V_m	Velocidad media del flujo	0,47	m/s
Q	Caudal instantáneo	1,57	m^3/s

2.2.3. Bloque Medición

De acuerdo a la OMM en [59] las estaciones hidrológicas y climatológicas automáticas son instaladas con el propósito de hacer seguimiento en tiempo real y de manera continua durante todo el año al comportamiento de las variables nivel, precipitación, humedad, temperatura, velocidad del viento, dirección del viento, caudal, presión atmosférica, entre otras; asimismo, afirma que el conocimiento se produce solo a través de mediciones y observaciones sistemáticas realizadas a través de sensores, que son objetos capaces de variar una propiedad ante magnitudes del entorno. Con base a esta premisa, el elemento de medición comprende los sensores que se implementaron en la estación con el fin de medir la totalidad de las variables hidroclimatológicas, las cuales se eligen observar debido a su posible correlación con los eventos que generalmente son desencadenados por las fuertes lluvias como las inundaciones y los movimientos en masa, que es considerado como uno de los factores críticos condicionantes.

2.2.3.1. Intervalos de muestreo de las variables hidroclimatológicas

El muestreo puede definirse como el proceso de obtención de una secuencia debidamente espaciada de mediciones de una variable [59]. Los intervalos de tiempo en los que se deben muestrear u observar cada una de las variables hidroclimatológicas, tabla 2.2.8, se definieron con base a los requerimientos del estándar ASAE EP505 APR2004 de *American Society of Agricultural and Biological Engineers* (ASABE), la cual es una organización profesional y técnica de miembros de todo el mundo que se dedican al avance de ingeniería aplicable a sistemas agrícolas, alimentarios y biológicos [60].

Tabla 2.2.8 Intervalos de muestreo según el estándar ASAE EP505 APR2004

Fuente: adaptada de [60]

VARIABLE	INTERVALO DE MUESTREO [minutos]
Temperatura del aire	≤ 10
Humedad relativa del aire	≤ 10
Velocidad del viento	≤ 10
Dirección del viento	≤ 10
Precipitación	≤ 10

De igual manera, de acuerdo a la Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorológicos (OMM-N° 8) los intervalos con los que deberían efectuarse las mediciones varían en función de la aplicación; por ejemplo, para las estaciones climáticas e hidrológicas la presión atmosférica, el nivel, caudal, la temperatura del aire, la humedad del aire, entre otras, sean medidas y comunicadas como medias de 1 a 10 minutos; y que el viento, exceptuando las ráfagas de viento, sea medido y comunicado como media de 2 a 10 minutos [59].

2.2.3.2. Selección de los dispositivos del sistema de monitoreo remoto

La selección de los dispositivos que integran el sistema de monitoreo remoto para la medición, adquisición, almacenamiento y comunicación, se realizó atendiendo a las recomendaciones descritas en la misma guía [59]. De acuerdo a esta guía, estos dispositivos deben tener la capacidad de operar en las condiciones ambientales del área de estudio (Sección 2.2.1) y dentro de los intervalos de muestreo y transmisión, de manera que proporcionen lecturas correctas en los tiempos establecidos.

Sensor de humedad relativa del aire

Para la medición de la humedad relativa se implementó el sensor DHT22 fabricado por la empresa Aosong Electronics Co; este sensor utiliza un sensor capacitivo de humedad para medir la humedad relativa del aire. A continuación, se presentan las características más importantes [61]:

- Alimentación: $3.3Vdc \leq Vcc \leq 6Vdc$
- Rango de medición de humedad: De 0 a 100% RH
- Precisión de medición de humedad: 2% RH
- Resolución Humedad: 0.1%RH

Sensor de temperatura del aire

Este sensor utiliza un termistor para medir el aire circundante y calcular la temperatura de este. A continuación, se presentan las características más importantes [61]:

- Rango de medición de temperatura: $-40^{\circ}C$ a $+80^{\circ}C$
- Precisión de medición de temperatura: error de $\pm 0.5^{\circ}C$
- Resolución Temperatura: $0.1^{\circ}C$.

Sensor de velocidad del viento

Para la velocidad del viento se implementó un anemómetro de tipo cazoletas integrado en el kit meteorológico de Sparkfun[62], el cual mide la velocidad del viento por medio de un interruptor de lengüeta (i.e. *Red Switch*) y un imán; presenta una resolución de un pulso por segundo a una velocidad del viento de 0,66m/s [62].

Sensor de dirección del viento

Para obtener la medida de la dirección del viento se implementó una veleta integrada en el kit meteorológico de Sparkfun, la cual codifica un voltaje producido por la combinación de resistencias dentro del sensor, el imán de la veleta puede cerrar dos interruptores a la vez, permitiendo indicar hasta 16 posiciones diferentes [62].

Sensor de precipitación

Para medir la precipitación se implementó un pluviómetro tipo cubo de vaciado automático o balancín integrado en el kit meteorológico de Sparkfun, utiliza un interruptor de lengüeta y un imán, con una resolución de un pulso por cada 0,279mm [62].

Sensor de nivel

El nivel del río se implementó el sensor HC-SR04 fabricado por la empresa Cytron *technologies*, este sensor permite medir distancia entre el módulo y un objeto. A continuación, se presentan las características más importantes [63]:

- Rango de distancia: 2cm hasta 400cm.
- El trigger es un nivel alto de 10uS (mínimo).
- Voltaje de operación: 5 VDC.
- Corriente de operación: 15mA.
- Angulo efectivo: < 15°.
- Precisión: 3mm
- Resolución: 0,3cm

Sensor de presión atmosférica

La presión atmosférica se implementó el sensor BMP280 fabricado por la empresa Bosch, este sensor posee alta precisión, linealidad y un bajo consumo de energía, basado en la tecnología BOSCH piezo-resistiva con gran robustez, cuenta con estabilidad a largo plazo y se conecta directamente a un microcontrolador a través de I2C. A continuación, se presentan las características más importantes [64]:

- Voltaje de Operación: 1.8V – 3.3V DC.
- Interfaz de comunicación: I2C o SPI (3.3V).
- Rango de Presión: 300 a 1100hPa.
- Resolución: 0.16Pa.
- Precisión absoluta: ± 1hPa.
- Frecuencia de Muestreo: 157Hz (Máx.).

Tarjetas de adquisición de datos

Para la adquisición de los datos, en el sistema de monitoreo remoto se empleó una arquitectura Maestro-Eslavos mediante el protocolo Circuito inter-integrado (I2C, del inglés), en la cual se implementaron dos tarjetas de desarrollo: la tarjeta Soul One que opera en modo Maestro y la tarjeta Arduino Mega 2560 que opera en modo Esclavo1.

El Dev kit Soul One fabricado por *The Soul of Things* TST, figura 2.2.18, es una tarjeta integrada de desarrollo libre con la capacidad de conectar una gran variedad de sensores hacia internet vía SIGFOX y trabaja en un entorno Arduino; esto se debe a que se encuentra integrada básicamente por un Arduino Leonardo y un módulo transceptor Wisol SFM11R2D [65]. Las características de la tarjeta, se describen en detalle en el Anexo C.



Figura 2.2.18 Soul One
Fuente: tomado de [66]

Por otra parte, el Arduino Mega 2560, figura 2.2.19, es una tarjeta de desarrollo open-source construida con un microcontrolador modelo Atmega2560 que posee dentro de sus características más importantes 16 entradas análogas, 54 pines de entrada y salida digitales, 14 salidas PWM, memoria flash de 256kB, velocidad del reloj de 16MHz, 4 puertos de comunicación serial UART, conector ICSP, botón de *reset* y voltaje de entrada de 7-12V; esta tarjeta se programa en el entorno de desarrollo Arduino IDE [67].

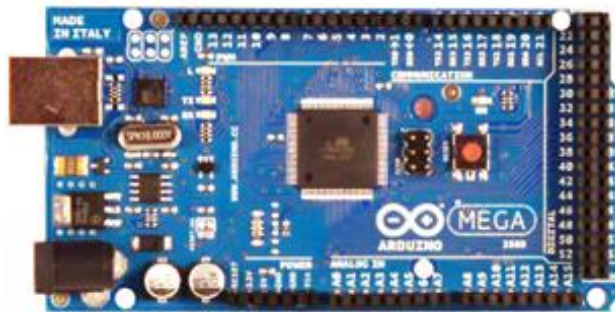


Figura 2.2.19 Arduino MEGA 2560 REV3
Fuente: tomado de [67]

Tarjeta de memoria de almacenamiento

Se decide implementar una tarjeta de memoria flash como un sistema de almacenamiento de respaldo; se trata de Micro SD fabricada por Sandisk con una capacidad de 16GB de clase 10, que trabaja a un voltaje de 2,7V - 3,6V y a una temperatura de -25°C a 85°C [68].

Módulo transmisor

El dispositivo que permite que la estación comunique los datos hidroclimatológicos al mundo exterior, es el módulo transceptor SFM11R2D fabricado por la empresa Wisol; se trata de un módulo capaz de recibir y transmitir datos vía Sigfox de doble banda que puede operar en Colombia; asimismo, este módulo se encuentra integrado en la tarjeta Soul One descrita anteriormente y en el dispositivo Breakout de la empresa *The Soul of Things* TST, figura 2.2.20. Las características de la tarjeta Breakout, se describen en detalle en el Anexo C.



Figura 2.2.20 Breakout TST
Fuente: tomado de [69]

2.2.4. Bloque Adquisición Esclavo1

El elemento de adquisición denominado como Esclavo1 en la arquitectura I2C (i.e. Arduino Mega 2560), desarrolla dos procesos a saber: el primer proceso está relacionado con la lectura de los sensores de la estación según los intervalos de muestreo establecidos (sección 2.2.3), y la posterior comunicación de los datos al Maestro (i.e. Soul One) cada que este lo solicite; el segundo proceso está relacionado con la detección del cambio de estado o de alerta provocado por el comportamiento del nivel del río, y la posterior comunicación del evento hacia el centro de recepción de datos alojado en la nube (i.e. Sigfox Backend), mediante el dispositivo Breakout.

Para la implementación del protocolo de comunicación I2C que es empleado para comunicar las dos tarjetas de adquisición del sistema de monitoreo remoto (i.e. Soul One y Arduino Mega) por medio de las dos líneas SDA y SCL del bus serial, se utiliza el IDE de Arduino el cual proporciona la librería "Wire.h". Esta librería utiliza un buffer máximo de 32 Bytes, por lo que cada transmisión debe estar dentro de este límite, los bytes excedentes se eliminan. En el caso del Arduino Mega 2560 el pin SDA corresponde al pin digital D20 y SCL al pin D21; para la tarjeta Soul One, el SDA corresponde al pin D2 y SCL al pin D3.

Con respecto al enlace entre el Breakout y Arduino Mega para la comunicación de la Trama de nivel, este se realiza por medio del protocolo de comunicación serial UART; de esta manera, los datos son transmitido por el canal TX y recibidos por el canal RX, como se indica en la figura 2.2.21.

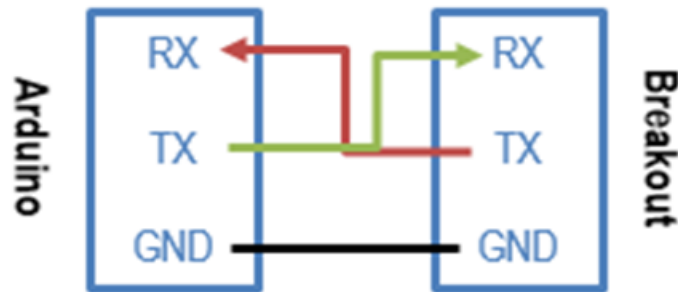


Figura 2.2.21 Conexión serial entre Arduino Mega y Breakout
Fuente: Propia

2.2.4.1. Lógica implementada por el Esclavo1 en el proceso de lectura

En este proceso, el Esclavo1 se encarga de leer todos los sensores de la estación a excepción del sensor de presión atmosférica (i.e. Esclavo 2) que también se comunica por I2C directamente con el Maestro. Una vez haya transcurrido un tiempo determinado y el Esclavo1 obtenga todos los datos de los sensores, estos se deben unificar para formar una sola trama que será enviada hacia el Maestro cuando este lo solicite; tal como se indica en el diagrama de flujo de la figura 2.2.22.

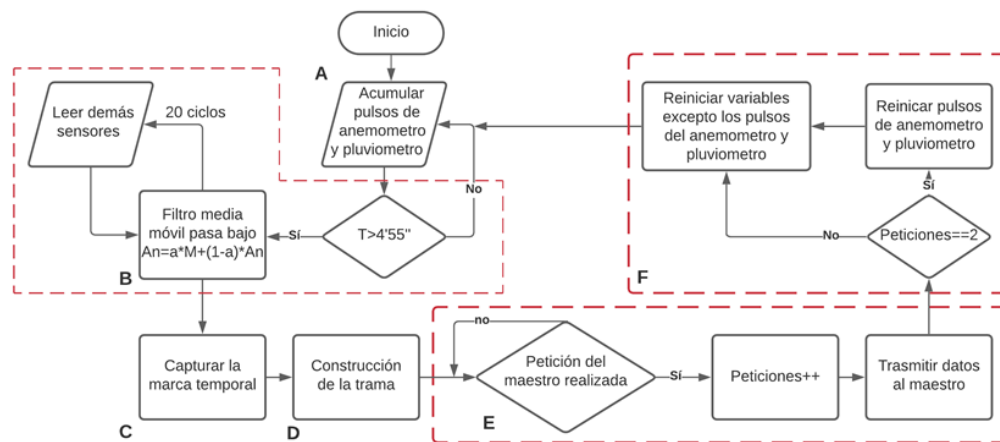


Figura 2.2.22 Lógica implementada por el Esclavo1 en la lectura de los sensores
Fuente: Propia

Sección A: en esta sección se registran continuamente los pulsos generados por los sensores de lengüeta del pluviómetro y anemómetro, con el fin de representar los valores de precipitación y velocidad del viento como un acumulado y promedio en un periodo mínimo de 10 minutos, respectivamente; tal como lo sugiere el IDEAM en [50].

Sección B: en esta sección se realiza la lectura de los sensores de la estación cada 4,55 minutos, exceptuando el anemómetro, pluviómetro y el sensor BMP280 de presión barométrica. Se emplea este tiempo dado que es imposible observar todos los elementos simultáneamente, debido a que el filtro implementado realiza una serie de mediciones por cada sensor lo cual implica un retardo de tiempo, las observaciones deben realizarse dentro del periodo de cinco segundos anteriores al tiempo exacto de petición del Maestro medido por su reloj interno, que para este caso corresponde a cinco minutos. El filtro empleado corresponde a una técnica de suavizado de señales para minimizar el error de lectura de los sensores, que pueden visualizarse como picos extremos en la forma de la señal, generados principalmente por fenómenos como el ruido y demás perturbaciones propias del ambiente; se trata de un filtro de media móvil de primer orden y re-muestreo, que consiste en filtrar la señal en la realización de la media aritmética entre la muestra actual y una muestra anterior, de esta manera se logra producir cambios lentos en el valor lo cual facilita ver con mayor claridad las tendencias de los datos [70].

Sección C: después de obtener el valor filtrado de las variables, queda capturar la marca temporal en tiempo real, que es requerida por el sistema de almacenamiento para facilitar el estudio del comportamiento de las variables respecto al tiempo; dicha marca se obtiene mediante el módulo de reloj RTC DS1302 que dispone de un circuito integrado alimentado independientemente por una batería.

Sección D: la trama de datos (i.e. Trama parcial) que será enviada a internet por el Maestro a través de la red Sigfox, se empieza a construir desde este punto, figura 2.2.22. Para ello se debe tener en cuenta tres consideraciones: los datos medioambientales se deben codificar en el sistema Hexadecimal para ser transmitidos a la nube de Sigfox; la cantidad total de dígitos hexadecimales que se transmiten a la nube de Sigfox debe ser un número par; y la carga útil máxima de un mensaje en la red Sigfox en modo Uplink es de 12 Bytes.

Con respecto a la trama, esta se construye de una manera organizada, cada dato es separado por “;”, con el fin de facilitar el proceso de adicción y extracción de datos que se realiza en la etapa de almacenamiento y transmisión a internet, respectivamente. La información que contiene la trama de manera ordenada es la siguiente: “Día; mes; año; horas; minutos; temperatura; humedad; pulsos del anemómetro; pulsos del pluviómetro; nivel; voltaje de la batería; dirección del viento;”. En la figura 2.2.23, se muestra un ejemplo de la trama parcial construida por el Esclavo1.

`0C;03;7E5;17;0D;0FE;050;0DC;0A;07D;84;03;`

Figura 2.2.23 Trama parcial enviada por el Esclavo1

Con respecto a la dirección del viento, la cual se debe expresar en grados sexagesimales contados en el sentido que giran las manecillas del reloj a partir del norte geográfico, se decide representar su valor en un rango de 0 a 8 como se indica en la tabla 2.2.9.

Tabla 2.2.9 Dirección del viento en representación decimal

Fuente: Propia

DIRECCIÓN	REPRESENTACIÓN
-----------	----------------

Calma	0
N	1
NE	2
E	3
SE	4
S	5
SW	6
W	7
NW	8

Sección E: una vez el Esclavo1 haya construido la trama debe entrar en modo espera. Esto quiere decir que el Esclavo1 debe esperar a que el Maestro realice la petición de los datos; dicha petición estará determinada por un temporizador implementado en el Maestro que se activa automáticamente cada cinco minutos.

Sección F: debido a que la primera petición realizada por el Maestro se hace únicamente con el fin de almacenar los datos en la memoria flash; las variables que acumulan los pulsos del anemómetro y pluviómetro solo se deben reiniciar después de que el Maestro realice la segunda petición, que ahora se hace con el fin de transmitir el mensaje hacia el Sigfox Backend.

2.2.4.2. Lógica implementada por el Esclavo1 en el proceso de detección

Debido a que el comportamiento de un río es dinámico e impredecible (i.e. presenta cambios vertiginosos en el nivel), el sistema de monitoreo para un Sistema de Alertas Tempranas (SAT) debe tener la capacidad de detectar dicho cambio en el momento en que se produce, y comunicarlo rápidamente a las plataformas donde se realiza el respectivo análisis y se determina si se requiere o no alertar a la comunidad que se encuentra en riesgo [71].

Partiendo de este contexto, el sistema de monitoreo del presente estudio muestrea el nivel del río con una frecuencia de cinco segundos y transmite de manera inmediata la variable nivel (i.e. Trama de nivel) cuando ocurra una transición de niveles de alerta previamente establecidos, proceso que tarda aproximadamente diez segundos en realizarse. Estos niveles se establecieron en coordinación con la Oficina Asesora de Gestión del Riesgo de Desastre (OAGRD) de la Alcaldía de Popayán para el sitio de estudio, donde se tuvo en cuenta los datos de aforo de la sección 2.2.2.

Tabla 2.2.10 Niveles de tirante hidráulico máximos y mínimos para el punto de monitoreo La Violeta

Fuente: Propia

PUNTO DE OBSERVACIÓN	TIRANTES	ALERTA VERDE	ALERTA AMARILLA	ALERTA NARANJA	ALERTA ROJA
La Violeta	Máximos	13cm-70cm	70cm	130cm	200cm
	Mínimos		13cm	10cm	8cm

La detección del cambio de nivel de alerta se realiza a través de un conjunto de reglas, por lo que es necesario establecer los rangos que determinaran el nivel de alerta; tal como se indica en la tabla 2.2.11. Establecer los umbrales máximos permite detectar un incremento alarmante del nivel lo cual conlleva a una posible inundación, y establecer los umbrales mínimos permite detectar un decremento

alarmante de nivel lo cual conlleva a una avenida torrencial por posible represamiento aguas arriba, generalmente causados por deslizamiento de tierra sobre el río o empalizadas.

Tabla 2.2.11 Rangos de niveles de alerta para el punto de monitoreo La Violeta

Fuente: Propia

NIVELES	NORMAL	BAJO	MEDIO	ALTO
Máximo	13cm<=N<=70cm	70cm<N<=130cm	130cm<N<=200cm	N>200cm
Mínimo		13cm>N>=10cm	10cm>N>=8cm	N<8cm

En el diagrama de flujo de la figura 2.2.24, se describe, de manera resumida, la lógica implementada por el Esclavo1 para la comunicación de la Trama de nivel (figura 2.2.9) cuando ocurre una transición en los niveles de alerta.

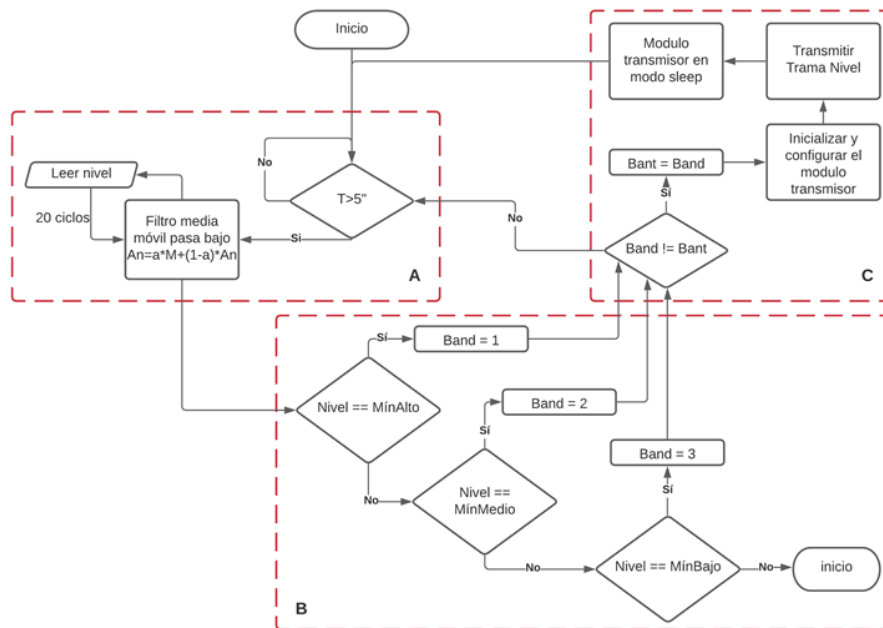


Figura 2.2.24 Lógica implementada por el Esclavo1 para la detección y comunicación

Fuente: Propia

Sección A: del mismo modo que en la Sección B de la figura 2.2.24, en esta Sección se implementa un filtro pasa bajos para obtener la media móvil de la variable nivel, que será muestreada a un intervalo de cinco segundos.

Sección B: después de obtener el valor medio de la variable nivel, se determina si dicho valor se encuentra dentro de alguno de los rangos establecidos en la tabla 2.2.12. Las banderas se utilizan con el fin de evitar que la condición se cumpla repetidamente.

Sección C: finalmente, si la condición se cumple por primera vez, lo cual quiere decir que ha ocurrido una transición de nivel de alerta, se inicializa la comunicación con el módulo transmisor del Breakout,

se configura la frecuencia para la transmisión en modo Uplink y se prepara el canal de comunicación; finalmente se transmite la Trama de nivel (i.e. Mensaje Sigfox) hacia el SigFox Backend. Después de haber transmitido el mensaje, se lleva el módulo al modo de bajo consumo para ahorrar energía.

La trama transmitida por el Esclavo1 contiene únicamente el valor del nivel, que es representado en cuatro dígitos del sistema hexadecimal lo cual corresponde a un tamaño de 2 Bytes (i.e. Payload); de esta manera es posible enviar el entero del valor más un dígito decimal para una mejor representación.

En la figura 2.2.25, se ilustra una de las tramas que fueron enviadas durante las pruebas en la fase de evaluación.

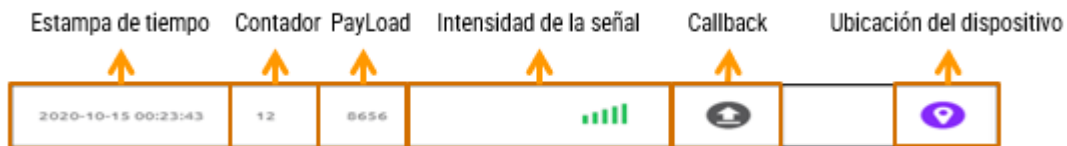


Figura 2.2.25 Trama de nivel enviada por el Esclavo1 hacia el Sigfox Backend

Fuente: Propia

2.2.5. Diseño y construcción del prototipo de estación

En esta fase se describe el proceso para la construcción del prototipo de estación hidroclimatológica junto con un soporte para la respectiva instalación en campo; así como los diagramas de conexión de cada uno de los componentes del sistema de monitoreo remoto.

Inicialmente, se realiza el diseño en 3D mediante la herramienta 3D Builder de Microsoft teniendo en cuenta las características físicas del área en estudio (Sección 2.2.1). En la figura 2.2.26, se distinguen los diferentes elementos que se necesitan para ubicar cada uno de los dispositivos que conforman el prototipo de estación.

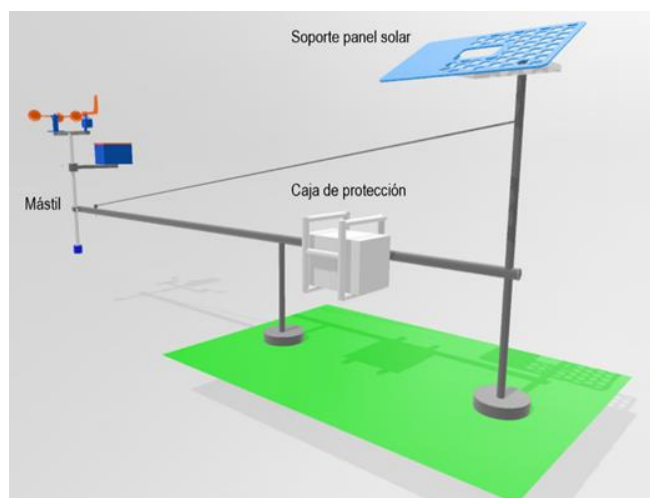


Figura 2.2.26 Diseño en 3D del prototipo de estación hidroclimatológica

Fuente: Propia

Teóricamente, este diseño permitirá realizar un correcto emplazamiento de la estación siguiendo las recomendaciones descritas por el IDEAM para el emplazamiento de estaciones hidrometeorológicas (Anexo B).

2.2.5.1. Construcción física de la caja de protección

La caja de protección en un sistema de monitoreo remoto, debe garantizar un alto grado de protección a los dispositivos que contiene, de manera que permita su operación en condiciones climáticas extremas donde generalmente hay polvo y humedad, condiciones que provocan el rápido deterioro de cualquier dispositivo electrónico. Dentro de los dispositivos a proteger se encuentran los circuitos de control, batería, microcontroladores, dispositivos de comunicación, sensor de temperatura y sensor de presión barométrica. Los principales materiales y herramientas que se emplearon para la construcción de la caja fueron: ángulos de aluminio, lamina de acrílico, taladro, tuercas y tonillos, cinta métrica, tubería, uniones y adhesivo PVC, entre otros. Las dimensiones de la caja son 15.5 cm de altura, 26 cm de largo y 20.8 cm de profundidad. En la figura 2.2.27, se muestra el producto terminado.



*Figura 2.2.27 Caja de protección del prototipo de estación hidroclimatológica
Fuente: Propia*

2.2.5.2. Distribución de los elementos en el interior de la caja

Con la finalidad de evitar cortocircuitos y de facilitar el manejo y conexión de cada uno de los dispositivos, la fijación de los elementos en el interior de la caja se realiza como se indica en la figura 2.2.28.

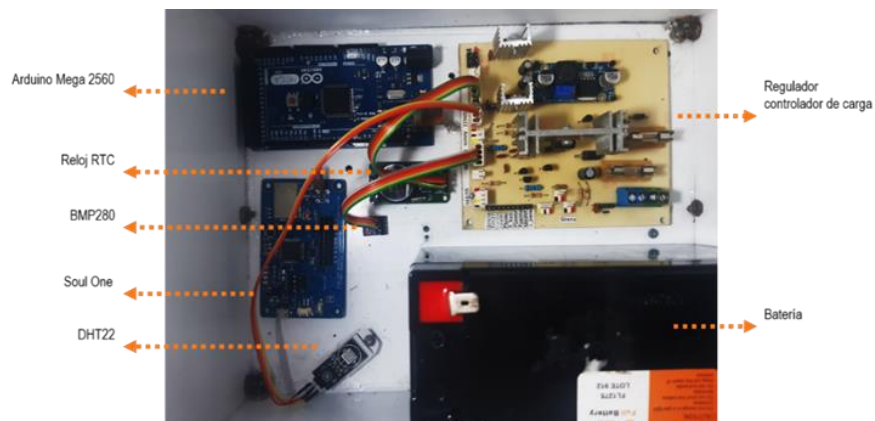


Figura 2.2.28 Distribución de los dispositivos al interior de la caja de protección
Fuente: Propia

2.2.5.3. Montaje de los sensores en el Mástil

Debido a que el kit meteorológico de Sparkfun ya disponía de un mástil construido en tubo metálico, solo fue necesario realizar la fijación del pluviómetro, anemómetro, veleta y el sensor de nivel, siguiendo las indicaciones del IDEAM y del fabricante.



Figura 2.2.29 Montaje de los sensores en el Mástil
Fuente: Propia

2.2.6. Diagramas de conexión de los componentes del sistema de monitoreo remoto

2.2.6.1. Conexiones del Esclavo1

En el diagrama de la figura 2.2.30, se muestra la respectiva interconexión del Arduino Mega con el Breakout, la fuente de alimentación de 5v destinada para los sensores, la fuente de alimentación de 6v destinada para el Arduino Mega y el Soul One, sensores (Excepto el sensor de presión BMP280), y los elementos que integran el sistema fotovoltaico.

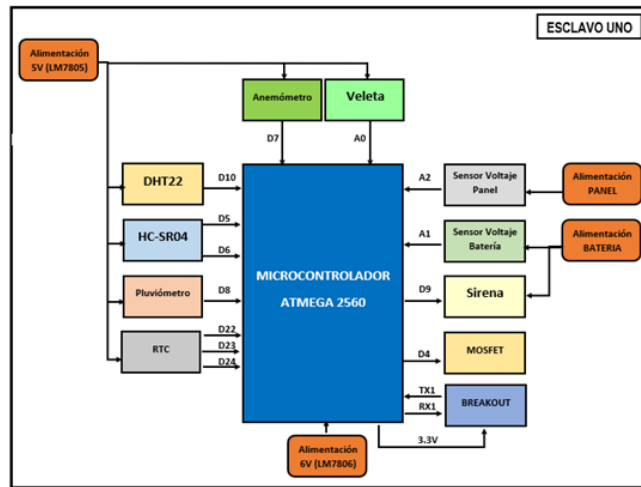


Figura 2.2.30 Diagrama de conexión del Esclavo1
Fuente: Propia

2.2.6.2. Conexiones del Maestro

En el diagrama de la figura 2.2.31, se muestra la respectiva interconexión de la tarjeta Soul One con el Arduino Mega, el sensor BMP280 y el módulo transceptor SFM11R2D.

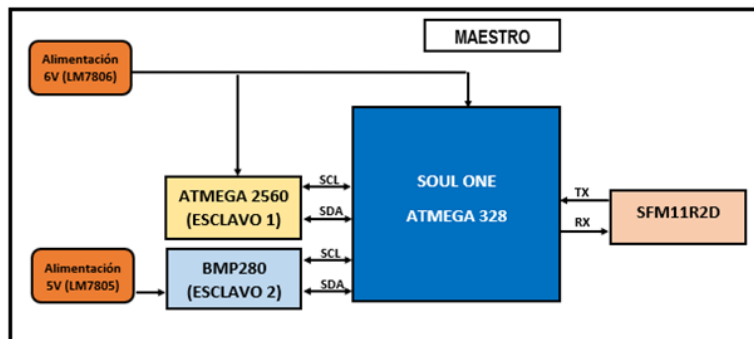


Figura 2.2.31 Diagrama de conexión del Maestro
Fuente: Propia

2.2.6.3. Conexiones del sistema de alimentación

El sistema energético se compone de un panel solar, regulador controlador de carga PWM y una batería; sin embargo, para alimentar correctamente los diferentes dispositivos del sistema de monitoreo remoto, se requiere del uso de reguladores de voltaje comunes como el LM7805 y LM7806, los cuales proporcionan exactamente 5V y 6V, respectivamente. Asimismo, debido a que el voltaje de la batería varía entre 11.5V y 14.4V, se decide implementar un convertidor DC-DC con el fin de reducir el voltaje de entrada de los reguladores, y de esta manera disminuir la disipación de energía en forma de calor. En el diagrama de la figura 2.2.32, muestra la conexión entre el sistema fotovoltaico, el convertidor DC/DC y las fuentes reguladoras de voltaje.

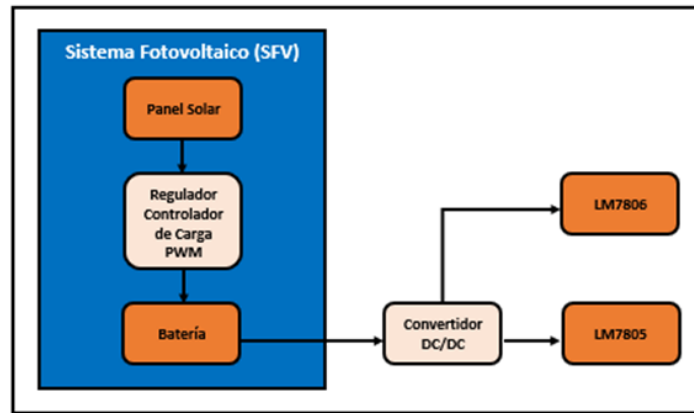


Figura 2.2.32 Diagrama de conexión del sistema de alimentación
Fuente: Propia

2.3. COMPONENTE DE COMUNICACIÓN

Este componente se encarga de las etapas de almacenamiento y comunicación de los datos en el sistema de monitoreo remoto, en él se describen una serie de actividades relacionadas con la identificación de la tecnología de comunicación y el desarrollo de la lógica empleada para el almacenamiento y transmisión. En el diagrama de la figura 2.3.33, se identifican los elementos del componente de comunicación y su interconexión, así como las entradas y salidas de cada uno.

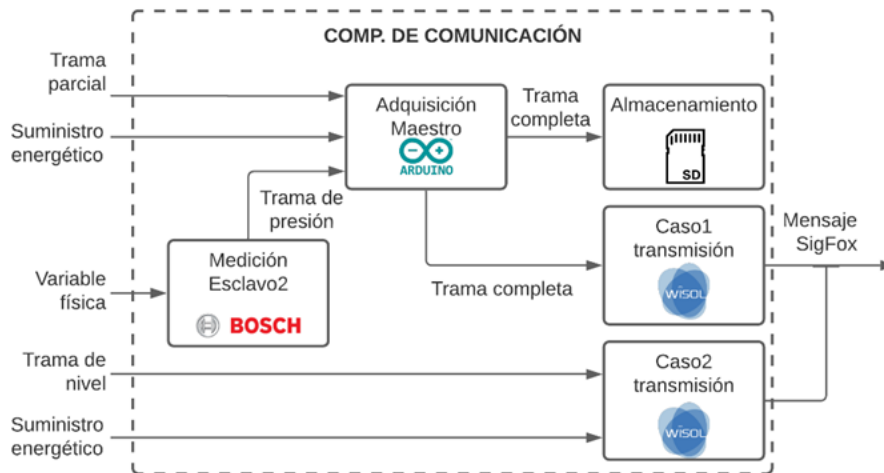


Figura 2.3.33 Estructura del componente de comunicación
Fuente: Propia

2.3.1. Identificación de la tecnología de comunicación

Un SAT es un sistema automatizado que se implementa en los países como medida adaptativa al cambio climático con el fin de mitigar las pérdidas de vidas, los daños en las propiedades y al ambiente [71]. Las tecnologías de comunicación juegan un papel muy importante en el desarrollo de estos

sistemas, debido a que normalmente las estaciones o puntos de monitoreo se encuentran en lugares remotos donde la energía es un recurso muy limitado y no hay acceso a internet. Por esta razón, es imperioso que la tecnología de comunicación empleada en este tipo de aplicaciones pueda transmitir a largas distancias, a una velocidad aceptable, de manera confiable y represente un bajo consumo de energía.

La finalidad de esta actividad es identificar, a través de un método comparativo, cuál de las tecnologías de comunicación del Internet de las Cosas, es la que mejor se ajusta a los requerimientos del caso de estudio (Anexo D); para ello, se comparan las características más importantes como es la frecuencia de operación, cobertura, velocidad de transmisión de datos, ancho de banda, consumo, alcance y capacidad de carga útil.

Uno de los principales habilitadores de proyectos IoT son las redes de comunicación que permiten la conectividad de sensores, actuadores, bases de datos, servidores, etc. Actualmente, IoT está compuesta por una colección dispersa de redes diferentes y con distintos fines (e.g. transporte, educación, empresas, energía, clima, entre otros), asimismo, de diversas tecnologías de comunicación (e.g. GMS/GPRS, SigFox, LoRaWAN, NB IoT, WIFI, entre otros). A continuación, se describen algunas de estas redes de comunicación con el fin de determinar la más indicada para el presente estudio, tabla 2.3.12.

Tabla 2.3.12 Tecnologías de comunicación para soluciones IoT

Fuente: Propia

CARACTERÍSTICA	SigFox	LoRaWAN	LTE-M	NB-IoT
Frecuencia	Bandas ISM sin licencia	Bandas ISM sin licencia	Bandas de frecuencia LTE con licencia	Bandas de frecuencia LTE con licencia y 2G
Ancho de Banda	100Hz	250kHz y 125kHz	1,4 MHz	200kHz
Tasa de datos	100 bps	50 kbps	1 Mbps	100 kbps
Bidireccional	Half - duplex	Half - duplex	Full - Duplex	Half - duplex
Máximo mensajes/día	140 (UL), 4 (DL)	Ilimitado	Ilimitado	Ilimitado
Longitud máxima de carga útil	12 bytes (UL), 8 bytes (DL)	243 bytes	27.2 bytes (UL), 62.5 bytes (DL)	1600 bytes
Distancia	10km (urbano), 40km (rural)	5km (urbano), 20km (rural)	1km (urbano), 5km (rural)	1km (urbano), 10km (rural)
Inmunidad interferencias ^a	Muy alto	Muy alto	Medio	Bajo

Sigfox y LoRaWAN son las redes de red de área amplia y bajo consumo (LPWAN, del inglés), que están diseñadas para la implementación de IoT a gran escala; su usabilidad se ha masificado en los últimos años debido a sus características de comunicación de bajo consumo, largo alcance, licencia libre y bajo costo, muy adecuadas para aplicaciones del IoT que necesitan transmitir pequeñas cantidades de datos a largas distancias.

2.3.1.1. Long Range (Lora)

Es una tecnología de capa física emergente, de largo alcance y de poca potencia de transmisión que modula las señales en las bandas de radio industriales, científicas y médicas (ISM, del inglés) sin licencia (i.e. 868 MHz en Europa, 915 MHz en América y 433 MHz en Asia); muy adecuada para

aplicaciones como agricultura, ganadería, localización, para ciudades inteligentes o zonas de difícil acceso. Utiliza un modelo de negocio muy similar a SigFox, aunque se encuentra mejor preparada para una comunicación en tiempo real, mayor interoperabilidad, mensajería ilimitada, menor latencia y mayor longitud de carga útil [72]. Por otro lado, la cobertura de LoRaWAN es mucho menor que la de SigFox, ya que actualmente solo se encuentra desplegada en Francia, Bélgica, Suiza, Países Bajos y Sudáfrica; factor determinante en el planteamiento de proyectos IoT en Latinoamérica.

2.3.1.2. SigFox

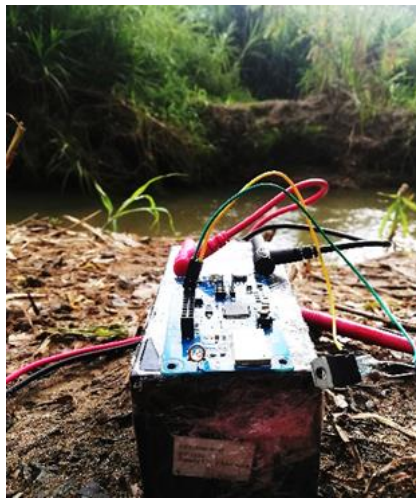
Es una tecnología inalámbrica para la transmisión de datos de baja potencia y largo alcance, muy específica para soluciones del IoT. Es la red LPWAN más extendida a nivel mundial, construida sobre la una modulación de banda ultra estrecha (UNB, del inglés) y opera en la banda ISM; además, implementa una infraestructura móvil de antenas y estaciones patentadas e independientes de las redes móviles actuales y equipadas con radios cognitivos definidos por software, y los conecta a los servidores de Backend utilizando una red basada en IP [72].

En comparación con LoRa, Sigfox es de menor coste, presenta una arquitectura más sencilla, dispone de una mayor cobertura, transmite a una mayor distancia y presenta una mayor aceptación por parte de los fabricantes los cuales facilitan la subida de datos a la nube. Finalmente, se escoge SigFox como la tecnología de comunicación en el presente estudio por las razones anteriores y por la disponibilidad de cobertura en el municipio de Popayán. En el Anexo D, se relaciona más información acerca de las características técnicas de la red, los transceptores, módulos, kits de desarrollo y plataformas.

2.3.2. Pruebas preliminares en campo

Para la implementación del dispositivo final, en primer lugar, se requirió de un proceso de verificación de cobertura de la red en el área de estudio. Para ello se implementó la tarjeta Soul One alimentada mediante una fuente conformada por una batería de 12V 3.3Ah y un regulador de tensión LM7806; de igual manera, fue necesario construir un sketch (i.e. Código en Arduino) que permitiera transmitir un valor determinado en el momento en que se presione el botón externo de la tarjeta (i.e. interrupción externa).

El procedimiento consistió en ubicar el dispositivo en el lugar en cuestión y presionar el botón externo un número determinado de veces; posteriormente comprobar si llegaba al Backend la misma cantidad de mensajes y el valor definido en el sketch. En la figura 2.3.34, se puede observar el dispositivo operando en el punto de monitoreo La Violeta.



Dispositivo 400D1A - Mensajes

2021-03-14 21:27:14	2752	b4			
2021-03-14 21:26:50	2751	b4			
2021-03-14 21:25:00	2750	b4			
2021-03-14 21:24:33	2749	b4			

Figura 2.3.34 Verificación de cobertura SigFox en el punto de monitoreo La Violeta
Fuente: Propia

Después de haber realizado este proceso, finalmente se pudo comprobar que efectivamente había cobertura de la red SigFox en el área de estudio.

2.3.3. Implementación de SigFox en la transmisión de los datos

En el diagrama de la figura 2.3.35, se identifican las etapas que recorre el mensaje durante el proceso de comunicación bajo la implementación de la tecnología Sigfox, en el presente estudio.

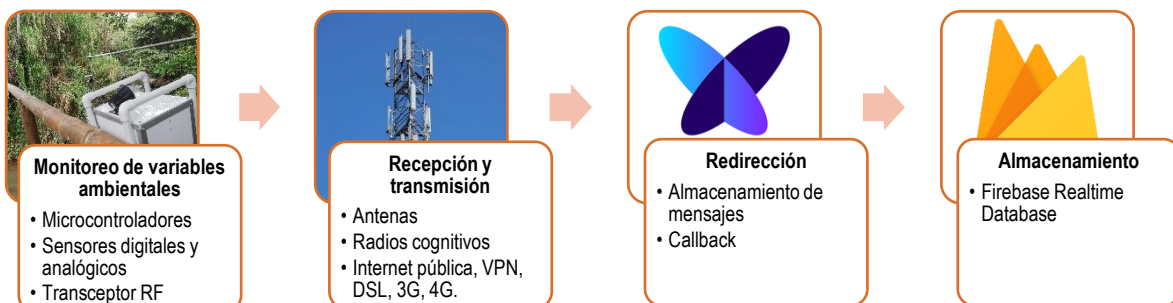


Figura 2.3.35 Diagrama modular por bloques del sistema de comunicación
Fuente: Propia

2.3.3.1. SigFox Cloud

En esta plataforma fue necesario realizar el proceso de suscripción de los dispositivos Soul One y Breakout (i.e. Dispositivos finales) para su implementación en la Red; para ello, se sigue el procedimiento descrito en el manual de usuario [66] que entrega la empresa TST al adquirir sus productos. Este manual explica detalladamente como realizar el registro de las tarjetas en el SigFox Backend, y además explica como configurar y enviar los primeros mensajes para comprobar su funcionamiento.

No obstante, como el Sigfox Backend es una plataforma únicamente para la visualización, almacenamiento y redirección de los mensajes transmitidos por el dispositivo final, no permite analizar la información para la toma de decisiones; es necesario reenviar dicha información por medio de Callbacks o API a plataformas externas (e.g. Bases de datos, plataformas del IoT, páginas web, aplicativos móviles) que puedan almacenar los datos, representarlos gráficamente, analizar el mensaje y permitan tomar decisiones (e.g. activación de actuadores).

2.3.3.2. Customer IT

El Customer IT hace referencia a las aplicaciones o servicios que el cliente enlaza con la red para obtener y procesar los mensajes que llegan al Backend. Como el presente estudio requiere de un lugar en la Web donde se puedan almacenar los datos que recoge y transmite la estación de monitoreo, se decide implementar la base de datos en tiempo real que ofrece Firebase.

Firebase como servicio de Google, es una plataforma en la nube para el desarrollo de aplicaciones del lado del cliente (e.g. Android, iOS, Web) que proporciona muchas funciones como autenticación y seguridad, base de datos en tiempo real y almacenamiento de archivos, entre otros. Con Firebase se puede realizar un desarrollo acelerado de aplicaciones gracias a que no es necesario desarrollar la parte del servidor [73].

Por su parte, Firebase Realtime Database es un servicio de Firebase que permite almacenar y sincronizar los datos que se encuentran alojados en el Backend de Sigfox por medio de un Callback. Se trata básicamente de una base de datos NoSQL en la nube, que almacena los datos en formato JSON y los sincroniza en tiempo real con los clientes conectados manteniendo la disponibilidad de los mismos aun cuando la aplicación Web o Móvil no tengan conexión a internet [74]. Entre las funciones más relevantes se tiene:

- Tiempo real: cada vez que al Sigfox Backend llega un nuevo mensaje, los dispositivos conectados reciben dicha información en cuestión de milisegundos.
- Sin conexión: las aplicaciones enlazadas con Firebase continúan respondiendo cuando no haya conexión, gracias a que el SDK (i.e. Conjunto de herramientas de desarrollo software) permite que los datos continúen en el disco de cada aplicación y se actualicen rápidamente cuando se restablezca la conexión.
- Acceso desde dispositivos clientes: se puede acceder a la base de datos directamente desde un dispositivo móvil o un navegador web, sin necesidad de realizar ningún tipo de petición de un servidor de aplicaciones.

La sincronización del SigFox Backend con la base de datos de Firebase se realiza por medio de una URL de Callback; de esta manera se inician los atributos de interés como la carga útil del mensaje que será enviada de forma automática en formato JSON hacia la base de datos. En la figura 2.3.36, se indica el proceso para la configuración del Callback.

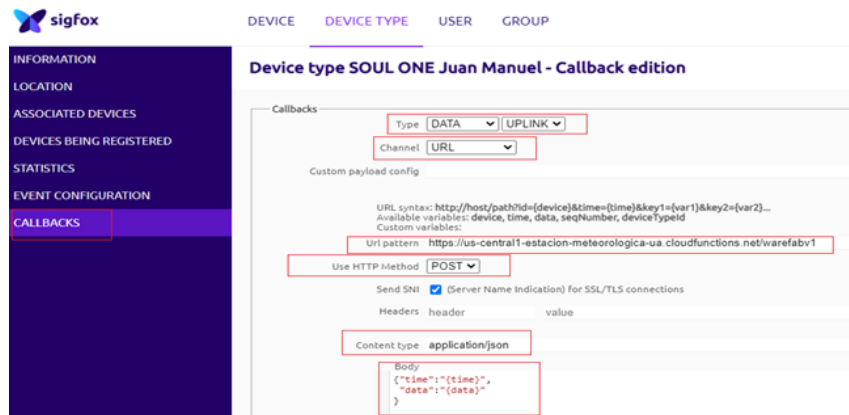


Figura 2.3.36 Configuración de Callback en SigFox Backend
Fuente: Propia

En esta pantalla, inicialmente, se debe cambiar el tipo de dato segundo el tipo de canal URL, después se escribir la URL proporcionada por Firebase Real Time Database en la consola de Windows, y finalmente cambiar el tipo de contenido a JSON. En la figura 2.3.37, se puede observar los primeros datos almacenados en la base de datos.

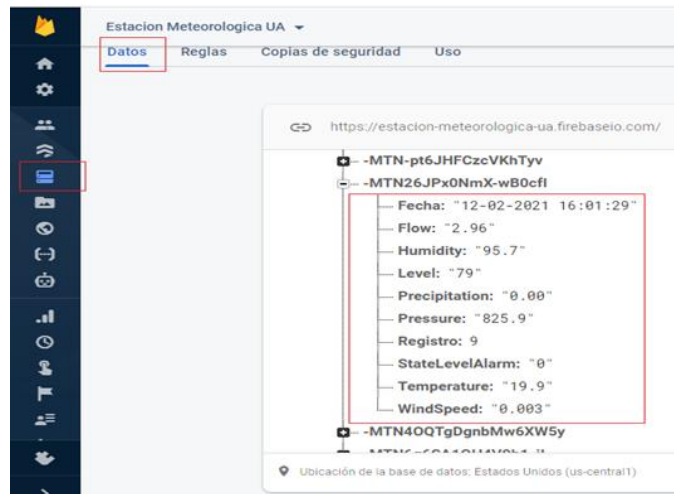


Figura 2.3.37 Prueba de enlace entre Realtime Database y SigFox Backend
Fuente: Propia

2.3.4. Bloque Medición Esclavo2

El Esclavo2 hace referencia al sensor BMP280 quien mide la presión barométrica con precisión y comunica los datos mediante la interfaz de comunicación I2C, cada que el Maestro se lo solicite. En la sección 2.2.6 se indica la manera en que se debe conectar al Maestro, y en la sección 2.3.6 se explica el funcionamiento lógico. Para la implementación desde Arduino se hace uso de la librería "Wire.h".

2.3.5. Bloque Almacenamiento

Para el almacenamiento de los datos en el punto de monitoreo como un sistema de respaldo, se empleó una memoria flash; este tipo de memoria permite la lectura y escritura de múltiples posiciones de memoria en la misma operación en tiempos de acceso más cortos que una memoria EEPROM (i.e. memoria ROM). Para su implementación en el presente estudio, se inserta en el Socket de memoria que integra la tarjeta Soul One, además, esta memoria se gestiona desde Arduino por medio de la interfaz de comunicación SPI haciendo uso de la librería "SPI.h".

2.3.6. Bloque Adquisición Maestro

El elemento de adquisición denominado como Maestro en la arquitectura I2C (i.e. Soul One), desarrolla tres procesos a saber: el primer proceso está relacionado con la lectura del sensor de presión barométrica BMP280 (i.e. Esclavo2) por medio del protocolo I2C; el segundo proceso está relacionado con el almacenamiento de los datos en la memoria flash; y el tercer proceso está relacionado con la transmisión de los datos hacia el Sigfox Backend.

2.3.7. Bloque Caso1 de transmisión

El caso uno en la transmisión, hace referencia a la comunicación de las variables hidroclimatológicas hacia el Sigfox Backend por parte del Maestro, bajo una frecuencia de diez minutos. En el diagrama de flujo de la figura 2.3.38, se explica el proceso lógico que realiza el Maestro para las peticiones a los esclavos, almacenamiento y comunicación de los datos.

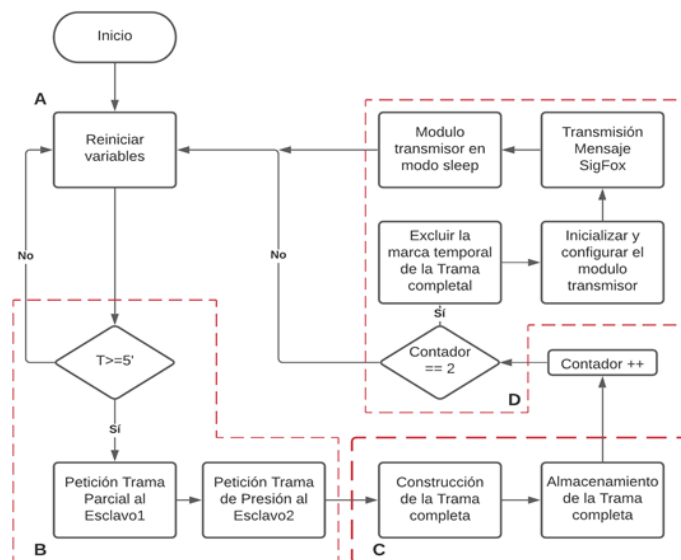


Figura 2.3.38 Lógica implementada por el Maestro para el almacenamiento y transmisión

Fuente: Propia

Sección A: en esta etapa se reinician las variables que contiene la Trama parcial y Trama de presión del Esclavo1 y Esclavo2, respectivamente.

Sección B: cada que el temporizador indique que han transcurrido cinco minutos desde la última petición realizada, nuevamente, el Maestro le solicita las tramas correspondientes a cada esclavo. La trama que envía el Esclavo1 contiene la marca temporal, voltaje de la batería y la lectura de los sensores a excepción del sensor de presión. La trama que envía el Esclavo2 contiene únicamente el valor de la presión atmosférica.

Sección C: después de recibir ambas tramas, el Maestro debe construir la Trama completa que será almacenada en la memoria flash y posteriormente transmitida hacia el Backend. La trama completa integra la Trama parcial y la Trama de presión.

Sección D: cuando el Maestro haya realizado la petición a los esclavos por segunda vez, lo cual quiere decir que han transcurrido diez minutos, primeramente, se debe excluir la marca temporal de la Trama completa, debido que esta información no se requiere transmitir. Una vez se tenga la trama preparada, se inicializa la comunicación con el módulo transmisor, se configura la frecuencia para la transmisión en modo Uplink y se prepara el canal de comunicación; finalmente se transmite la Trama completa (i.e. Mensaje Sigfox) hacia el SigFox Backend. Después de haber transmitido el mensaje, se lleva el módulo al modo de bajo consumo para ahorrar energía.

El mensaje enviado por el Maestro contiene los valores de las variables hidroclimatológicas y el voltaje de la batería, cifrados en el sistema Hexadecimal como se indica en la figura 2.3.39.



Figura 2.3.39 Trama completa enviada por el Maestro hacia el Sigfox Backend

Fuente: Propia

Payload: Como se puede observar, la trama está compuesta por veintidós dígitos hexadecimales, que corresponde a un tamaño de 11 Bytes (Payload). Básicamente la trama contiene la siguiente información, en el mismo orden:

- Temperatura.
- Humedad.
- Pulsos del anemómetro.
- Pulsos del pluviómetro.
- Nivel.
- Voltaje de la batería.
- Dirección del viento.
- Presión atmosférica.

2.3.8. Bloque Caso2 transmisión

El Caso dos en la transmisión, hace referencia a la comunicación de la Trama nivel por parte del Esclavo1 mediante el Breakout, cada vez que ocurre una transición en los niveles de alerta como se explica en la sección 2.2.4.

En síntesis, en este capítulo se presentaron las diferentes fases comprendidas en la fabricación del prototipo de estación de monitoreo, es decir, la construcción física, emplazamiento de la estación y la lógica en la medición, almacenamiento y transmisión de las variables, así como de los eventos que se presenten. Posteriormente, en el siguiente capítulo se explicará en detalle el tratamiento de los datos para la generación y visualización de la información.

3. CAPITULO 3: MÓDULO DE PRESENTACIÓN DE DATOS

Este capítulo presenta toda la información relacionada con el tratamiento de los datos comunicados por la estación de monitoreo para la generación de información, así como su almacenamiento y visualización en las aplicaciones Web y Móvil; para ello se ha definido un componente principal denominado como de visualización.

3.1. COMPONENTE DE VISUALIZACIÓN

En el diagrama de la figura 3.1.1, se identifican las conexiones, entradas y salidas de los bloques del componente de visualización.

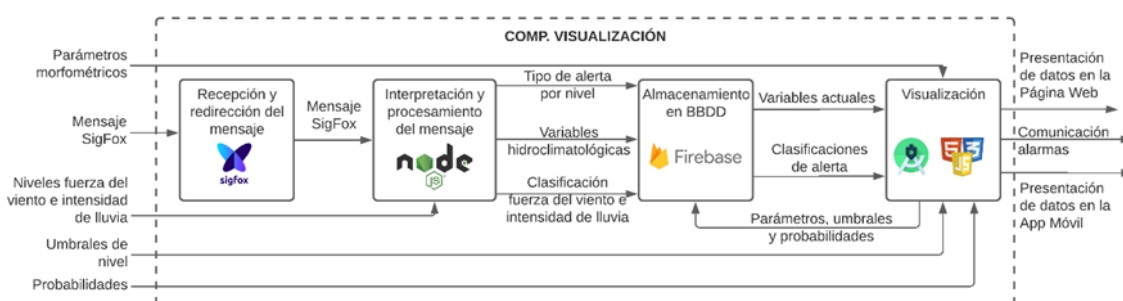


Figura 3.1.1 Estructura del componente de visualización

Fuente: Propia

3.1.1. Bloque Recepción y redirección

Como se describió en la sección 2.3.2, el Backend es la aplicación de Sigfox que almacena los mensajes transmitidos por el dispositivo final (i.e. Estación de monitoreo) y permite, por medio de una URL de Callback, redirigir los mensajes en formato JSON hacia las aplicaciones del cliente.

3.1.2. Bloque Interpretación y procesamiento

En esta etapa se desarrollan seis procesos a saber:

- el primer proceso está relacionado con la separación y transformación al formato decimal de la carga útil con el fin de asignar el valor correspondiente a cada variable;
- el segundo proceso está relacionado con la verificación de consistencia de los datos de acuerdo a los rangos establecidos para cada variable en la Nota Técnica 002 del IDEAM [75];
- el tercer proceso está relacionado con la identificación del estado de alerta de acuerdo a los rangos máximos y mínimos de nivel;
- el cuarto proceso está relacionado con la clasificación de la fuerza del viento de acuerdo a la escala de Beaufort;
- el quinto proceso está relacionado con la clasificación de la intensidad de lluvia de acuerdo a los rangos establecidos por el IDEAM; y

- el sexto proceso está relacionado con el desarrollo de las ecuaciones de flujo para la estimación del caudal.

Sin embargo, debido a que Sigfox Backend no permite comprender ni transformar la carga útil que se transmite en formato hexadecimal desde la estación de monitoreo, se decidió implementar la herramienta Node.js. Básicamente, se trata de un entorno en tiempo de ejecución multiplataforma del lado del servidor, de código abierto, para la capa del servidor basado en el lenguaje de programación Javascript, es asíncrono y con entrada/salida de datos en una arquitectura orientada a eventos [76]. Este programa se descarga gratuitamente desde el sitio oficial [76].

Para la implementación de Node.js fue necesario realizar el siguiente procedimiento: desde la consola de Node.js se inicia Firebase y se selecciona el proyecto creado en dicho servidor (i.e. Estación meteorológica UA), seguidamente se elige el lenguaje de programación mediante el cual se va a escribir las Cloud Functions que para este caso es Javascript. Dentro de las Cloud Functions se encuentra Onrequest, una función que permite escuchar los eventos que se generan cada vez que llega un nuevo mensaje al Backend.

El código para la fase de interpretación y procesamiento se desarrolla en el lenguaje Javascript por medio del editor Visual Studio Code. En la figura 3.1.2, se muestra el entorno del editor de código.

```

15 exports.warefabv1 = functions.https.onRequest((req, res) => {
16   //OBTENER PARAMETROS DE LA CUENCA LOCALIZADOS EN FIREBASE
17   > admin.database().ref("ParametrosCuenca").on("value", function(snap){...
56   });
57   //OBTENER UMBRALES DE NIVEL LOCALIZADOS EN FIREBASE
58   > admin.database().ref("UmbralesNivel").on("value", function(snap){...
75   });
76
77   const data = req.body.data || "Unknown";
78   console.log(data);
79
80   //Division de la trama principal en cada una de las variables, y obtener su valor transformado
81
82   i16tTemp = parseInt(data.slice(0, 3), 16);
83   i16tTemperature = i16tTemp/10;
84   i16tHum = parseInt(data.slice(3, 6), 16);
85   i16tVelV = parseInt(data.slice(6, 9), 16);
86   i16tWindSpeed = ((i16tVelV * 0.66)/600);
87   i16tPrec = parseInt(data.slice(9, 11), 16);
88   i16tPrecipitation = ((i16tPrec * 0.3));
89   i16tNivel = parseInt(data.slice(11, 14), 16);
90   i16tVBat = parseInt(data.slice(14,16),16);
91   i16tVBat = (i16tVBat / 10).toString();
92   i16tWindDirection = parseInt(data.slice(16,18),16);
93   > switch(i16tWindDirection){ ...
48   }
49   i16tPress = parseInt(data.slice(18, 22), 16);
50   i16tPressure = (i16tPress / 10).toString();

```

Figura 3.1.2 Desarrollo en Visual Studio para la fase de interpretación y procesamiento
Fuente: Propia

Debido a que desde la estación se comunican los pulsos del pluviómetro y anemómetro, se deben emplear las ecuaciones 3.1.1 y 3.1.2, respectivamente, para obtener el valor de cada variable.

$$Precipitación_{acumulada} = resoluciónP \times \#pulsos \quad 3.1.1$$

Donde;

- $Precipitación_{acumulada}$: es la precipitación acumulada en diez minutos.
- $resoluciónP$: es la resolución del pluviómetro descrita por el fabricante.

- *#pulsos*: es la cantidad de pulsos generados por el pluviómetro en diez minutos.

$$Velocidad\ del\ viento = \frac{resoluciónA \times \#pulsos}{t} \quad 3.1.2$$

Donde;

- *Velocidad del viento*: es la velocidad media del viento en diez minutos.
- *resoluciónA*: es la resolución del anemómetro descrita por el fabricante.
- *#pulsos*: es la cantidad de pulsos generados por el anemómetro en diez minutos.
- *t*: es el tiempo de muestreo medido en segundos, es decir 600s.

Con respecto a la dirección del viento, la cual se transmite desde la estación en una representación decimal de 0 a 8, se debe emplear la tabla 2.2.10 con el fin de obtener la dirección en que se origina el viento con respecto a los puntos cardinales.

Para la validación de consistencia de las variables hidroclimatológicas, se compara cada uno de los valores con respecto a los rangos de tolerancia descritos en la tabla 3.1.1, la cual fue construida con base a lo establecido en la Nota Técnica 002 del IDEAM [75]. Esta nota recomienda que se deben efectuar algunas revisiones con el fin de asegurar que las mediciones sean razonables, y aquellos que no cumplan las verificaciones se reemplazan por un valor Nulo.

Tabla 3.1.1 Rangos para la verificación de consistencia de las variables

Fuente: adaptada de [75]

VARIABLE	LIMITES DE TOLERANCIA
Temperatura del aire	-15 a 50°C
Humedad relativa del aire	0 a 100%
Dirección del viento	0 a 8 sectores
Velocidad del viento	0 a 80 m/s
Precipitación en 10 minutos	0 a 30mm
REGLAS	
No. 1	Una dirección del viento en calma (0), debe corresponder a una velocidad del viento igual a 0 m/s.
No. 2	Las direcciones del viento diferentes de calma (0), deben tener una velocidad diferente de 0 m/s.

Para la identificación del estado de alerta por nivel se emplean un conjunto de reglas y rangos preestablecidos, como se explica en la sección 2.2.4. Asimismo, para la clasificación de la fuerza del viento, se compara el valor de la velocidad del viento con respecto a los rangos establecidos en la tabla 3.1.2, la cual fue construida con base a la escala de Beaufort [50].

Tabla 3.1.2 Rangos para la clasificación de la fuerza del viento

Fuente: adaptada de [50]

FUERZA	RANGO [m/s]
CALMADO	$V < 0,555$
VENTOLINA	$0,555 \leq V < 1,388$
BRISA LIGERA	$1,388 \leq V < 5,277$
MODERADO	$5,277 \leq V < 11,111$
FUERTE	$11,111 \leq V < 19,444$

MUY FUERTE	19,444 <= V < 32,777
HURACANADOS	V > 32,777

Para la clasificación de la lluvia de acuerdo a su intensidad en una hora, primeramente, se debe calcular el valor de la intensidad en una hora mediante la ecuación 3.1.3, donde se obtiene una relación de proporcionalidad de diez minutos en una hora.

$$Intensidad_{Hora} = \frac{Precipitación_{acumulada} \times 60mins}{10mins} \quad 3.1.3$$

Donde;

- $Intensidad_{Hora}$: es la intensidad de la lluvia en una hora.

Después de obtener la intensidad en una hora, se compara con respecto a los rangos indicados en la tabla 3.1.3, la cual fue construida en conformidad a lo establecido por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET, del inglés) en [50].

Tabla 3.1.3 Clasificación de la lluvia según la intensidad media en una hora
Fuente: adaptada de [50]

INTENSIDAD	ACUMULACIÓN EN UNA HORA
Débil	entre 0,1 y 2mm
Moderado	entre 2,1 y 15mm
Fuerte	entre 15,1 y 30mm
Muy fuerte	entre 30,1 y 60mm
Torrencial	más de 60mm

Por último, para la estimación del caudal correspondiente al punto de monitoreo, se implementa el modelo matemático descrito en la sección 2.2.2, donde se utilizan ecuaciones de flujo que involucran las características morfométricas y físico-hidráulicas del área de estudio, en las que la variable independiente es el nivel del río. Una vez se terminan el proceso de interpretación y procesamiento, toda la información se almacena en la base de datos de Firebase empleando la misma URL de Callback.

3.1.3. Bloque Almacenamiento

Este elemento hace referencia a la base de datos de Firebase que se emplea en el presente estudio para almacenar toda la información que se genera en las diferentes etapas de interpretación, procesamiento y análisis de los datos. Asimismo, con el fin de facilitar el proceso de gestión de los datos, toda la información se organiza por categorías y de manera cronológica; para ello, se crean cinco tablas a saber: la primera, denominada "Alarmas", contiene toda la información relacionada con las alertas por nivel, clasificaciones de la intensidad de lluvia y las clasificaciones de la fuerza del viento; la segunda, denominada "MedidasHidroclimatologicas", contiene el valor de las variables hidroclimatológicas y el voltaje de la batería; la tercera, denominada "ParametrosCuenca", contiene los parámetros morfométricos y físico-hidráulicos que se emplean para la estimación del caudal desde Node.js; la cuarta, denominada "Probabilidades", contiene los resultados del modelo predictivo; y la

quinta, denominada “UmbralesNivel”, contiene los umbrales que se definen para identificar los estados de alerta por nivel. En la figura 3.1.3, se muestra las respectivas tablas.

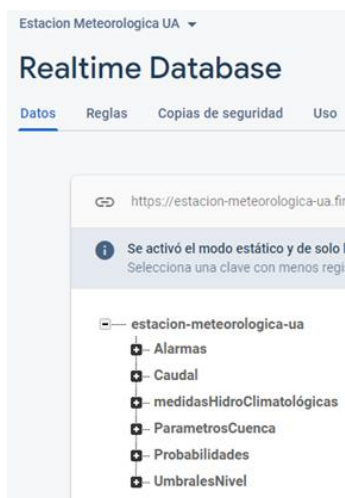


Figura 3.1.3 Tablas de la base de datos Realtime Database
Fuente: Propia

La información que se escribe en la base de datos se realiza desde dos aplicaciones, el Node.js y la App Móvil; para ello, desde cada aplicación se debe definir tres parámetros importantes en el archivo JSON: la referencia o nombre de la tabla donde se desea escribir, la etiqueta de la tabla en la que se desea escribir y el contenido a escribir; tal como se indica en la figura 3.1.4.

```
303
304
305     .database()
306     .ref("/medidasHidroClimatológicas")
307     .push().set({
308         Registro: registro,
309         Fecha: fechaYhora,
310         Temperature: i16Temperature2,
311         Humidity: i16Humidity2,
312         Level: i16Level3,
313         Flow: i16Flow,
314         Precipitation: i16Precipitation2,
315         WindSpeed: i16WindSpeed2,
316         WindDirection: i16WindDirection2,
317         Pressure: i16Pressure,
318         VBateria: i16VBat
319     })
320     .then(() => res.json("add-satisfactory"))
321     .catch((err) => res.status(400).json("The Errors:" + err));
```

Figura 3.1.4 Método para escribir en la base de datos desde Node.js
Fuente: Propia

La generación de las tablas en la base de datos, se realiza de manera automática a medida que se escribe información relacionada con cada una de ellas. Por ejemplo, en la figura 3.1.5, se muestra la tabla “MedidasHidroclimatologicas” con cada una de sus etiquetas, la cual es generada desde Node.js.



Figura 3.1.5 Etiquetas de la tabla "MedidasHidroclimatologicas" de la base de datos Realtime Database
Fuente: Propia

Para que sea posible la representación de la información almacenada en la base de datos, en las aplicaciones Web y Móvil; se debe crear un enlace entre el servidor Firebase y dichas aplicaciones. Este procedimiento se realiza a través de un formulario que aparece en el momento de agregar cada una de las aplicaciones dentro del proyecto creado en el servidor denominado como "Estación Meteorológica UA". Para el enlace de la App Móvil, primeramente, se escribe el nombre del paquete de la aplicación; después se descarga el archivo de configuración (Google.service.json), el cual es requerido para generar el enlace entre el servidor y la aplicación; y por último, se agrega el SDK del servidor tanto a nivel de proyecto como a nivel de app en el proyecto creado en Android Studio; tal como se indica en la figura 3.1.6.



Figura 3.1.6 Enlace entre el servidor Firebase y la App Móvil
Fuente: Propia

Para el enlace de Firebase con la aplicación Web, primeramente, es necesario asignarle el nombre a la aplicación y después copiar el SDK de Firebase que se deberá introducir en el archivo donde se editó del código de la aplicación.

3.1.4. Bloque Visualización

En esta etapa se desarrollaron las aplicaciones Web y Móvil por medio de las cuales se representa la información almacenada en la base de datos Realtime Database, atendiendo a los requerimientos técnicos descritos en el Anexo B. De igual forma, las definiciones, elementos, dispositivos, sistemas operativos, lenguajes de programación y plataformas de desarrollo, necesarias para el desarrollo de la aplicación Web y Móvil, están contenidas en el Anexo E.

3.1.4.1. Desarrollo de la aplicación móvil

La metodología implementada para el desarrollo de la aplicación Android del presente estudio, se encuentra basada en la guía para el desarrollo mediante la plataforma Android Studio, figura 3.1.7.



Figura 3.1.7 Guía para el desarrollo móvil mediante Android Studio
Fuente: tomado de [77]

- **Instalación de software**

Para llevar a cabo el desarrollo de la aplicación mediante la plataforma Android Studio, se requiere, primeramente, realizar la instalación de los programas listados en la tabla 3.1.4, los cuales se descargaron de las páginas oficiales de Oracle y Android Studio.

Tabla 3.1.4 Programas para el desarrollo de la aplicación Android
Fuente: Propia

PROGRAMA	DESCRIPCIÓN
IDE Android Studio	Plataforma para el desarrollo móvil en Android
SDK	Permite implementar el emulador y algunas herramientas de depuración

JDK

Permite implementar las bibliotecas API y las herramientas que posibilitan la creación, prueba y depuración de las aplicaciones; además, encargado de compilar la app incluyendo todos sus recursos y ficheros en un archivo con extensión APK

- **Emulador**

El emulador AVD de Android, proporciona casi todas las funciones de un dispositivo Android real, lo cual permite probar la App en diferentes dispositivos y niveles de API de Android sin necesidad de un dispositivo real.

- **Diseño navegacional de la aplicación**

El diagrama de bloques de la figura 3.1.8, describe de manera general el contenido de cada pantalla y la manera de acceder a cada una de ellas; asimismo, permite comprobar que la aplicación provee toda información requerida por el sistema de visualización del presente estudio. En la figura 3.1.8, “HC”: denota hidroclimatológicas y “Rg”: representación gráfica.

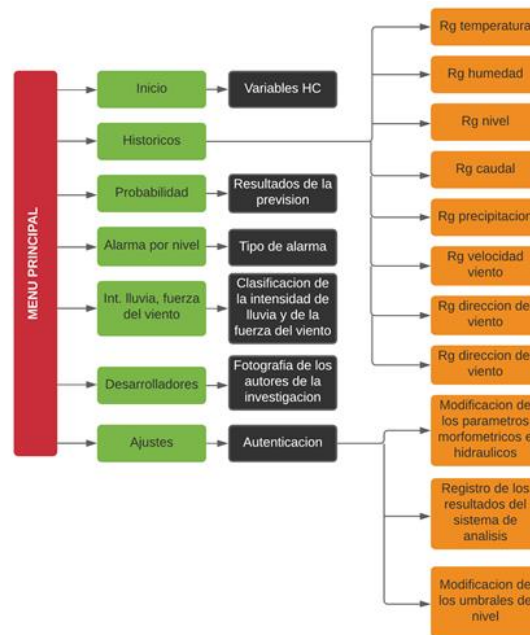


Figura 3.1.8 Diagrama navegacional de la App móvil
Fuente: Propia

- **Pantalla Inicio**

Esta pantalla, como se indica en la figura 3.1.14 a, es la encargada de mostrar los valores actuales de las variables hidroclimatologicas, además de comunicar las diferentes alarmas a través de correo electrónico y notificaciones a los usuarios competentes.

El diagrama de la figura 3.1.9, ilustra cada uno de los procesos que se desarrollan en la pantalla Inicio.

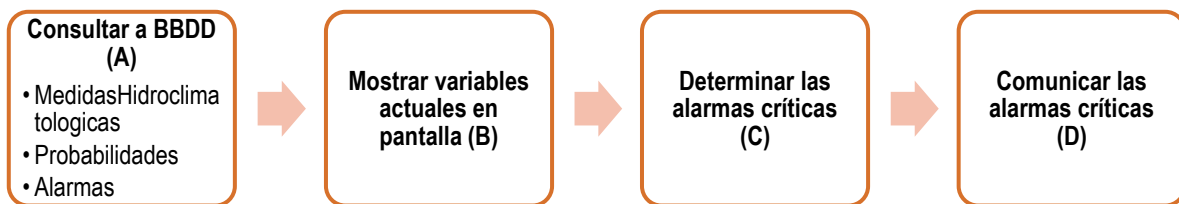


Figura 3.1.9 Procesos de la pantalla Inicio
Fuente: Propia

Sección A: de manera inicial, se realiza la respectiva consulta a cada una de las tablas de la base de datos (i.e. MedidasHidroclimaticas, Probabilidades, Alarmas) cada vez que se detectan elementos nuevos o elementos agregados, por medio del objeto de escucha “ChildEventListener” quien a su vez proporciona el método de consulta “onChildAdded()”.

Sección B: después de obtener el contenido de la tabla “MedidasHidroclimaticas” y asignar cada etiqueta a una referencia distinta, se representa el valor actual de las variables en pantalla por medio de WIDGET (e.g. TextView).

Sección C: después de obtener el contenido de las tablas “Probabilidades” y “Alarmas”, se determina si se presenta una alarma critica por cualquiera de las siguientes razones:

- Alerta roja por nivel máximo.
- Alerta roja por nivel mínimo.
- Cuando la probabilidad de que ocurra algún tipo de evento supera el 90%.
- Cuando la fuerza del viento se clasifica como fuerte (i.e. Vendaval).
- Cuando la intensidad de lluvia se clasifica como torrencial.

Sección D: finalmente, si cualquiera de las condiciones expuestas anteriormente se cumple, entonces se comunica el estado de alarma, por correo electrónico o notificación en el mismo dispositivo, a usuarios competentes (e.g. Organismos de socorro).

• Pantalla Históricas

Esta pantalla, como se muestra en la figura 3.1.14 b, se encarga de representar gráficamente las series de tiempo correspondientes a cada una de las variables hidroclimáticas.

El diagrama de la figura 3.1.10, ilustra cada uno de los procesos que se desarrollan en la pantalla Históricas.



Figura 3.1.10 Procesos de la pantalla Históricas
Fuente: Propia

Sección A: de manera inicial, se realiza la respectiva consulta a la tabla “MedidasHidroclimaticas” de la base de datos, cada vez que se detectan elementos nuevos o elementos agregados, por medio

del objeto de escucha “ChildEventListener” quien a su vez proporciona el método de consulta “onChildAdded()”.

Sección B: después de obtener los datos correspondientes a cada una de las series de tiempo de las variables hidroclimatológicas, se grafican en pantalla por medio de la librería “HelloCharts” para Android, la cual se debe descargar desde el repositorio GitHub [78], e importar en las dependencias del “Module app” de Android Studio.

- **Pantalla Probabilidades**

Esta pantalla, como se indica en la figura 3.1.14 c, se encarga de mostrar los resultados del modelo predictivo, que corresponde a la probabilidad de que ocurra alguno de los eventos que históricamente han generado mayor impacto y presentado mayor recurrencia en el municipio de Popayán; igualmente, muestra el tipo de alerta según el porcentaje de probabilidad.

El diagrama de la figura 3.1.11, ilustra cada uno de los procesos que se desarrollan en la pantalla Probabilidades.



Figura 3.1.11 Procesos de la pantalla Probabilidades

Fuente: Propia

Sección A: de manera inicial, se realiza la respectiva consulta a la tabla “Probabilidades” de la base de datos, cada vez que se detectan elementos nuevos o elementos agregados, por medio del objeto de escucha “ChildEventListener” quien a su vez proporciona el método de consulta “onChildAdded()”.

Sección B: después de obtener el porcentaje de probabilidad de cada evento, se determina el tipo de alerta de acuerdo a los rangos establecidos en la tabla 3.1.5.

Tabla 3.1.5 Rangos de probabilidad para el tipo de alerta

Fuente: Propia

TIPO DE ALERTA	RANGO
Verde	Porcentaje <= 50%
Amarilla	50% < Porcentaje <= 70%
Naranja	70% < Porcentaje <= 90%
Roja	Porcentaje > 90%

Sección C: finalmente, después de haber determinado el tipo de alerta para cada evento, se representan en pantalla los porcentajes de probabilidad y los tipos de alerta, por medio de WIDGET (e.g. TextView).

- **Pantalla Alarma por nivel**

Esta pantalla, como se indica en la figura 3.1.14 d, se encarga de mostrar el tipo de alerta por nivel.

El diagrama de la figura 3.1.12, ilustra cada uno de los procesos que se desarrollan en la pantalla Alarma por nivel.

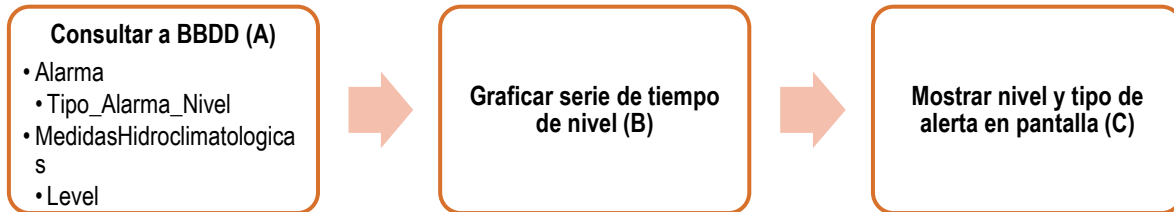


Figura 3.1.12 Procesos de la pantalla Alarma por nivel
Fuente: Propia

Sección A: de manera inicial, se realiza la consulta de la etiqueta “Tipo_Alerta_Nivel” de la tabla “Alarma” y la etiqueta “Level” de la tabla “MedidasHidroclimatologicas”, cada vez que se detectan elementos nuevos o elementos agregados, por medio del objeto de escucha “ChildEventListener” quien a su vez proporciona el método de consulta “onChildAdded()”. La etiqueta “Tipo_Alerta_Nivel” contiene las clasificaciones del tipo de alerta por nivel que se realiza desde Node.js.

Sección B: después de obtener los datos correspondientes a la serie de tiempo de nivel, se grafica en pantalla por medio de la librería “HelloCharts”.

Sección C: finalmente, después de obtener el tipo de alerta por nivel y el valor actual de nivel, se representa en pantalla por medio de WIDGET (e.g. TextView).

- **Pantalla Intensidad de lluvia y fuerza del viento**

Esta pantalla, como se indica en la figura 3.1.14 e, se encarga de mostrar las clasificaciones de la intensidad de lluvia y de la fuerza del viento que se realizaron desde Node.js.

El diagrama de la figura 3.1.13, ilustra cada uno de los procesos que se desarrollan en la Pantalla Intensidad de lluvia y fuerza del viento.

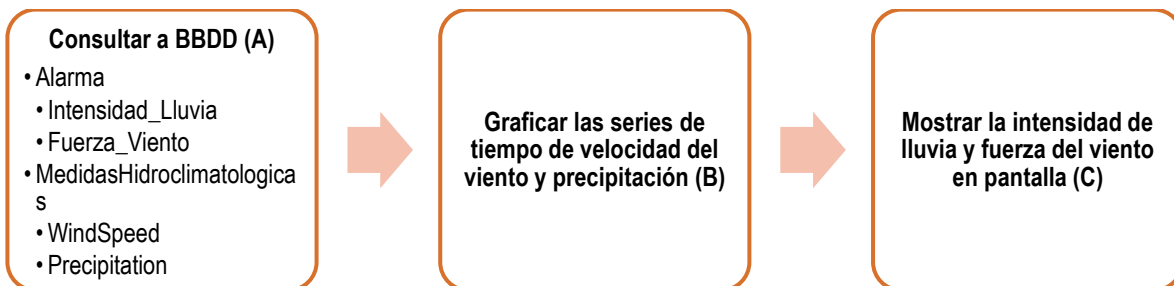
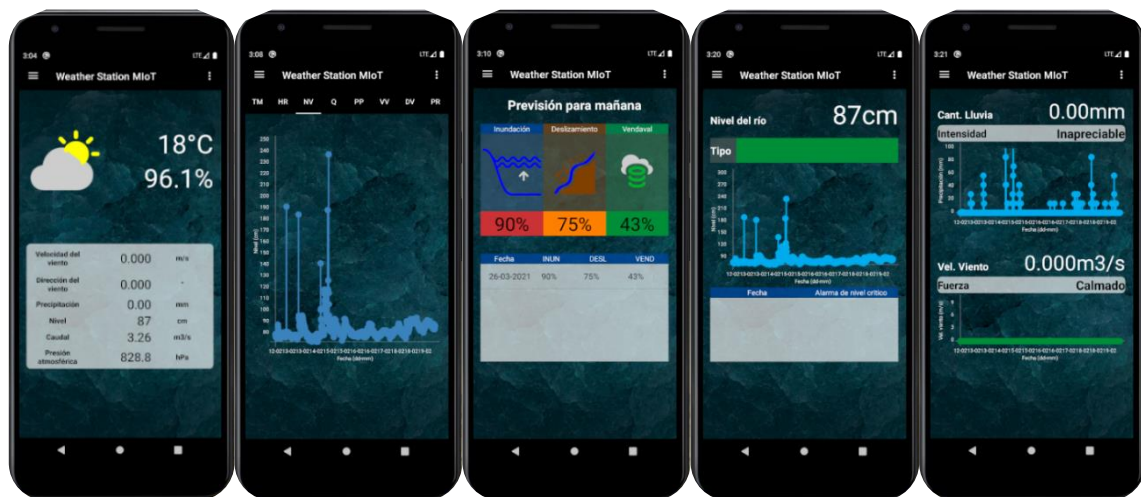


Figura 3.1.13 Procesos de la pantalla Intensidad de lluvia y fuerza del viento
Fuente: Propia

Sección A: primeramente, se realiza la consulta de las etiquetas “Intensidad_Lluvia” y “Fuerza_Viento” de la tabla “Alarma” y las etiquetas “WindSpeed” y “Precipitation” de la tabla “MedidasHidroclimatologicas”, cada vez que se detectan elementos nuevos o elementos agregados, por medio del objeto de escucha “ChildEventListener” quien a su vez proporciona el método de consulta “onChildAdded()”.

Sección B: después de obtener los datos correspondientes a las series de tiempo de velocidad del viento y precipitación, se grafican en pantalla por medio de la librería “HelloCharts”.

Sección C: finalmente, después de obtener las clasificaciones de intensidad de lluvia y fuerza del viento, se representa en pantalla por medio de WIDGET (e.g. TextView).



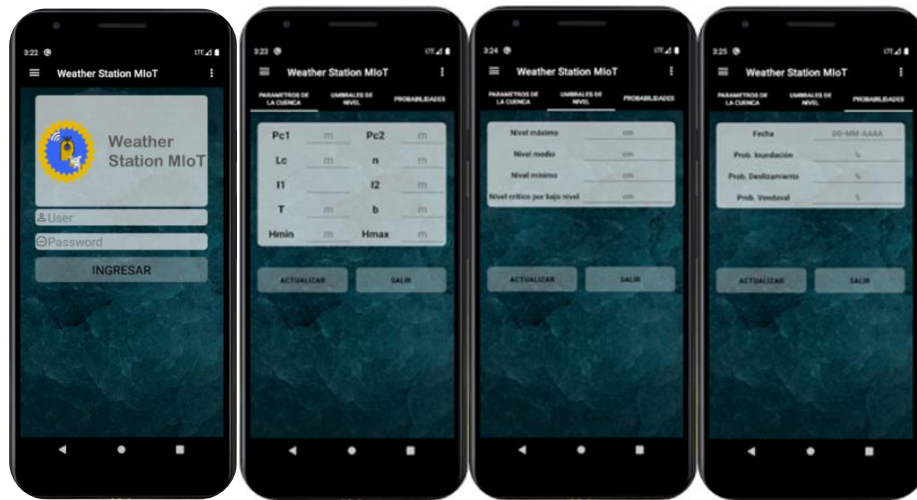
a. Inicio b. Históricos c. Probabilidades d) Alarma por nivel e. Int. Lluvia, fuerza del viento

Figura 3.1.14 Pantallas App Móvil

Fuente: Propia

- **Pantalla Ajustes**

Esta sección contiene cuatro pantallas: la pantalla Autenticación que se encarga de restringir el acceso a los ajustes de parámetros, figura 3.1.15 a; y las tres pantallas que permiten agregar y modificar datos en la base de datos por medio del método set(), figura 3.1.15 b, c, d.



a. autenticación

b. P. Morfométricos

c. Umbral de nivel

d. Resultados

Figura 3.1.15 Pantalla Ajustes

Fuente: Propia

b. Pantalla Parámetros morfométricos

En esta pantalla, el usuario puede cambiar los parámetros morfométricos y físico-hidráulicos cada vez que se desplace la estación a un nuevo punto de monitoreo. Estos parámetros se almacenan en la tabla “ParametrosCuenca” de la base de datos.

c. Pantalla Umbral de nivel

El usuario puede modificar los umbrales de nivel correspondientes al nuevo punto de monitoreo. Estos umbrales se almacenan en la tabla “UmbralNivel” de la base de datos.

d. Resultados

En este caso, el usuario puede ingresar los resultados del modelo predictivo, es decir, las probabilidades de ocurrencia de cada evento. Estas probabilidades se almacenan en la tabla “Probabilidades” de la base de datos.

- **Pantalla Desarrolladores**

Por último, esta pantalla, figura 3.1.16, contiene la información académica de los autores de la investigación y el logo de los colaboradores.



Figura 3.1.16 Pantalla Desarrolladores
Fuente: Propia

3.1.4.2. Desarrollo de la aplicación Web

Al tratarse de una página Web de un sistema de monitoreo de variables hidroclimáticas, se establecieron cinco secciones que contuvieran información relacionada con el conocimiento del riesgo de desastres, sobre el valor actual de las variables hidroclimáticas, sobre la información general de la investigación, sobre la información de los desarrolladores y, por último, un bloque que proporcionara un canal de comunicación; como se indica en el diagrama de bloques de la figura 3.1.17.

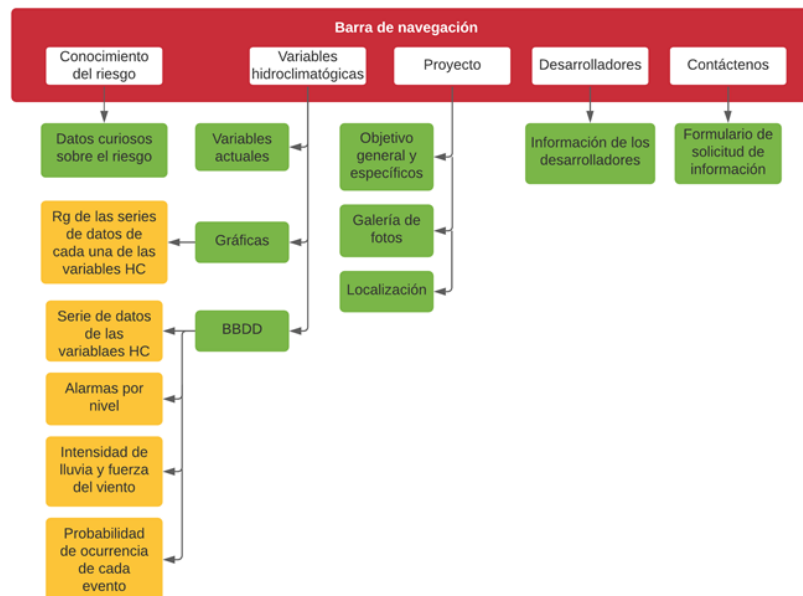


Figura 3.1.17 Diagrama navegacional de la aplicación Web
Fuente: Propia

Con el fin de ahorrar tiempos de descarga se dividió el sitio web en tres páginas: la primera dispone de un diseño de navegación básicamente lineal siguiendo el recorrido a lo largo de las secciones establecidas, la cual contendría información básica y liviana como datos curiosos, variables actuales, objetivos, galería de fotos, localización, información de los desarrolladores y el formulario para la solicitud de información; la segunda contendría la representación gráfica de las series de datos de cada una de las variables hidroclimatológicas; y la tercera contendría las diferentes tablas creadas en la BBDD, las cuales pueden ser descargadas en formato CSV.

- **Sección Conocimiento del riesgo**

En los procesos de gestión del riesgo es indispensable adoptar medidas que permitan empoderar a los ciudadanos, promoviendo la solidaridad social y la participación voluntaria. Una sociedad bien informada mejora la capacidad de actuar responsablemente; es por eso que esta sección tiene como finalidad brindar información acerca de los eventos hidrometeorológicos con respecto a sus causas y consecuencias, y las medidas que permiten mitigar estos impactos y adaptarse a los efectos de la variabilidad y cambio climático en la región. En la figura 3.1.18, se puede observar la sección donde se presentan datos de interés relacionados con el conocimiento del riesgo.



Figura 3.1.18 Sección de conocimiento del riesgo

Fuente: Propia

- **Sección Variables hidroclimatológicas**

Esta sección, figura 3.1.19, tiene como finalidad brindar información referente a los valores actuales de cada una de las variables hidroclimatológicas, actualizándose cada que se detectan elementos nuevos o elementos agregados en la base de datos; de igual manera, proporciona el acceso a la representación gráfica de las series de tiempo de cada variable y el acceso a las diferentes tablas generadas en la BBDD.

VARIABLES HIDROCLIMATOLÓGICAS

18°C 96.1%

Nivel 262cm	Caudal 3,26m3/s	Precipitación 0.00mm	Velocidad del viento 0.000m/s	Dirección del viento NE	Presión atmosférica 828.8hPa
-----------------------	---------------------------	--------------------------------	---	-----------------------------------	--

Graficas Bases de datos

Figura 3.1.19 Sección Variables hidroclimáticas
Fuente: Propia

En la figura 3.1.20, se muestra, a manera de ejemplo, la representación gráfica del comportamiento de la temperatura.

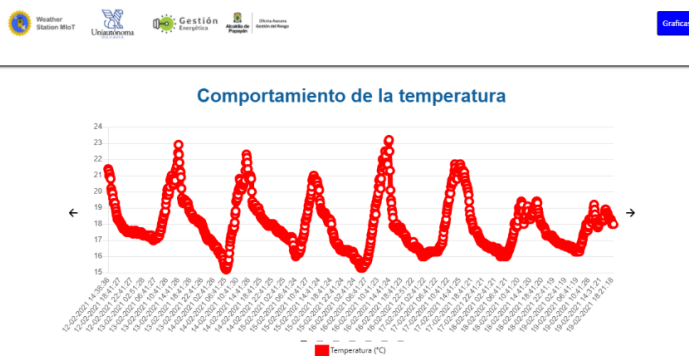


Figura 3.1.20 Representación gráfica del comportamiento de la temperatura en Campo Real
Fuente: Propia

En la figura 3.1.21, se ilustra una de las tablas creadas en la BBDD, la cual contiene las series de tiempo de cada una de las variables hidroclimáticas.

Weather Station Miot | Universidad | Gestión Energética | Oficina Asesora de Planeación | Bases de datos

Medidas HidroClimatológicas

Registro	Fecha	Temperatura (°C)	Humedad del aire (%)	Velocidad del viento (m/s)	Dirección del viento (°)	Precipitación (mm)	Nivel (cm)	Caudal (m³/s)	Presión (hPa)
1	12-02-2021 14:30:36	21.4	80.4	0.011	0.011	0.00	79	3.26	828.1
2	12-02-2021 14:45:35	21.3	79.3	0.000	0.000	0.00	79	3.26	828
3	12-02-2021 14:56:35	21	85.2	0.000	0.000	0.00	80	3.26	829.9
4	12-02-2021 15:11:27	21.1	81	0.000	0.000	0.00	77	3.26	829.8

Figura 3.1.21 Tabla "MedidasHidroclimaticas" vista desde la Página Web
Fuente: Propia

- **Sección Proyecto**

Esta sección, figura 3.1.22, contiene información relacionada con la investigación, con el fin de dar a conocer el objetivo general, objetivos específicos, ubicación del punto de monitoreo La Violeta y la galería de fotos donde se muestran los resultados de algunas actividades de campo (figura 3.1.23).



Figura 3.1.22 Sección Proyecto
Fuente: Propia



Figura 3.1.23 Sección Galería de fotos
Fuente: Propia

- **Sección Desarrolladores y Formulario de contacto**

Por último, estas secciones, figuras 3.1.24 y 3.1.25, además de brindar información sobre los desarrolladores de la investigación (i.e. Estudiantes, director y codirector), posibilita la solicitud, por parte de los usuarios en general, de todos los datos recopilados por el sistema.



Figura 3.1.24 Sección Desarrolladores de la investigación
Fuente: Propia



Figura 3.1.25 Sección Formulario de contacto
Fuente: Propia

En síntesis, en este capítulo se presentaron las diferentes fases relacionadas con la transformación e interpretación del mensaje, así como el almacenamiento y visualización de los valores de las variables, de las diferentes alertas y resultados del modelo predictivo. A continuación, en el siguiente capítulo se explicará en detalle el desarrollo y preparación del modelo predictivo, el cual será sometido a prueba en la fase de evaluación y despliegue.

4. CAPÍTULO 4: MÓDULO DE ANÁLISIS DE DATOS

La observación, interpretación y análisis de los datos, es una de las etapas más importantes de cualquier sistema de alertas tempranas, que concederá finalmente el poder a las personas y a las comunidades, amenazadas por riesgo de desastres, para actuar con el tiempo suficiente y de una manera apropiada, con el fin de reducir los daños y perjuicios que generalmente causan este tipo de emergencias.

De acuerdo a lo anterior, en este capítulo se presenta toda la información relacionada con el sistema de análisis de datos, donde se implementa un modelo predictivo que parte del análisis del vínculo histórico entre los factores intrínsecos que intervienen en la generación de los eventos de mayor impacto y recurrencia, y la distribución de estos procesos. La hipótesis que se intenta validar por medio de este modelo, es el principio de uniformidad, es decir que, para el área estudiada, los eventos ocurrirán, en promedio, bajo las mismas circunstancias y debido a las mismas condiciones en que fueron desencadenados en el pasado.

4.1. COMPONENTE DE ANÁLISIS

El modelo predictivo del presente estudio, está basado en una Red Neuronal Auto-regresiva con Entradas Exógenas (NNARX, del inglés), que ha demostrado ser superiormente eficaz en cuanto a generalización, velocidad de convergencia y aprendizaje, con respecto a otros modelos de Redes Neuronales [79] y modelos lineales [80]. La comparación del rendimiento del modelo NNARX con respecto a otros, en el modelado de sistemas dinámicos altamente no lineales como las inundaciones, se describe en detalle en el Anexo F; de igual manera, el mismo anexo también contiene la comparación de los diferentes algoritmos de aprendizaje, métodos de aprendizajes, funciones de activación y la cantidad recomendada de capas ocultas para este tipo de aplicaciones.

En síntesis, en el presente estudio se eligió implementar un modelo NNARX para la predicción de eventos de mayor impacto y recurrencia en el municipio de Popayán, mediante las siguientes técnicas: para el entrenamiento y prueba de la red se utilizó el algoritmo Levenberg-Marquardt (LM), que ha demostrado ser más eficiente y rápido que otros métodos [81] y [82], además de ser muy recomendado en aplicaciones donde el aprendizaje es supervisado [83]; el método de aprendizaje es supervisado, que igualmente ha sido considerado en varios estudios por ser generalmente superior a otros métodos en el reconocimiento de eventos complejos como las inundaciones, debido a la disponibilidad de datos históricos sobre los parámetros de entrada y salida [84]; la función de activación tipo Sigmoidal para la capa oculta y la capa de salida; por último, para la simulación del modelo neuronal se utiliza la herramienta MATLAB Neural Network Toolbox. En el diagrama de la figura 4.1.1, se identifican las conexiones, entradas y salidas de los bloques del componente de análisis que, a su vez, corresponden al proceso de entrenamiento y prueba de la red neuronal.

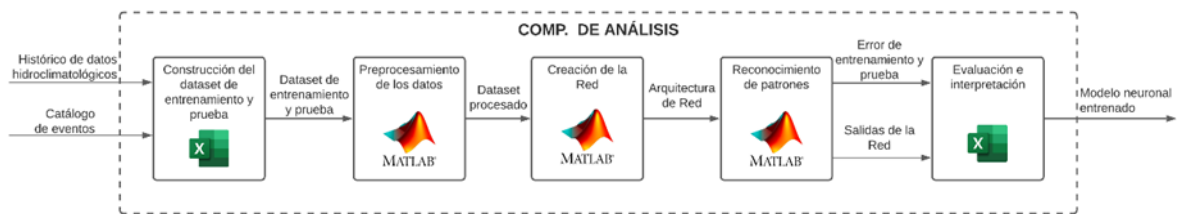


Figura 4.1.1 Estructura del componente de análisis
Fuente: Propia

4.1.1. Bloque Construcción del dataset

En la construcción del dataset destinado para el entrenamiento y prueba de la red NNARX, el cual debe contener el histórico de las variables hidroclimáticas y los eventos de mayor impacto y recurrencia organizados de manera cronológica, se desarrollan dos procesos a saber: el primero está relacionado con la recopilación y la organización de la información, y el segundo con la identificación de los eventos de mayor impacto y recurrencia.

4.1.1.1. Recopilación y organización de la información

En primer lugar, se investigaron las entidades del orden nacional, regional o local que hayan elaborado proyectos y estudios en el municipio de Popayán asociados con el monitoreo remoto de variables hidroclimáticas, y aquellas relacionadas con la gestión del riesgo de desastres; donde se identificaron entidades como el Instituto de Estudios Ambientales - IDEAM, la empresa de Acueducto y Alcantarillado de Popayán, Datos Abiertos de Colombia, el Servicio Geológico Colombiano - SGC, la Corporación Autónoma Regional - CRC, los organismos de socorro, la Oficina Asesora para la Gestión del Riesgo de desastres - OAGRD de la Alcaldía Municipal, y los medios de comunicación por escrito como el periódico El Nuevo Liberal.

En síntesis, de todas las fuentes anteriormente expuestas, el histórico de los datos hidrológicos y climatológicos se obtuvo a partir de la información proporcionada por el Sistema de Información para la Gestión de Datos de Hidrología y Meteorología – DHIME del IDEAM, y gracias a la colaboración del Acueducto de Popayán en coordinación con la Fundación Procuencia Río las Piedras, quien facilitó el consolidado de históricos de las estaciones hidroclimáticas que disponen sobre la subcuenca Río Molino. Asimismo, para la recopilación de los eventos (i.e. De tipo hidrológico, meteorológico o geológico) que han ocurrido desde la historia en el municipio de Popayán, se consultó el portal del SIMMA - SGC y el portal de datos abiertos de Colombia.

Para la selección de las estaciones se tuvo en cuenta el tipo de modelo predictivo, donde la precisión del sistema se encuentra, en gran medida, determinado por el volumen y la calidad de los datos; por esta razón, se eligieron las estaciones que disponían de mayor longitud de registros de las variables de interés. En la tabla 4.1.1, se presenta la información sobre las estaciones del IDEAM y del Acueducto que fueron elegidas en el presente estudio para construir el dataset de históricos; y en la figura 4.1.2, se muestra la respectiva localización.

Tabla 4.1.1 Estaciones del IDEAM y Acueducto para la construcción del dataset de históricos

Fuente: Propia

NOMBRE	CATEGORÍA	LATITUD	LONGITUD	AREA HIDROGRÁFICA
IDEAM				
EL TABLAZO - AUT	Climática Principal	2,474833	-76,581294	Alto Río Cauca
PUENTE CARRETERA	Limnimétrica	2,447722	-76,513972	Alto Río Cauca
AEROPUERTO G L VALENCIA	Sinóptica Principal	2,452889	-76,608750	Alto Río Cauca
ACUEDUCTO Y FUNDACIÓN PROCUENCA RIO LAS PIEDRAS				
FLORENTINO SANCHEZ	Climática Ordinaria	2,440258	-76,566153	Río Molino
BOCATOMA MOLINO	Pluviométrica	2,439922	-76,573822	Río Molino

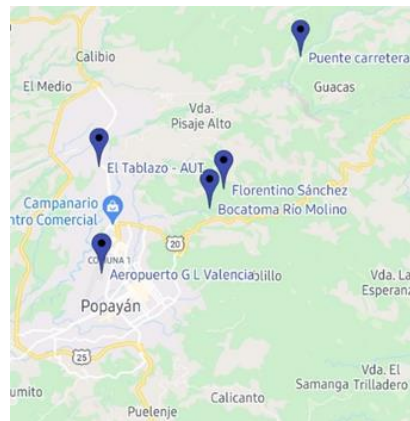


Figura 4.1.2 Localización de las estaciones analizadas del IDEAM y Acueducto

Fuente: Propia

De la información recopilada se obtuvo la siguiente información: la estación Puente Carretera dispone de históricos de nivel y caudal medio diario desde el año 1999 hasta el 2020; la estación Aeropuerto GL Valencia dispone de registros históricos de temperatura máxima y mínima diaria desde el año 1999 hasta el 2020; la estación El Tablazo dispone de históricos de humedad relativa y velocidad del viento media diaria desde el año 2006 hasta el 2020; la estación Bocatoma Río Molino dispone de históricos de caudal y nivel medios diarios desde el 2009 hasta el 2019; por último, la estación Florentino Sánchez dispone de históricos de precipitación total y temperatura máxima y mínima diaria desde el año 2013 hasta el 2019.

Cada una de estas series de tiempo presentan intervalos de no registro que se identifican como datos faltantes o brechas en la representación gráfica de cada una de ellas, figura 4.1.3; por este motivo, es preciso realizar un proceso de reconstrucción de datos con el fin de obtener un dataset completo que permita realizar un análisis con mayor precisión. La interpolación es una de las técnicas más comunes para el relleno de datos faltantes, que permite obtener nuevos datos a partir de un conjunto de datos conocidos [85]; no obstante, para implementar dicha técnica y obtener datos correctos es imperioso que existan registros antes y después de cada brecha.

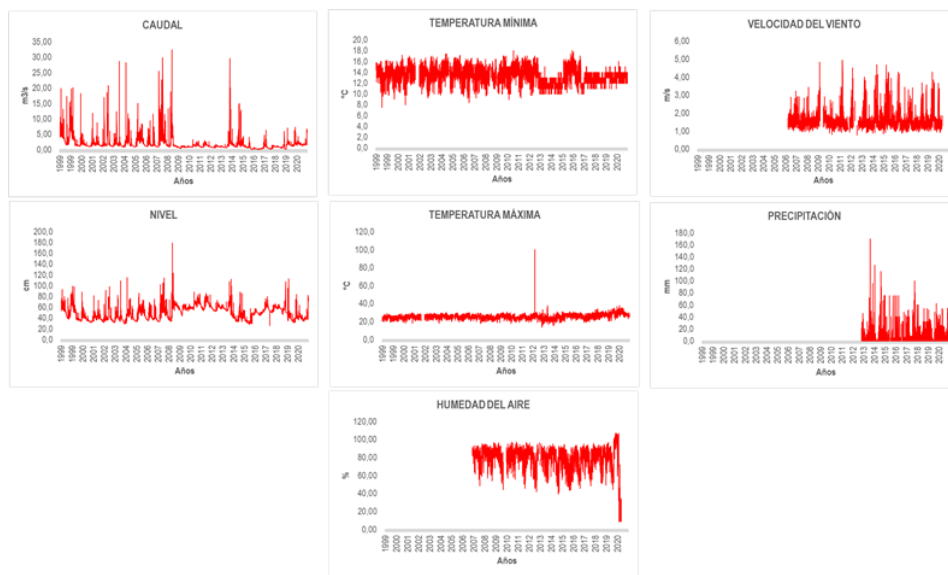


Figura 4.1.3 Conjuntos de datos recopilados del IDEAM y Acueducto
Fuente: Propia

De acuerdo a lo anterior, el dataset de históricos estaría determinado por la serie temporal que presente el periodo de registro más corto; de esta manera se podría construir un conjunto de datos completo y coherente, por medio del método de interpolación. Al ser 2013-2019 el periodo de registro más corto, correspondiente a la estación Florentino Sánchez, se escoge este, como el periodo de tiempo en el que se construye el dataset que contiene los históricos de variables hidroclimatológicas y los eventos históricos.

4.1.1.2. Eventos de mayor impacto y recurrencia

SIMMA es un sistema que permite, entre otras, consultar los movimientos en masa ocurridos a nivel de límite nacional, departamental y municipal [86]; de esta manera, fue posible recolectar un total de 219 movimientos en masa ocurridos en el municipio de Popayán desde el año 1915 hasta 2018.

De igual forma, el portal de datos abiertos de Colombia [87] dispone de cinco bases de datos que contienen los eventos ocurridos y su impacto a escala departamental y municipal, denominadas: “Desastres naturales desde 1999 a 2013 Colombia”, “Emergencias naturales Colombia 2016”, “Emergencias 2017”, “Emergencias UNGRD 2018” y “Emergencias UNGRD 2019”. De estas bases de datos se seleccionaron, únicamente, los eventos de tipo hidrológico, meteorológico y geológico, a nivel municipal; donde se obtuvo que, en el municipio de Popayán se han presentado, durante el periodo 1999-2019, un total de 88 emergencias; tal como se representa en la figura 4.1.4.

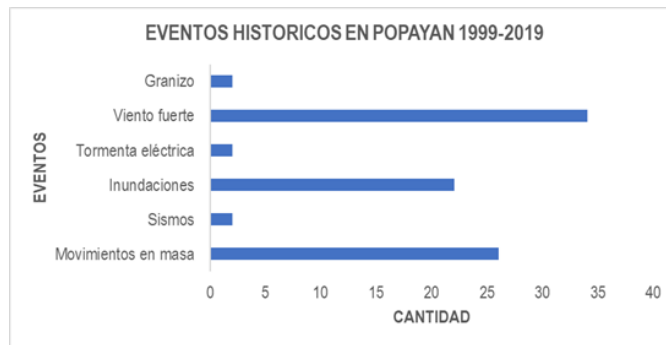


Figura 4.1.4 Eventos geológicos, meteorológicos e hidrológicos ocurridos en Popayán en el periodo 1999-2019
Fuente: Propia

Después, se procedió a analizar el nivel de impacto y recurrencia de cada uno de los eventos, para determinar cuáles son los que más han afectado la población y cuales son más frecuentes. En la tabla 4.1.2, se presenta la frecuencia absoluta, relativa y porcentual de cada evento; y en la figura 4.1.5, se representa su respectiva distribución porcentual.

Tabla 4.1.2 Distribución de frecuencias de los eventos ocurridos en Popayán en el periodo 1999-2019
Fuente: Propia

TIPO	EVENTO	fi	hi	%
GEOLOGICOS	Movimientos en masa	26	0,30	29,55
	Sismos	2	0,02	2,27
HIDROLÓGICOS	Inundaciones	22	0,25	25,00
METEOROLÓGICOS	Tormenta eléctrica	2	0,02	2,27
	Viento fuerte	34	0,39	38,64
	Granizo	2	0,02	2,27
TOTAL	n	88	1,00	100,00

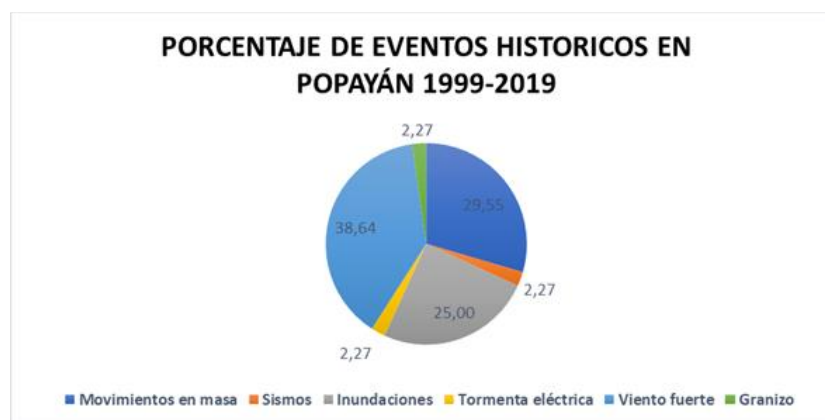


Figura 4.1.5 Diagrama de distribución porcentual de los eventos ocurridos en Popayán en el periodo 1999-2019
Fuente: Propia

Con el fin de evaluar el nivel de impacto, se presenta, en la tabla 4.1.3, los diferentes sectores que se han visto afectados directa o indirectamente por cada uno de los eventos.

Tabla 4.1.3 Sectores afectados por los eventos ocurridos en Popayán en el periodo 1999-2019

Fuente: Propia

EVENTO	PERSONAS (muertos, heridos y desaparecidos)	VIVIENDAS (destruidas, abreviadas)	VÍAS	PUENTES (vehiculares, peatonales)	ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO	CENTROS (comunitarios, salud, educación)	HECTAREAS
MOVIMIENTOS EN MASA	13562	135	7	0	0	0	109
SISMOS	0	0	0	0	0	0	3
INUNDACIONES	32501	1094	15	1	7	6	4854
TORMENTA ELÉCTRICA	0	0	2	0	0	0	200
VIENTO FUERTE	11158	1270	6	1	1	8	354
GRANIZO	0	0	0	0	0	1	0

Asimismo, se presentan las relaciones eventos versus sectores afectados, como se indica en la figura 4.1.6 y 4.1.7.



Figura 4.1.6 Terreno, viviendas y personas afectadas por los eventos ocurridos en Popayán en el periodo 1999-2019

Fuente: Propia

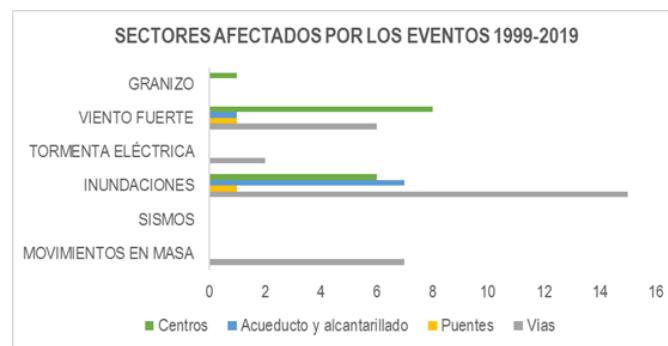


Figura 4.1.7 Otros sectores afectados por los eventos ocurridos en Popayán en el periodo 1999-2019

Fuente: Propia

En conclusión, se determinó que los eventos que más se presentaron en el municipio de Popayán durante el periodo 1999-2019, son los vendavales con un 38.6%, movimientos en masa con un 29.5% e inundaciones con un 25%; de igual forma, se determinó que los sectores que se han visto

mayormente afectados son las personas, viviendas y hectáreas, principalmente por eventos como inundaciones, vendavales y movimientos en masa, respectivamente.

De acuerdo a estos resultados, el dataset destinado para el entrenamiento y prueba de la red neuronal, se construye de acuerdo a las etiquetas fecha, variables y eventos, en el periodo 2013-2019; tal como se indica en el diagrama de la figura 4.1.8.

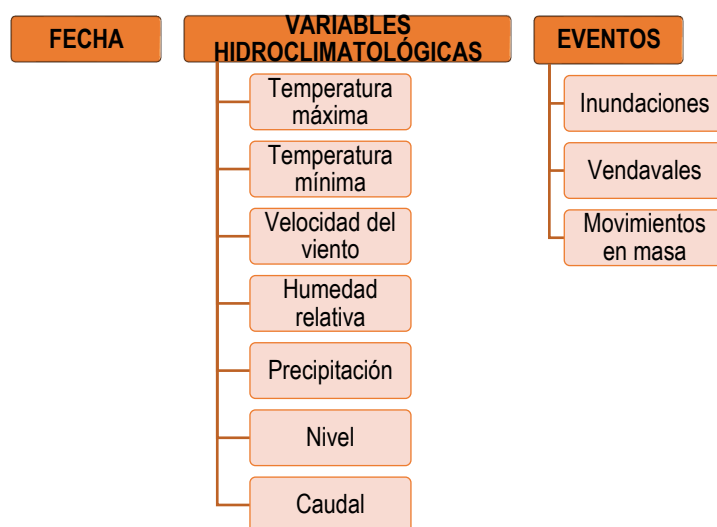


Figura 4.1.8 Estructura del dataset de entrenamiento y prueba de la Red NNARX

Fuente: Propia

En general, debe tenerse certeza de la fecha en la que han ocurrido los eventos, con el fin de realizar un análisis que permita evaluar la probabilidad temporal en la que podría ocurrir nuevamente un evento. Por otra parte, es preciso aclarar que, debido a que no existen históricos de las variables dirección del viento y presión atmosférica para el municipio de Popayán, el desarrollo del sistema de análisis del presente estudio, se encuentra limitado por la indisponibilidad de información.

4.1.2. Bloque Procesamiento de datos

El preprocesamiento, es la etapa, en un estudio de datos, que se encarga de la limpieza, integración, imputación de datos faltantes, transformación y reducción, para la siguiente fase en el proceso de exploración donde los datos se encuentran constantemente afectados por factores negativos como el ruido, valores perdidos o inconsistencias; lo que en últimas genera un conjunto de datos con valores atípicos, registros discontinuos, entre otros [88]. Por esta razón, el dataset para el entrenamiento y prueba de la red NNARX, requiere de un proceso previo de preparación antes de ser empleado.

Como se pudo observar en la figura 4.1.3, las series de tiempo de las variables hidrológicas presentan periodos de no registros, que es definido por F. Medina en [89] como las observaciones que simplemente están ausentes en los datos recolectados; el saber qué hacer con esos datos faltantes es fundamental, en algunas ocasiones la solución inmediata es quitar los registros y perder información que puede ser de gran valor, sin embargo, el propósito es aprovechar la información que se tiene

disponible en la mayor posibilidad. Para ello, se disponen de varias técnicas que permiten imputar de manera eficiente los valores faltantes. En el presente estudio se empleó, para la imputación de los valores diarios faltantes de cada serie de tiempo en el periodo 2013-2019, la técnica de interpolación en primera dimensión (1D) bajo el método cúbico, que es por mucho, el método más común para inferir valores entre puntos muestreados [85]; este proceso se desarrolló por medio de la herramienta Matlab. En la figura 4.1.9, se muestra la función de interpolación “Interp1” aplicada a cada una de los vectores de entrada.

```

pruebaHistorico.m x +
101
102 -     interpoll = interp1(col_1,t_data,'cubic');
103 -     interpol2 = interp1(col_2,t_data,'cubic');
104 -     interpol3 = interp1(col_3,t_data,'cubic');
105 -     interpol4 = interp1(col_4,t_data,'cubic');
106 -     interpol5 = interp1(col_5,t_data,'cubic');
107 -     interpol6 = interp1(col_6,t_data,'cubic');
108 -     interpol7 = interp1(col_7,t_data,'cubic');

```

Figura 4.1.9 Método de interpolación (1D) para la imputación de datos faltantes mediante Fuente: Propia

Este método de imputación consiste en agregar nuevos puntos de datos dentro del rango de un conjunto de puntos de datos conocidos, tal como se evidencia en la figura 4.1.10, donde se muestran las siete series de tiempo reconstruidas.

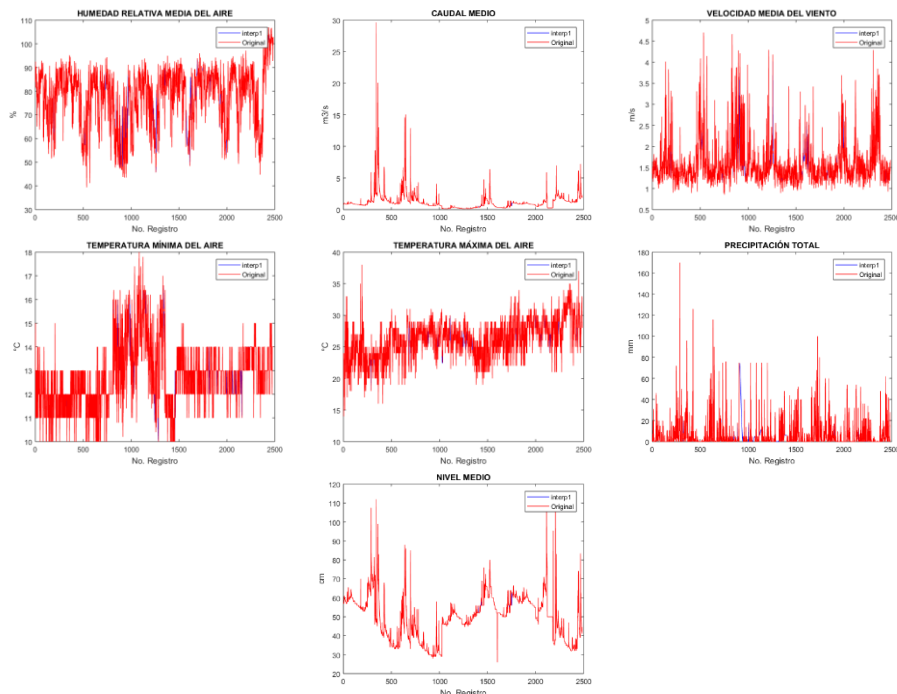


Figura 4.1.10 Series de tiempo reconstruidas mediante la técnica de interpolación (1D) Fuente: Propia

Se logra identificar que el método de imputación preserva la verosimilitud de los datos, agregando nuevos datos dentro del rango de los datos conocidos para cada caso y dando continuidad a la dinámica natural de cada variable; esto se puede deber a que son pocos los valores no registrados en las series de tiempo originales (i.e. Antes de la reconstrucción).

Después de haber reconstruido cada una de las series de tiempo de las variables hidroclimatológicas, se procede a realizar una limpieza de los datos a través de reglas de validación de consistencia definidas por el IDEAM, tabla 3.1.1. En esta etapa se efectúan algunas verificaciones con el objetivo de asegurar que los valores son razonables de acuerdo al comportamiento de las variables hidroclimatológicas, y aquellos datos que no cumplan las verificaciones serán eliminados, al igual que los registros duplicados. En la figura 4.1.11, se muestra la función para la verificación de consistencia, la función para la identificación de registros duplicados y la función para la eliminación de los registros rechazados por las dos funciones anteriores.

```
213  [+ function out = funOutlier(dataset) [...]  
273  
274  [+ function dp = funDuplicated(dataset) [...]  
289  
290  [+ function er = funEliminarRegistros(dataset,n_vt) [...]
```

Figura 4.1.11 Funciones desarrolladas en Matlab para la limpieza de los datos

Fuente: Propia

En este proceso de limpieza, de los 2485 registros que disponía inicialmente el dataset de entrenamiento y prueba, quedaron únicamente 2433 registros. Por último, solo queda escalar cada una de las series temporales de las variables dentro del intervalo [0;1], para ello, existen diferentes métodos; la figura 4.1.12, muestra uno de los más utilizados en algoritmos de aprendizaje automático, se trata del método de escalado MinMax [90].



Figura 4.1.12 Método de escalado MinMax

Fuente: Propia

Este método transforma todas las variables de entrada dentro del intervalo [0;1] mediante la ecuación x , donde es necesario calcular los valores mínimo y máximo para cada característica en los datos de entrenamiento y prueba.

$$x' = \frac{x - \min(x)}{\max(x) - \min(x)}$$

En la figura 4.1.13, se muestra la función desarrollada en Matlab para la transformación dentro del intervalo [0;1] de las variables de entrada de la red NNARX, mediante el método MinMaxScaling.

```

pruebaHistorico.m x +
321 function scaling = funScaling(dataset)
322     n_vt = size(dataset);
323     n_vt = n_vt(:,1);
324     t_data = (1:1:n_vt)';
325     col_1 = dataset(:,1); col_2 = dataset(:,2); col_3 = dataset(:,3);
326     col_4 = dataset(:,4); col_5 = dataset(:,5); col_6 = dataset(:,6);
327     col_7 = dataset(:,7); col_8 = dataset(:,8); col_9 = dataset(:,9);
328     col_10 = dataset(:,10);
329
330     maxc1 = max(col_1);   minc1 = min(col_1);
331     maxc2 = max(col_2);   minc2 = min(col_2);
332     maxc3 = max(col_3);   minc3 = min(col_3);
333     maxc4 = max(col_4);   minc4 = min(col_4);
334     maxc5 = max(col_5);   minc5 = min(col_5);
335     maxc6 = max(col_6);   minc6 = min(col_6);
336     maxc7 = max(col_7);   minc7 = min(col_7);
337
338     sc1 = (col_1-minc1)/(maxc1-minc1);
339     sc2 = (col_2-minc2)/(maxc2-minc2);
340     sc3 = (col_3-minc3)/(maxc3-minc3);
341     sc4 = (col_4-minc4)/(maxc4-minc4);
342     sc5 = (col_5-minc5)/(maxc5-minc5);
343     sc6 = (col_6-minc6)/(maxc6-minc6);
344     sc7 = (col_7-minc7)/(maxc7-minc7);
345     scaling = [sc1 sc2 sc3 sc4 sc5 sc6 sc7 col_8 col_9 col_10];

```

Figura 4.1.13 Función desarrollada en Matlab para el escalado de las variables de entrada

Fuente: Propia

En este caso se escalan los datos y se guardan en las variables llamadas “dataset_train_scaled” y “dataset_test_scaled”, respectivamente; a fin de utilizar estas versiones escaladas en lugar de los datos de características originales. En la figura 4.1.14, se muestran los vectores de entrada escalados.

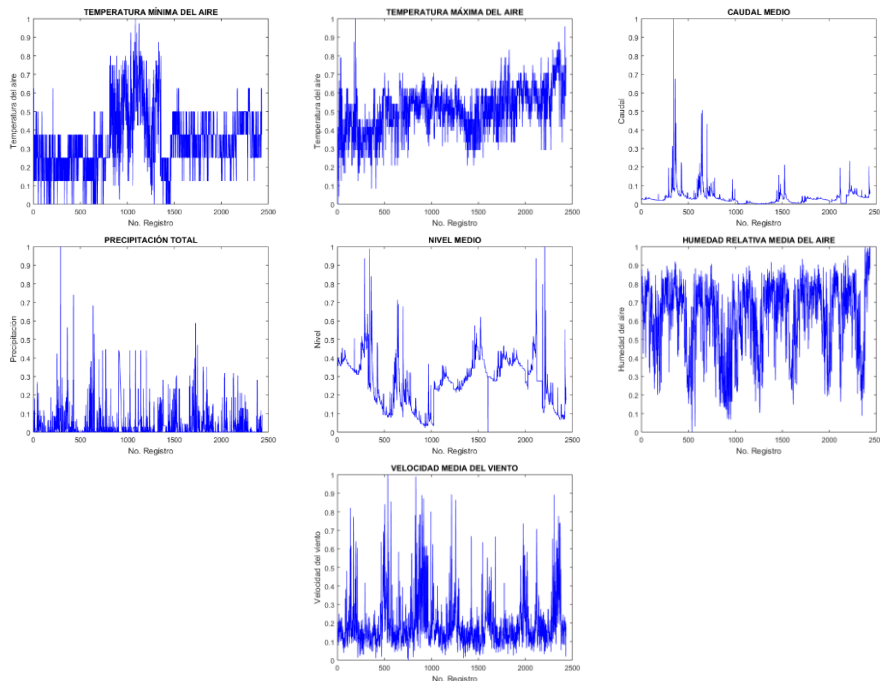


Figura 4.1.14 Variables hidroclimatólogicas escaladas en el intervalo (0;1)

Fuente: Propia

4.1.3. Bloque Creación de la red

La arquitectura de la Red NNARX está compuesta por una capa de entrada, dos capas ocultas y una capa de salida; la capa de entrada está compuesta a su vez, por neuronas que reciben datos o señales procedentes del entorno; la capa de salida se compone de neuronas que proporcionan la respuesta a la red; y la capa oculta proporciona grados de libertad a la red gracias a los cuales es capaz de representar, con mayor seguridad, determinadas características del entorno que quiere modelar. Asimismo, para la implementación de la Red NNARX, en el presente estudio, se elige la función de activación de tipo Tangente hiperbólica sigmoideal para la capa oculta y la capa de salida; y para el entrenamiento de la red, se implementa el algoritmo Levenberg-Marquardt (LM) que está basado en el método de aprendizaje supervisado. La función de transferencia o de activación, es la función encargada de representar las salidas en función de las entradas a cada neurona [91]. El proceso de selección de cada uno de estos elementos que componen la Red, se explica en detalle en el Anexo F.

El dataset para el entrenamiento y prueba de la red NNARX, resultante de la fase de preprocesamiento, fue organizado en Excel, tal como se observa, de manera resumida, en la tabla 4.1.4, en donde la cantidad real de registros es de 2433.

Tabla 4.1.4 Dataset de entrenamiento y prueba de la red NNARX pre-procesado
Fuente: Propia

Registro	VARIABLES HIDROCLIMATOLÓGICAS						EVENTO DE MAYOR IMPACTO Y RECURRENCIA			
	Caudal Medio	Nivel Medio	Precipitación Total	Temperatura del aire		Humedad del aire Media	Velocidad del viento Media	Tipo de evento		
				Mínima	Máxima			Inundación	Deslizamiento	Vendaval
1	0,03	0,36	0,00	0,64	0,42	0,73	0,13	0,00	0,00	1,00
2	0,02	0,36	0,01	0,79	0,38	0,81	0,17	0,00	0,00	0,00
3	0,02	0,36	0,02	0,50	0,00	0,88	0,10	0,00	0,00	0,00
4	0,03	0,36	0,04	0,64	0,29	0,69	0,14	0,00	0,00	0,00
5	0,02	0,36	0,00	0,64	0,42	0,77	0,21	0,00	0,00	0,00
6	0,03	0,37	0,06	0,64	0,42	0,83	0,10	0,00	0,00	0,00
7	0,03	0,40	0,12	0,57	0,38	0,75	0,17	0,00	0,00	0,00
8	0,03	0,37	0,01	0,64	0,29	0,76	0,12	0,00	0,00	0,00
9	0,03	0,40	0,06	0,50	0,17	0,84	0,15	0,00	1,00	0,00
2433	0,06	0,17	0,09	0,71	0,79	0,99	0,18	0,00	0,00	0,00

Como se mencionó anteriormente, el modelo NNARX que se emplea en el presente estudio presenta dos capas ocultas, sin embargo, el número óptimo de neuronas por capa necesita ser determinado; para ello se realizan diferentes combinaciones o casos de prueba. En la tabla 4.1.5, se enumeran los 32 casos que se definieron según la cantidad de estaciones, cantidad de entradas y cantidad de neuronas por capa, donde se varía sistemáticamente, esta última.

Tabla 4.1.5 Casos de prueba para la red NNARX
Fuente: Propia

ESTACIONES	VARIABLES	CASO	CAPA OCULTA 1	CAPA OCULTA 2	CASO	CAPA OCULTA 1	CAPA OCULTA 2
3	7	1	3	0	17	3	12
3	7	2	6	0	18	6	12
3	7	3	9	0	19	9	12
3	7	4	12	0	20	12	12
3	7	5	3	3	21	10	0
3	7	6	6	3	22	20	0
3	7	7	9	3	23	30	0
3	7	8	12	3	24	10	10
3	7	9	3	6	25	20	10
3	7	10	6	6	26	30	10
3	7	11	9	6	27	10	20
3	7	12	12	6	28	20	20
3	7	13	3	9	29	30	20
3	7	14	6	9	30	10	30
3	7	15	9	9	31	20	30
3	7	16	12	9	32	30	30

El modelo de red se construye y se prueba mediante la herramienta MATLAB Neural Network Toolbox (NNTool), figura 4.1.15, donde se elige el tipo red, se definen los vectores de entrada y salida, se definen los retardos a la entrada y a la salida, se elige el método de entrenamiento, se define la función que determina el rendimiento de la red, el número de capas ocultas, el número de neuronas por capa y la función de activación de la capa oculta y de salida.

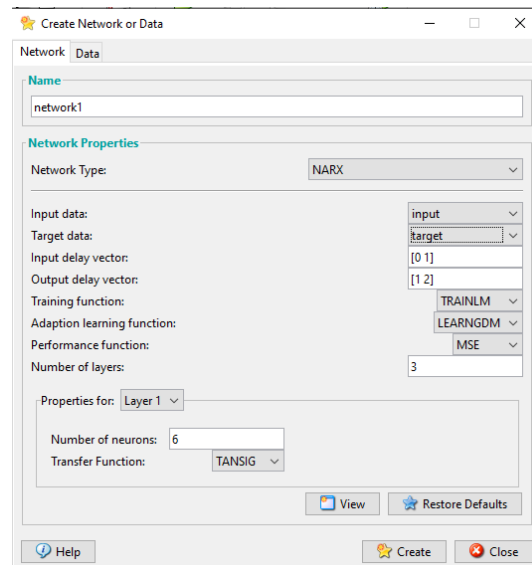


Figura 4.1.15 Creación de la Red NNARX mediante nntool
Fuente: Propia

4.1.4. Bloque Reconocimiento de patrones

En la etapa de entrenamiento, las redes neuronales van calculando sus predicciones de las variables requeridas por el usuario, y cada vez que obtienen una salida la comparan con la salida deseada, de esta manera, la red ve en qué medida se equivocó y modifica los pesos sinápticos para tratar de disminuir ese error [91]; dicho de otra manera, durante el proceso de aprendizaje la red neuronal es capaz de adaptar los pesos sinápticos de las neuronas de las capas intermedias con el objetivo de minimizar el error entre un conjunto de patrones dados como ejemplo y sus salidas estimadas.

Sucesivamente, el modelo ajustado se utiliza para predecir las respuestas de las observaciones en un segundo conjunto de datos denominado conjunto de datos de prueba. En la etapa de prueba, se aplica la misma relación a nuevos patrones de entrada no utilizados durante el proceso de entrenamiento, de esta manera, este nuevo conjunto de datos proporciona una evaluación imparcial del ajuste del modelo en el conjunto de datos de entrenamiento mientras se ajustan los hiper-parámetros del modelo (e.g. el número de capas y el número de neuronas por capa). Este conjunto de datos no conocido por la red, se denomina también conjunto Hold-Out; el método Hold-Out de test es el más extendido y el más sencillo, puesto que sólo es necesario separar un conjunto de muestras y reservarlas para comprobar la generalización del modelo una vez entrenado. Se entiende como capacidad de generalización a la capacidad que tiene una red neuronal de dar salidas satisfactorias a entradas que el sistema no ha visto nunca en su fase de entrenamiento [92].

En la figura 4.1.16, se muestra la implementación del primer caso de prueba, en el cual se definen siete entradas, tres salidas, tres neuronas en la primera capa oculta y cero neuronas en la segunda capa oculta. Con respecto a la capa oculta y de salida, se implementa la función de activación Tangente Hiperbólica Sigmoidea.

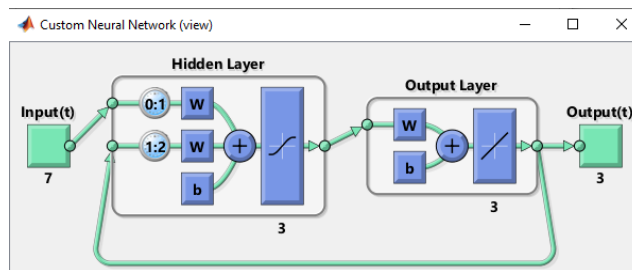


Figura 4.1.16 Arquitectura de la Red NNARX inicial
Fuente: Propia

Para el entrenamiento y prueba del modelo, se decide dividir el conjunto de datos en el 70% y 30%, respectivamente; además, como se observa en la figura 4.1.17, el algoritmo de entrenamiento fue Levenberg-Marquardt y se definió una época para cada entrenamiento, que representa el número de veces que cambia los pesos sinápticos.

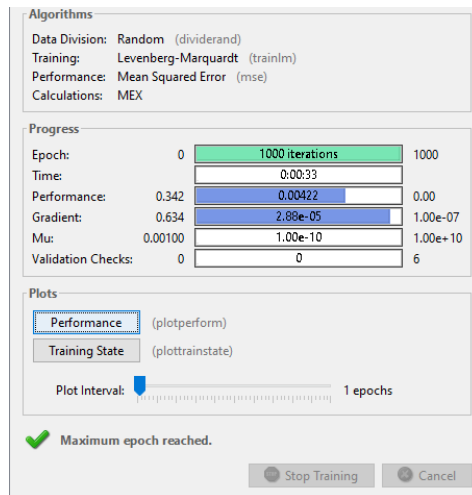


Figura 4.1.17 Entrenamiento del primer caso de prueba de la Red NNARX
Fuente: Propia

Inicialmente, el valor de cada peso sináptico es definido de manera aleatoria por el algoritmo de entrenamiento, y a medida que se repite cada iteración este valor es ajustado por el mismo algoritmo con el objeto de minimizar el error cometido entre la salida obtenida por la red neuronal y la salida deseada. Una vez ejecutada la totalidad de iteraciones, se registra el Error Medio Cuadrático (MSE, del inglés). Este mismo procedimiento se debe realizar con cada uno de los 32 casos de prueba.

4.1.5. Bloque Evaluación e interpretación

En esta etapa, se evalúa el desempeño de cada una de las combinaciones de red (i.e. Casos de prueba) realizando un análisis estadístico de los resultados, donde se calcula el MSE entre las salidas objetivo y las salidas entregadas por la red neuronal en la fase de entrenamiento y prueba, y se compara con el fin de identificar el mejor caso, que corresponderá al caso que cometa el mínimo error. La evaluación de los resultados obtenidos por cada caso de prueba se realiza en la sección 5.5.

En síntesis, en este capítulo se describieron las diferentes fases relacionadas con el proceso de preparación de los datos, entrenamiento y validación de la red neuronal la cual será posteriormente desarrollada y evaluada en el capítulo de evaluación y despliegue, respectivamente.

5. CAPÍTULO 5: EVALUACIÓN

Este capítulo presenta toda la información relacionada con la calibración de los sensores de la estación de monitoreo y con la evaluación de cada uno de los componentes de la investigación, procesos que se realizan a fin de garantizar el correcto funcionamiento del sistema.

5.1. VALIDACIÓN DEL COMPONENTE DE MEDICIÓN

La calibración de los sensores es un proceso que permite, además de garantizar la precisión en las mediciones de las variables ambientales del sistema, validar el funcionamiento del dispositivo de medición. Este dispositivo cuenta con una primera tarjeta de adquisición (i.e. Arduino Mega) y los diferentes sensores, para la medición de las variables y posterior envío hacia una segunda tarjeta de adquisición (i.e. Soul One), que se realiza por medio del protocolo de comunicación I2C.

5.1.1. Calibración de los sensores

5.1.1.1. Estándares para la calibración

Requerimientos del estándar ASAE EP505 APR2004

American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE) es una organización profesional y técnica de miembros en todo el mundo, que se dedican al avance de ingeniería aplicable a sistemas agrícolas, alimentarios y biológicos. Los estándares ASABE son documentos de consenso meramente informativos y de asesoramiento, desarrollados para cumplir con las necesidades de la sociedad, a través del desarrollo de equipos para el sector agrícola, equipos de granja, estructuras, suelo y gestión de recursos[60]. Las recomendaciones descritas por dicha organización sobre los sensores utilizados en estaciones automáticas agrícolas para la medición de las variables de interés, se listan en la tabla 5.1.1:

Tabla 5.1.1 Estándar ASAE EP505 APR2004 para una estación de monitoreo

Fuente: Propia

VARIABLE	RANGO MÍNIMO	RESOLUCIÓN		PRECISIÓN	
		Variable	Digital	Especificada	De campo estimada
Temperatura del aire	-30°C a 50°C	0,1°C	1mV/V	±0,3°C	±0,5°C
Humedad relativa del aire	10%RH a 100%RH	1%RH	10 mV	±3%RH y ±5%RH	±5%RH
Velocidad del viento	0,5m/s a 40m/s	0,5m/s	-	±0,3m/s y ±2m/s	-
Dirección del viento	0° a 360°	5°	14 mV/V	±3° y ±5°	10°
Precipitación	0 mm/h a 200mm/h	0,25mm/h	-	-	-10% a 100mm/h

Especificaciones funcionales de una estación automática según la OMM

La Organización Meteorológica Mundial (OMM), describe un conjunto de especificaciones de funcionalidad revisadas para las estaciones meteorológicas automáticas en la Guía del Sistema Mundial de Observación (OMM-N° 488). En dicha guía se explican y describen prácticas, procedimientos y especificaciones del SMO, que están dirigidas principalmente al personal técnico y

administrativo de los Servicios Meteorológicos Nacionales (SMN) encargados de las redes de observación, con objeto de ayudarles a preparar instrucciones de carácter nacional destinadas a los observadores [93]. Las especificaciones descritas por dicha organización sobre los sensores utilizados en estaciones meteorológicas automáticas para la medición de las variables de interés, se listan en la tabla 5.1.2:

Tabla 5.1.2 Especificaciones funcionales de la OMM para estaciones meteorológicas automáticas

Fuente: tomada de [93]

VARIABLE	ALCANCE EFECTIVO MÁXIMO	RESOLUCIÓN MÍNIMA TRANSMITIDA
Presión atmosférica	500 - 1080 hPa	10 Pa
Temperatura del aire	-80 °C a +60 °C	0,1 K
Humedad relativa del aire	0 - 100 %	1%
Dirección del viento	1 - 360°	1°
Velocidad del viento	0 - 75 m/s	0,1 m/s
Precipitación	0 - 1600 mm	0,1 mm
Caudal río	0 - 2,5x10 ⁵ m ³ /s	0,1 m ³ /s
Nivel del agua	0 - 100m	0,01 m

5.1.1.2. Metodología para la calibración

A fin de estandarizar las mediciones de la estación, se pueden realizar pruebas de inter comparación y rendimiento del sensor de campo a través de pruebas de precisión utilizando una entrada o característica conocida, o mediante comparaciones lado a lado con sensores patrones de referencia que están calibrados con base a un estándar conocido. Cuando se prueban los sensores lado a lado con sensores de calibración, o contra una característica conocida, se toman lecturas simultáneas durante un período de tiempo específico. La diferencia porcentual entre los promedios de los dos conjuntos de lecturas (i.e. Error relativo) debe calcularse y compararse con los criterios descritos en las tablas 5.1.1. y 5.1.2 que determinan la aceptabilidad o rechazo de cada sensor; el error relativo se calcula por medio de la ecuación 5.1.1.

$$\varepsilon(\%) = \frac{|Valor\ sensor\ estacion - Valor\ sensor\ referencia|}{Valor\ sensor\ referencia} \times 100 \quad 5.1.1$$

Identificación de los instrumentos de referencia

- **Sensor de nivel y estimación del caudal:** Para la calibración del sensor de nivel y validación del método para la estimación del caudal, se realizó la respectiva solicitud a la Alcaldía de Popayán, la cual dispone de estaciones hidrológicas que integran el sistema de alertas tempranas participativas del Río Molino, denominado SAT Molino.
- **Pluviómetro:** Para la calibración del pluviómetro, se tuvo en cuenta el proceso metodológico empleado por E. Marín et al [94] en la caracterización de los sensores de una estación meteorológica, donde se usa como instrumento patrón de referencia un set de infusión macro gotero para simular la precipitación, figura 5.1.1, y se tienen en cuenta una serie de ecuaciones que involucran las dimensiones del recipiente y su resolución.



Figura 5.1.1 Equipo macro gotero
Fuente: tomado de Google Imágenes

- Sensor DHT22:** En el caso del sensor DHT22, el cual mide la temperatura y humedad relativa del ambiente, no fue necesario un proceso de calibración debido a que cada sensor es calibrado en fabrica para obtener unos coeficientes de calibración grabados en su memoria OTP, asegurando alta estabilidad y fiabilidad a lo largo del tiempo [61]. Las características que garantizan la confiabilidad del sensor se describen en la tabla 5.1.3.

Tabla 5.1.3 Características técnicas del sensor DHT22
Fuente: Propia

CARACTERÍSTICA	DESCRIPCIÓN	
	HUMEDAD	TEMPERATURA
Rango	0%RH a 100%RH	-40°C a 80°C
Precisión	±2%RH	< ± 0,5°C
Resolución	0,1%RH	0,1°C
Repetibilidad	± 1%RH;	±0,2°C
Estabilidad a largo plazo	±0,5%RH/año	± 0,3°C/año

- Sensor BMP280:** El sensor BMP280, por medio del cual se obtiene el valor de la presión barométrica absoluta del punto de observación, tampoco requirió de un proceso de calibración debido a que ya viene completamente calibrado desde fabrica. Las características que garantizan la confiabilidad del sensor se describen en la tabla 5.1.4.

Tabla 5.1.4 Características técnicas del sensor BMP280
Fuente: Propia

CARACTERÍSTICA	BMP280
Rango	300hPa - 1100hPa
Precisión absoluta	±1hPa
Precisión relativa	±0,12hPa
Resolución	0,16Pa

- Anemómetro:** Para la calibración del anemómetro, se usó como instrumento patrón de referencia un dispositivo con medida digital (Anemómetro unit-t Ut363), figura 1.5.2, que permite visualizar de manera más exacta la velocidad y temperatura del viento. Para este proceso, se tuvo en cuenta las interrupciones generadas cada vez que se cruzan el imán y el Reed Switch; simultáneamente, se capturó la velocidad (m/s) interpretada por el anemómetro digital.



Figura 5.1.2 Anemómetro digital unit-t Ut363
Fuente: tomada de Google Imágenes

- **Veleta:** La veleta se calibró utilizando como instrumento de referencia un transportador, figura 1.5.3, el cual permite conocer con precisión, el ángulo de orientación de la veleta en respuesta a la dirección de procedencia del viento.

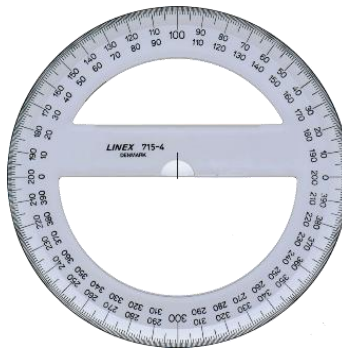


Figura 5.1.3 Transportador
Fuente: Propia

5.1.1.3. Calibración

Sensor de Nivel y estimación del caudal

Entre los sensores de nivel que integran el SAT Molino, se encuentra el Sensor Campo Real – N_05 ubicado en el conjunto residencial Campo Real; este sensor fue utilizado como instrumento patrón en la presente investigación para calibrar el sensor de nivel y validar la estimación del caudal, debido a su cercanía a la ciudad y fácil acceso. El diagrama de la figura 5.1.4, describe el escenario de prueba para esta actividad, basado en la etapa de instalación, configuración, pruebas y puesta en funcionamiento de estaciones hidrometeorológicas automáticas descrita por el IDEAM [27].

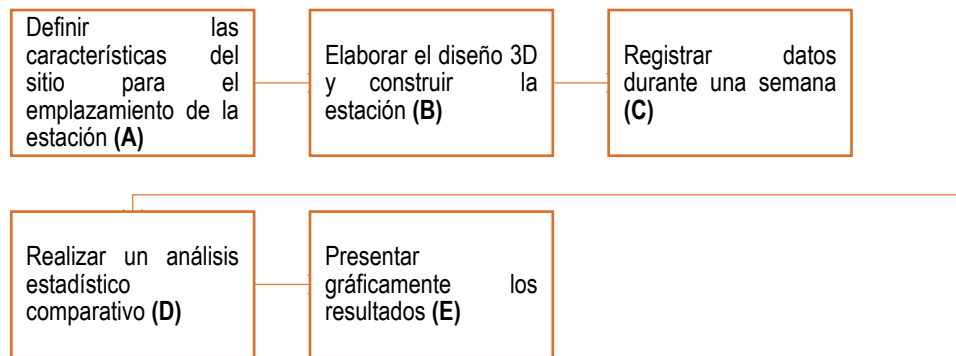


Figura 5.1.4 Etapas para la calibración en campo del sensor de nivel
Fuente: Propia

Sección A: la sección transversal del punto de observación en Campo Real presenta una geometría de tipo trapezoide no ideal, con lados laterales de altura aproximada de 5m y amplitud del lecho aproximadamente de 5.5m.

Sección B: con base a los parámetros físicos del sitio de estudio, fue preciso realizar un diseño que permitiera ubicar el sensor de nivel sobre el rio a una distancia desde el margen del canal de 6m y una altura desde el lecho aproximada de 3.3 m. En la figura 5.1.5, se muestra el diseño en 3D construido mediante la herramienta 3D Builder, y en la 5.1.6, se muestra la respectiva construcción e instalación física en Campo Real.

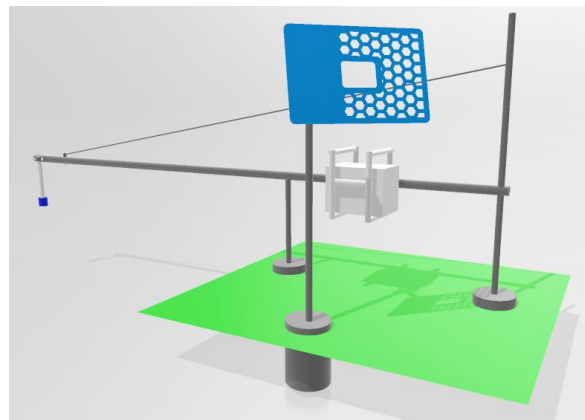


Figura 5.1.5 Diseño 3D de la estación para la prueba de calibración en Campo Real
Fuente: Propia



Figura 5.1.6 Instalación de la estación para la prueba de calibración en Campo Real
Fuente: Propia

Sección C: la prueba de validación se inició a las 3:01pm del día 12 de febrero del 2021, y finalizó a las 3:01pm del día 19 de febrero del 2021. Durante estos siete días la estación transmitió, bajo una frecuencia de diez minutos, un total de 1008 datos.

Sección D: en la figura 5.1.7, se representan los dos conjuntos de datos de nivel del río Molino, los cuales fueron proporcionados por la estación de referencia (i.e. Sensor Campo Real - N_05) y la estación de estudio (i.e. MIoT), durante la semana de prueba en Campo Real.

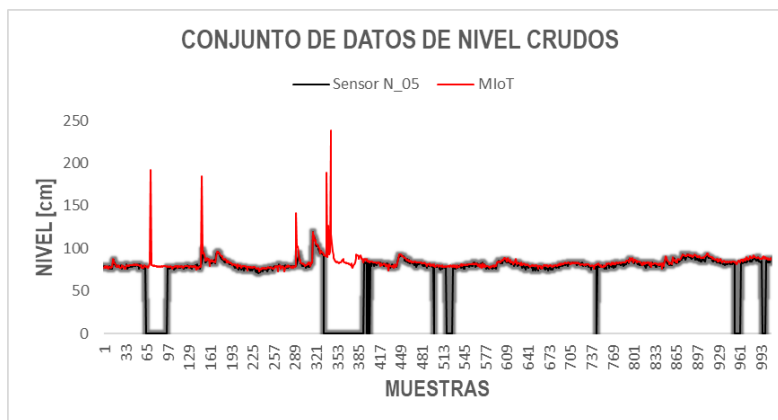


Figura 5.1.7 Conjuntos de datos crudos del Sensor N_05 y MIoT obtenidos en la calibración del sensor de nivel
Fuente: Propia

Como se observa en la anterior gráfica, la serie de datos de nivel entregada por el Sensor N_05 de la Alcaldía (i.e. Gráfica de color negro) presentó grandes periodos de tiempo donde no se registraron datos, situación que impediría realizar un análisis estadístico de comparación preciso. Por este motivo, se decidió eliminar los registros comprendidos en los periodos de no registro del Sensor N_05, con el fin de garantizar la continuidad temporal de ambas series, figura 5.1.8.

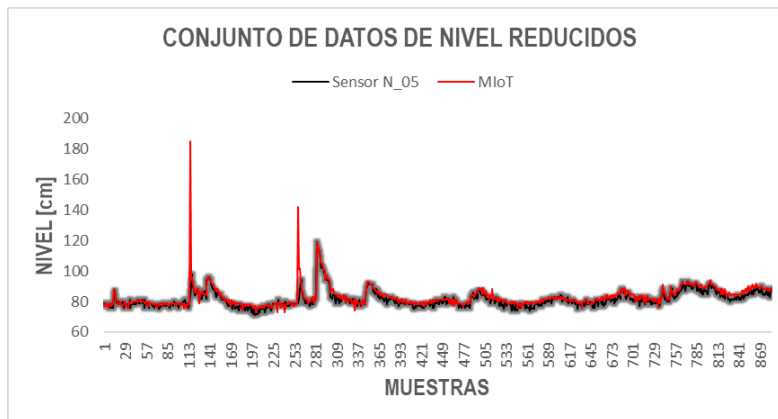


Figura 5.1.8 Reducción de los conjuntos de datos en la calibración del sensor de nivel
Fuente: Propia

De igual manera, se puede observar que la serie de datos entregada por la estación MloT (i.e. Gráfica de color rojo), presenta picos en la forma de la señal, que generalmente son asociados al ruido generado por las condiciones propias del entorno en el punto de monitoreo, o asociados a las leyes físicas fundamentales de ondas como reflexión, refracción y absorción a las que se encuentra sujeto el sensor ultrasónico HC-SR04 empleado por la estación MloT para medir dicha variable. Por esta razón, a partir del segundo pico de señal obtenido precisamente en el registro número 260, se decidió implementar un filtro de tipo pasa-bajos como una técnica de suavizado para minimizar el error de lectura del sensor; tal como se ilustra en la figura 5.1.9.

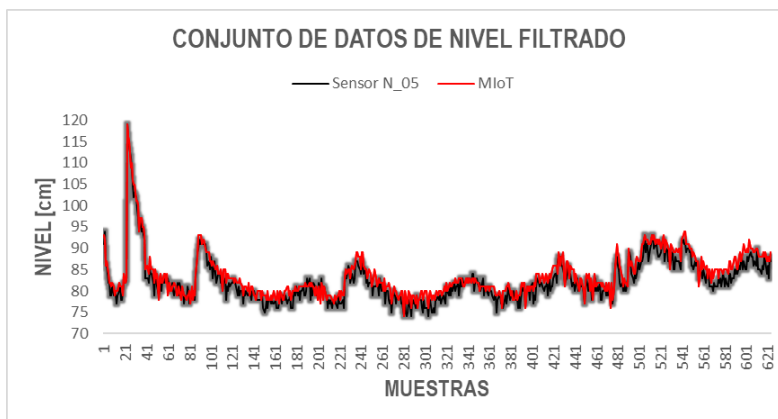


Figura 5.1.9 Filtración del conjunto de datos del sensor MloT en la calibración del sensor de nivel
Fuente: Propia

Una vez se obtuvieron las muestras correspondientes a los conjuntos de datos de nivel, se calculó el coeficiente de correlación y el máximo error absoluto y porcentual cometido por la estación MloT con respecto a las mediciones realizadas por la estación de referencia.

El coeficiente de correlación es un cálculo estadístico que se utiliza para examinar la relación entre dos conjuntos de datos; asimismo, el valor de este coeficiente indica la fuerza y la naturaleza de la relación y puede variar entre 1 y -1. Si el valor se acerca a 1, significa que hay una fuerte relación

positiva entre los dos conjuntos de datos, en la que los valores tienden a incrementarse juntos. En la 5.1.5, se relacionan las respectivas medidas.

Tabla 5.1.5 Medidas de dispersión para la evaluación de los conjuntos de nivel en la calibración del sensor de nivel
Fuente: Propia

Medida	Conjuntos de datos de nivel (Sensor N_05 y MIoT)
Coef. Correlación	0,95
Max error absoluto [cm]	4
Max error relativo [%]	4,8

En conclusión, se logró identificar que existe una correlación directa del 95% entre el conjunto de datos de nivel proporcionado por la estación MIoT y el conjunto de datos de nivel proporcionado por la estación N_05 de referencia, durante la semana de prueba en Campo Real; lo cual quiere decir que las precisiones de ambos sensores coinciden en un alto grado.

Después de realizar una comparación del sensor de nivel HC-SR04, con respecto a las recomendaciones de los estándares ASAE EP505 APR2004 y la guía OMM-N° 488 sobre la elección de sensores para estaciones automáticas se obtuvo lo siguiente: no cumple con el rango de medición debido a que este dispositivo es capaz de entregar un valor comprendido entre 0.02m y 4.5m; cumple con la mínima resolución la cual es de 0.003m; presenta un máximo margen de error en la medida de 0.04m.

Para la validación del caudal se siguió el mismo proceso metodológico. En primer lugar, se eligieron la muestra correspondiente a cada uno de los conjuntos de datos de caudal, que se obtuvieron a partir de los datos de nivel resultantes de la etapa de preparación realizada anteriormente, tal como se indica en la figura 5.1.10.

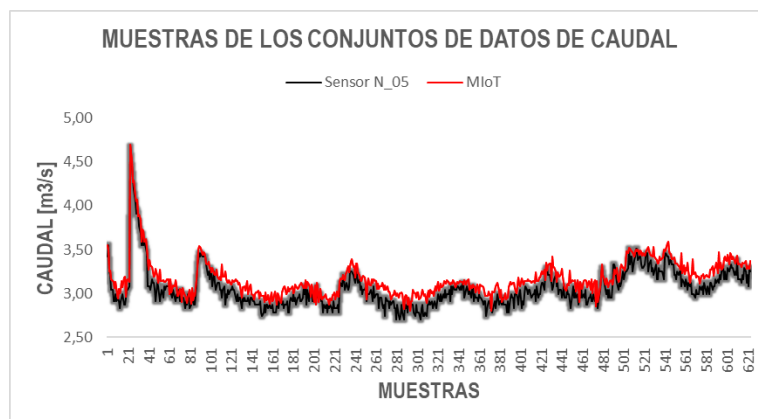


Figura 5.1.10 Conjuntos de datos de caudal del Sensor N_05 y MIoT obtenidos en la calibración del sensor de nivel
Fuente: Propia

Después de haberse obtenido las respectivas muestras de caudal, se calculó el coeficiente de correlación y el máximo error absoluto y porcentual entre las series, tabla 5.1.6.

Tabla 5.1.6 Correlación entre los conjuntos de datos de caudal
Fuente: Propia

Medida	Conjuntos de datos de caudal (Sensor N_05 y MIoT)
Coef. Correlación	0,93
Max error absoluto [m3/s]	0,21
Max error relativo [%]	6,8

En conclusión, se logró identificar que existe una fuerte correlación directa entre el conjunto de datos de caudal proporcionado por la estación MIoT y el conjunto de datos de caudal proporcionado por la estación N_05 de referencia, durante la semana de prueba en Campo Real; lo cual quiere decir que las precisiones de ambos métodos para la estimación del caudal coinciden en un alto grado. De igual manera, el desarrollo de este proceso de calibración, indica que el dispositivo de medición de la estación de monitoreo, funciona correctamente.

Pluviómetro

La prueba consistió en vaciar, por medio del macro gotero, una bolsa que contiene exactamente 500ml de agua esterilizada sobre la boca de captación del pluviómetro; durante la prueba se incrementa gradualmente la velocidad de goteo por medio del mismo dispositivo, esto con el fin de simular el comportamiento real de una precipitación. El respectivo montaje se muestra en la figura 5.1.11.



Figura 5.1.11 Montaje de prueba para la calibración del pluviómetro
Fuente: Propia

Se ubicó un recipiente en la parte inferior que recogiera el agua precipitada, lo cual permitió verificar que efectivamente se habían vaciado los 500ml al finalizar la prueba. Para el registro de los pulsos

eléctricos que genera el pluviómetro por cada balanceo durante la prueba, se desarrolló un algoritmo en Arduino Mega que permitiera escribir, cada diez minutos, el acumulado de pulsos sobre una memoria flash; tal como se describe en el diagrama de la figura 5.1.12.

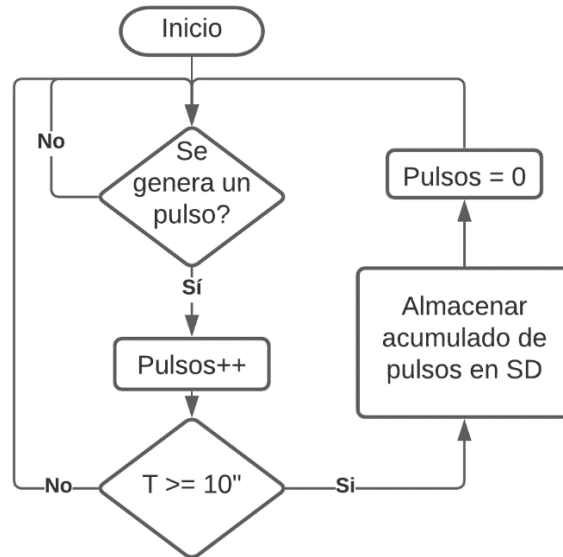


Figura 5.1.12 Lógica implementada para el registro de los pulsos en la prueba de calibración del pluviómetro
Fuente: Propia

La prueba se realizó durante cuarenta minutos, durante la cual se obtuvo un total de cuatro registros en la memoria flash; tal como se indica en la figura 5.1.13.

Dispositivo de almacenamiento digital seguro (E:) > DATALOGG > PRUEBAS

Nombre	
*PRUEBA_4: Bloc de notas	
PRUEBA_1	50
PRUEBA_2	68
PRUEBA_4	80
Prueba3	96

Figura 5.1.13 Registros en la memoria flash durante la prueba de calibración del pluviómetro
Fuente: Propia

Después de haber obtenido la totalidad de los pulsos generados por el pluviómetro, se procedió a calcular el coeficiente de calibración (i.e. Resolución del pluviómetro), que será equivalente a la cantidad de lluvia sobre el número de balanceos, como se expresa en la ecuación 5.1.2. Este coeficiente determina la cantidad de agua que debe caer sobre la cubeta del balancín para cerrar temporalmente el interruptor y generar un pulso.

$$Resolucion = \frac{Volumen\ de\ agua}{\#pulsos}$$

El volumen de agua hace referencia a la cantidad de agua que se derramó sobre el pluviómetro durante la prueba de calibración; de igual manera, el número de pulsos corresponde a la totalidad de los pulsos que generó el pluviómetro durante la misma prueba.

$$\text{Resolucion} = \frac{500\text{ml}}{294\text{ pulsos}} = 1.7\text{ml/pulso} = 1.7\text{cm}^3/\text{pulso}$$

El equivalente de precipitación se obtuvo por medio de la siguiente ecuación:

$$\text{Altura de precipitacion} = \frac{\text{Volumen de agua}}{\text{Area de captacion}} \quad 5.1.3$$

Teniendo en cuenta que el área de la boca de captación del pluviómetro es de 55 cm^2 , se obtuvo que:

$$\text{Altura de precipitacion} = \frac{1.7\text{cm}^3}{55\text{cm}^2} = 0.03\text{cm/pulso} = 0.3\text{mm/pulso}$$

De acuerdo al resultado anterior, se necesitarían 0.3mm de precipitación para activar el Reed Switch del pluviómetro. Después de haber hallado el coeficiente de calibración, se realizó la prueba de validación para obtener el error con respecto al valor de resolución descrito por el fabricante del sensor, el cual describe que se necesitan 0.2794mm para que el pluviómetro genere un pulso.

En conclusión, se obtuvo que el sensor cometió un error relativo del 7.4% en la medición con respecto al valor teórico, y un error absoluto de 0.02mm. Asimismo, variar la velocidad de caída por medio del macrogotero, permitió validar que el algoritmo tiene la capacidad de detectar pulsos rápidos y lentos.

Después de realizar una comparación del pluviómetro con respecto a las recomendaciones de los estándares ASAE EP505 APR2004 y la guía OMM-N° 488 sobre la elección de sensores para estaciones automáticas se obtuvo lo siguiente: el rango de medida es prácticamente infinito debido a que no acumula la precipitación en un recipiente; no cumple con la resolución mínima establecida debido a que, según el fabricante es igual a 0,2794mm; cumple con la precisión debido a que el error máximo obtenido en campo fue del 7.4% con respecto al instrumento de referencia.

Anemómetro

La prueba consistió en ir colocando el sensor cada 40 cm en línea recta hasta llegar a los 280 cm, los puntos se marcaron por medio de una cinta métrica que se ubicó sobre el suelo; además, se utilizó como fuente un equipo de generación de viento. El respectivo montaje se muestra en la figura 5.1.14.



Figura 5.1.14 Montaje de prueba para la calibración del anemómetro
Fuente: Propia

La cantidad de interrupciones se almacenaron en una memoria flash cada 30 segundos, al finalizar los 30 segundos se comparó la cantidad de interrupciones con respecto a la velocidad en m/s que marca el anemómetro digital Ut363. La lógica implementada por el algoritmo que recolectó los pulsos del anemómetro durante la prueba, se describe en el diagrama de la figura 5.1.15.

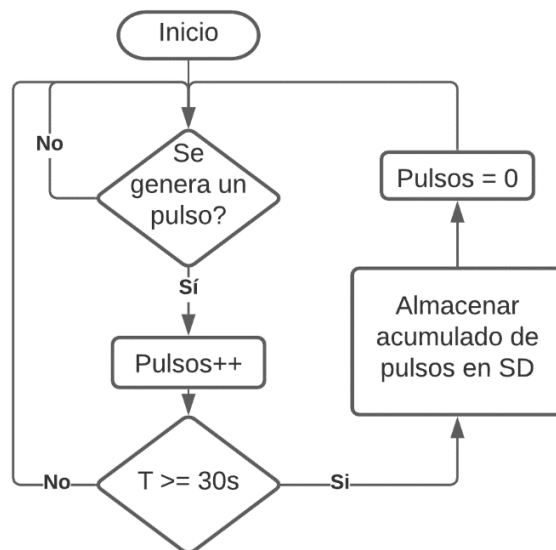


Figura 5.1.15 Lógica implementada para el registro de los pulsos en la prueba de calibración del anemómetro
Fuente: Propia

En la tabla 5.1.7, se relacionan los datos que se obtuvieron en la prueba de calibración, los cuales fueron utilizados para sacar la ecuación característica del sensor.

Tabla 5.1.7 Datos obtenidos en la prueba de calibración del anemómetro
Fuente: Propia

Secuencia	Distancia [cm]	Pulsos (30s)	Pulsos (1s)	Velocidad instrumento digital [m/s]
1	40	478	15,93	10,80
2	80	323	10,77	8,10
3	120	222	7,40	6,20
4	160	140	4,67	4,60
5	200	110	3,67	3,90
6	240	87	2,90	3,45
7	280	74	2,47	3,10

De acuerdo con los datos anteriores, se construye la gráfica pulsos versus velocidad, la cual permitió obtener la curva característica del sensor y la ecuación que predomina en el sistema haciendo uso de la herramienta Excel, como se indica en la figura 5.1.16

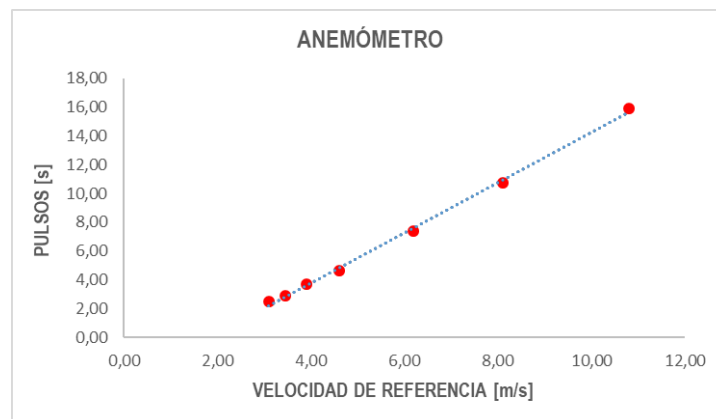


Figura 5.1.16 Curva característica obtenida en la prueba de calibración del anemómetro
Fuente: Propia

La ecuación característica encontrada para el anemómetro fue la siguiente:

$$Velocidad (m/s) = \frac{\#pulsos+3.2}{1.7484} \quad 5.1.4$$

De correlación $R^2 = 0.9983$.

Después de haber obtenido la ecuación característica del anemómetro, se realizó la prueba de validación para calcular el error con respecto al valor de resolución descrito por el fabricante del sensor, el cual define que un pulso por segundo corresponde a una velocidad del viento de 0.66m/s [62], o lo que es lo mismo, mediante una relación de proporcionalidad, 15.93 pulsos por segundo se generarían a una velocidad promedio de 10.51m/s en lugar de 10.8m/s como lo indicó la prueba de calibración.

En conclusión, se obtuvo que el sensor cometió un error relativo del 2.7% en la medición con respecto al valor teórico, y un error absoluto de 0.29m/s. Asimismo, se pudo demostrar la sensibilidad del algoritmo de detección al tener la capacidad de detectar aproximadamente 16 giros por segundo.

Después de realizar una comparación del anemómetro con respecto a las recomendaciones de los estándares ASAE EP505 APR2004 y la guía OMM–N° 488 sobre la elección de sensores para estaciones automáticas se obtuvo lo siguiente: el dispositivo no se encuentra limitado a un rango fijo de medición; no cumple con la mínima resolución debido a que, según el fabricante, esta es de 0.66m/s; el error máximo obtenido en campo fue de 0.29m/s con respecto al instrumento de referencia, lo cual se encuentra dentro del rango máximo permitido por dichos estándares.

Veleta

La prueba consistió en colocar sobre el transportador unos palillos de madera, los cuales servirían como proyección de cada uno de las ocho direcciones (i.e. N = 0°, NE = 45°, E = 90°, SE = 135°, S = 180°, SO = 225°, O = 270°, NO = 315°) para posicionar la boca del equipo soplador. Se soplo desde cada una de las direcciones durante diez segundos, al finalizar los diez segundos, se registró la dirección marcada por la veleta. El respectivo montaje se muestra en la figura 5.1.17.



Figura 5.1.17 Montaje de prueba para la calibración de la veleta
Fuente: Propia

La lógica implementada por el algoritmo que registró las direcciones marcadas por la veleta durante la prueba, es similar a la que se empleó durante la prueba de calibración del anemómetro; a diferencia de que la dirección instantánea es registrada cada diez segundos. Los respectivos registros se listan en la tabla 5.1.8.

Tabla 5.1.8 7Datos obtenidos en la prueba de calibración de la veleta
Fuente: Propia

Tiempo [s]	Dirección del soplador [°]	Dirección de la veleta [°]
10	0	2
20	45	44
30	90	93
40	135	136
50	180	182
60	225	228
70	270	269
80	315	319

En conclusión, después de haber obtenido los datos, se determinó que la veleta cometió un error absoluto de 4° y un error relativo de 2.2%, con respecto al instrumento de referencia.

Después de realizar una comparación del dispositivo con respecto a las recomendaciones de los estándares ASAE EP505 APR2004 y la guía OMM–N° 488 sobre la elección de sensores para estaciones automáticas se obtuvo lo siguiente: el rango de medición es de 0° a 360°; la precisión en campo es de 4° lo cual se encuentra por debajo del máximo permitido de 10°; no se cumple con el rango mínimo de medición, debido a que la veleta tiene la capacidad de medir hasta 16 direcciones, lo que quiere decir que la resolución mínima es de 22.5°.

5.2. VALIDACIÓN DEL COMPONENTE ENERGÉTICO

Esta etapa, se realizó con el fin de validar el rendimiento del sistema fotovoltaico, donde se determinó el tiempo de operación de la estación hidroclimatológica. Como es requerimiento de la investigación que la estación transmita el valor de las variables durante las 24 horas del día, el sistema energético debe poder, además de alimentar la estación durante las horas de sol, cargar completamente la batería para que esta pueda continuar alimentando la estación durante la noche.

La prueba de validación del sistema, consistió en registrar, en la Memoria flash, el voltaje del panel y de la batería, cada minuto, durante un tiempo determinado; y al finalizar, se analizó el comportamiento del voltaje de la batería en el proceso de carga. La prueba se realizó entre las 9:00 am y 5:00pm del día 14 de abril del año en curso, donde se obtuvo un total de 480 registros. La figura 5.2.18, corresponde a la relación voltaje batería y voltaje del panel versus tiempo.

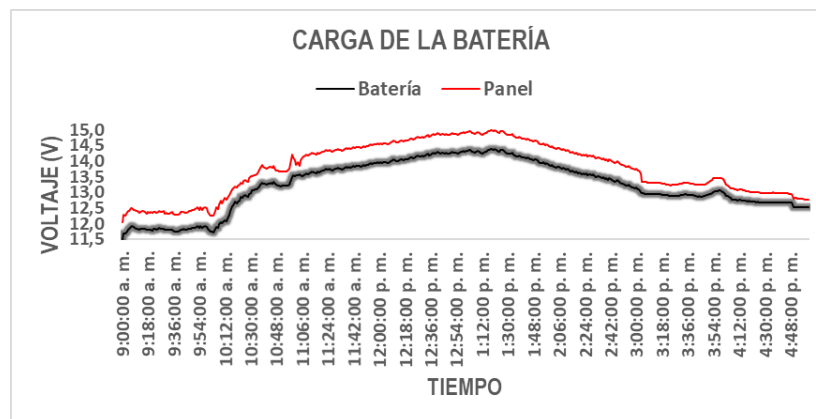


Figura 5.2.18 Comportamiento del voltaje de la batería durante la prueba de validación

Fuente: Propia

Es preciso resaltar que, el día de prueba estuvo parcialmente nublado antes de las 10:00am, adicional a ello, la batería se encontraba completamente descargada.

Después de las 10:00am, la irradiancia solar incrementa gradualmente, por ende, el voltaje del panel y de la batería, debido que el controlador de carga le suministró corriente a la batería a intensidad máxima, lo cual permitió que la batería alcance rápidamente un voltaje de 14.2V (12:30pm). Después

de este momento, el controlador intentó mantener constante el voltaje de carga, mientras que la capacidad de aceptar la corriente por parte de la batería, disminuía progresivamente; este proceso se realizó hasta alcanzar el 100% del nivel de carga, tardando en realizarse aproximadamente 3.3h.

Después de las 3:00pm, la irradiancia solar decrece rápidamente y, por ende, la potencia generada por el panel; durante esta fase el controlador suministró la corriente necesaria para compensar la autodescarga de la batería, con el fin de que permaneciera al 100%. Al finalizar el día (i.e. 5:00pm), la batería se encontraba completamente recargada y disponible para alimentar la estación, hasta que fuese sustituida nuevamente por el sol.

Teniendo en cuenta, que el fabricante recomienda una profundidad de descarga máxima del 50% de la batería, y que la corriente de consumo total, por parte de la estación, es de aproximadamente 100mA (Anexo A), se calcula, por medio de la ecuación 5.2.5, el tiempo durante el cual la batería podía alimentar la estación.

$$Tiempo[h] = \frac{C * DOD}{I_{consumo}} \quad 5.2.5$$

Donde;

- C: es la capacidad de la batería en Ah.
- DOD: es la profundidad de descarga.

Como la capacidad de la batería es de 5Ah y la profundidad de descarga máxima es de 0.5, se obtiene que:

$$Tiempo[h] = \frac{5 [Ah] * 0.5}{0.1A} = 25h$$

Finalmente, se obtuvo que el tiempo durante el cual la batería podía haber alimentado la estación era 25 horas; después de este tiempo, la batería debía ser recargada nuevamente por el sistema. De esta manera, se logró comprobar que, efectivamente, el sistema fotovoltaico era capaz de recargar completamente la batería durante las horas de sol para el municipio de Popayán.

5.3. VALIDACIÓN DEL COMPONENTE DE COMUNICACIÓN

Esta etapa, se realizó con el fin de validar la integridad y continuidad en la comunicación de los datos a través de la red Sigfox. La integridad física de los datos es una cualidad importante de un sistema de comunicación que garantiza una información exacta, homogénea y coherente, a medida que conserva la naturalidad del mensaje desde la generación (i.e. Captación por la estación) hasta su destino (i.e. Plataforma Sigfox Backend), durante el proceso de transmisión. La manera en que se validó esta cualidad, fue a través de la comparación de igualdad de los datos que se obtuvieron y posteriormente se almacenaron en la Memoria flash de la estación de monitoreo, con respecto a los datos que se almacenaron en el Sigfox Backend, durante la prueba de campo en Campo Real que se realizó para la validación del sensor de nivel y estimación del caudal (sección 5.1).

En primer lugar, se descargaron los datos desde el SigFox Backend en formato CSV, y se recolectaron los datos de la Memoria flash del dispositivo, que se almacenaron durante la semana de prueba. Una vez se obtuvo los dos conjuntos de datos, se realizó el proceso de separación del mensaje y conversión al formato decimal para posibilitar el estudio; por último, se realizó la superposición de ambas gráficas para determinar la igualdad entre las series de datos, como se indica en la figura 5.3.19.

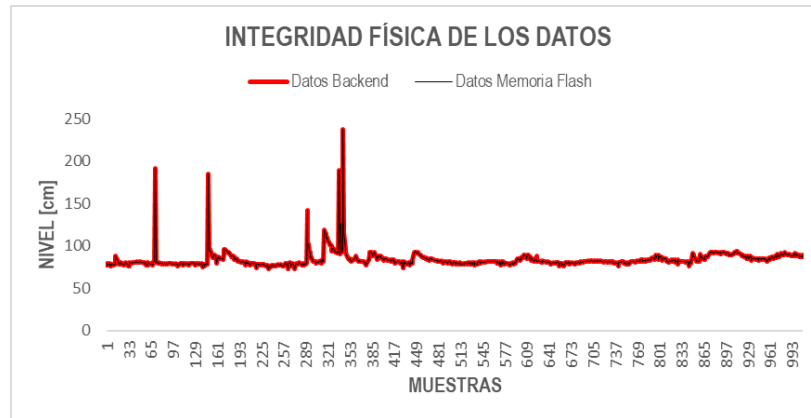


Figura 5.3.19 Datos almacenados en el SigFox Backend y en la Memoria flash durante la semana de prueba en Campo Real
Fuente: Propia

Como se observa en la anterior figura, el comportamiento de las dos señales aparentemente es idéntico; sin embargo, la manera de obtener un dato más preciso que asegure dicha igualdad, es por medio del cálculo del error absoluto (ε_{abs}) entre ambas series, el cual se puede expresar como la acumulación de la diferencia entre los datos correspondientes a cada serie, tal como se expresa en la ecuación 5.3.6.

$$\varepsilon_{abs} = \sum_{i=1}^n (X_i - Y_i) \quad 5.3.6$$

Después de resolver la ecuación anterior, se obtuvo que el error absoluto era igual a cero, lo que indica que las series de datos efectivamente son idénticas.

Por otra parte, la transmisión ininterrumpida o continua del sistema de comunicación se validó a través de la comparación entre la totalidad de los mensajes que teóricamente debió haber transmitido el dispositivo, bajo una frecuencia de diez minutos, con respecto a la cantidad de mensajes que se almacenaron en el Sigfox Backend, durante los siete días de prueba en Campo Real. Además, se verificó que la marca temporal de inicio y parada de la prueba, coincidiera con la real. La tabla 5.3.9 contiene el resumen de los datos crudos que se descargaron desde el Backend, con su respectiva estampa de tiempo.

Tabla 5.3.9 Cantidad de mensajes transmitidos y fecha de inicio/parada de la prueba en Campo Real

Fuente: Propia

FECHA	DATA	SECUENCIA
12/02/2021 15:11	0b63bb0000005916302059	1
19/02/2021 15:01	0d332a0000004d11b12042	1008

La cantidad de datos que teóricamente debieron transmitirse, se puede calcular por medio de la ecuación 5.3.7.

$$C_{datos_T} = 144 * \text{Numero de días} \quad 5.3.7$$

Donde;

- C_{datos_T} : es la cantidad esperada de datos recibidos por el Backend durante el periodo de prueba.
- 144: es la cantidad máxima de mensajes que diariamente se pueden transmitir en la red Sigfox.
- *Numero de días*: es el número de días que tardó la prueba.

Resolviendo la ecuación se obtuvo la siguiente cantidad teórica de datos:

$$C_{datos_T} = 144 * 7 = 1008$$

Al comparar este resultado con el valor final de la secuencia de datos expresado en tabla 5.3.9 se logró comprobar que el sistema de comunicación transmitió sin interrupciones durante el periodo de prueba y, por ende, se entiende que no se presentaron pérdidas de mensajes por interferencia. Cabe decir que, a diferencia de una simple observación cuya única finalidad es ayudar a elaborar predicciones y avisos, un registro hidro-climático continuo e ininterrumpido es la base fundamental de muchos estudios importantes en los que participan una gran variedad de comunidades. Los conjuntos de datos homogéneos son de vital importancia para responder a las necesidades de la investigación, las aplicaciones y los servicios de usuarios referentes al reporte de las condiciones hidrológicas y climáticas de la zona.

5.4. VALIDACIÓN DEL COMPONENTE DE VISUALIZACIÓN

Esta etapa, se realizó con el fin de validar la información que se genera en las aplicaciones Web y Móvil, y la respectiva comunicación de las alarmas por parte de la aplicación Móvil. Para ello, se implementó una extensión de Google Chrome denominada Postman; básicamente se trata de una herramienta que permite emular el Sigfox Backend en la retransmisión de los mensajes por medio de peticiones HTTP REST hacia la BBDD [95].

5.4.1. Validación de la App Móvil

En primer lugar, se validó lo referente a la representación de la información, siguiendo el procedimiento descrito en el diagrama de la figura 5.4.20, el cual parte del envío, desde Postman hacia la BBDD, de una trama idéntica a la que es transmitida por el dispositivo Soul One desde la estación de monitoreo,

donde se representa en 22 dígitos hexadecimales los valores de temperatura, humedad, velocidad del viento, precipitación, nivel, voltaje de la batería, dirección del viento y presión atmosférica, bajo el mismo orden.

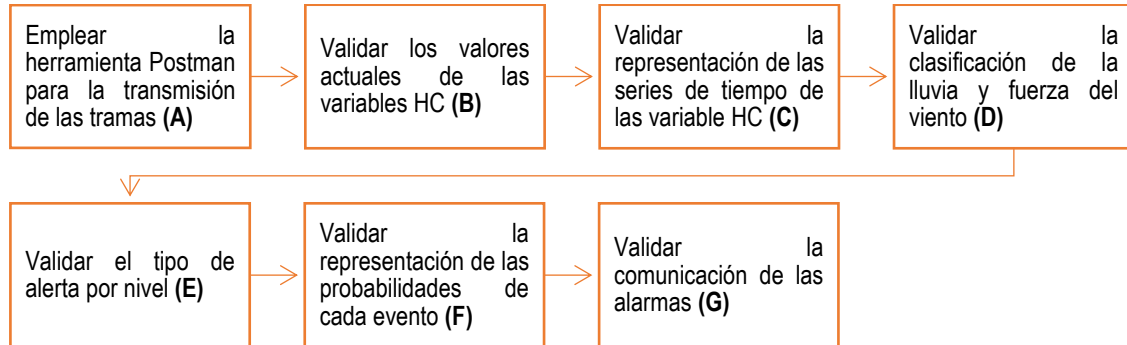


Figura 5.4.20 Etapas para la validación de la App móvil
Fuente: Propia

Sección A: Siguiendo el mismo proceso empleado por la estación para la preparación y transmisión de la trama, se eligieron los siguientes valores:

- Temperatura: $(25,8^{\circ}\text{C} \cdot 10) = 258$
- Humedad: $(70\%) = 70$
- Velocidad del viento: $(500 \text{ pulsos}) = 500$
- Precipitación: $(15 \text{ pulsos}) = 15$
- Nivel: $120\text{cm} = 120$
- Voltaje de la batería: $(12,8\text{V} \cdot 10) = 128$
- Dirección del viento: $(\text{Norte}) = 1$
- Presión atmosférica: $(828.3\text{hPa} \cdot 10) = 8283$

Después de haber convertido los valores al sistema hexadecimal y construido una única trama, conservando siempre el mismo orden, se obtuvo el siguiente resultado de 22 dígitos, que corresponde a la vez, al mensaje que se debía enviar desde Postman: "1020460640F0788001205B", figura 5.4.21.



Figura 5.4.21 Trama "Soul One" enviada desde Postman
Fuente: Propia

Una vez enviado el mensaje, este es recibido por Node.js. En esta fase, se realiza la separación del mensaje y posteriormente la asignación del valor correspondiente a cada variable; además, se estima el caudal, se determina el tipo de alerta por nivel, se clasifica la lluvia de acuerdo a su intensidad y se clasifica la fuerza del viento de acuerdo a su velocidad. Los valores correspondientes al acumulado de precipitación en diez minutos y la velocidad media del viento en diez minutos, se obtuvieron por medio de las ecuaciones 5.4.8 y 5.4.9, respectivamente.

$$PP = \#pulsosP * ResolucionP \quad 5.4.8$$

$$PP = 15 * 0.2794mm = 4.191mm$$

$$VV = \frac{\#pulsosA * ResolucionA}{tiempo} \quad 5.4.9$$

$$VV = \frac{500 * 0.66m}{600s} = 0.55m/s$$

La clasificación de la fuerza del viento, se realizó comparando el valor anterior con respecto a la tabla 3.1.2, donde se tiene que, a una velocidad de 0.55m/s corresponde a un viento Calmado. Con respecto a la clasificación de la lluvia, en primer lugar, se obtuvo la intensidad en una hora, por medio de la relación de proporcionalidad (ecuación 5.4.10).

$$Intensidad_{Hora} = \frac{4.191 * 60}{10} = 25.146mm/hora \quad 5.4.10$$

Después de obtener la intensidad, se compara dicho valor con respecto a la tabla 3.1.3, donde se tiene que para una intensidad de 25.146mm/hora corresponde a una lluvia Fuerte. La dirección del viento se obtuvo comparando el valor transmitido (i.e. 1) con las equivalencias de la tabla 2.2.7, la cual indica que un valor de "1" corresponde a la dirección Norte. Para la estimación del caudal, en primer lugar, se establecieron, a manera de ejemplo, los parámetros morfométricos y físico-hidráulicos de la tabla 5.4.10.

Tabla 5.4.10 Parámetros de ejemplo

Fuente: Propia

PARÁMETROS		
Nomenclatura	Valor	Unidad
<i>b</i>	6,60	m
<i>Pc1</i>	1,75	m
<i>Lc</i>	16630	m
<i>n</i>	0,03	
<i>l1</i>	2,30	m
<i>l2</i>	2,75	m
<i>T</i>	6,70	m
<i>Pc2</i>	1,82	m
<i>Hmax</i>	2850	msnm
<i>Hmin</i>	1756	msnm

De acuerdo a estos parámetros, se desarrollaron cada una de las ecuaciones de flujo descritas en la sección 2.2.2, donde se obtuvieron los siguientes resultados.

Tabla 5.4.11 Estimación del caudal para la validación de la App Móvil

Fuente: Propia

MEDICIONES		
Nomenclatura	Valor	Unidad
B1	23,61	°
B2	32,44	°
Asm	7,18	m ²
y	1,20	m
S	0,06	%
W1	1,31	m
W2	1,42	m
P	8,13	m
R	0,88	m
Vm	0,76	m/s
Q	4,73	m ³ /s

Sección B: en la figura 5.4.22, se puede observar que efectivamente en la pantalla “Inicio” de la App Móvil, se representaron correctamente el valor actual de las variables hidroclimatológicas.



Figura 5.4.22 Validación de la pantalla Inicio de la App Móvil

Fuente: Propia

Sección C: en la figura 5.4.23, se puede observar que efectivamente en la pantalla “Históricos” de la App Móvil, se agregó correctamente cada uno de los valores actuales de las variables hidroclimatológicas.

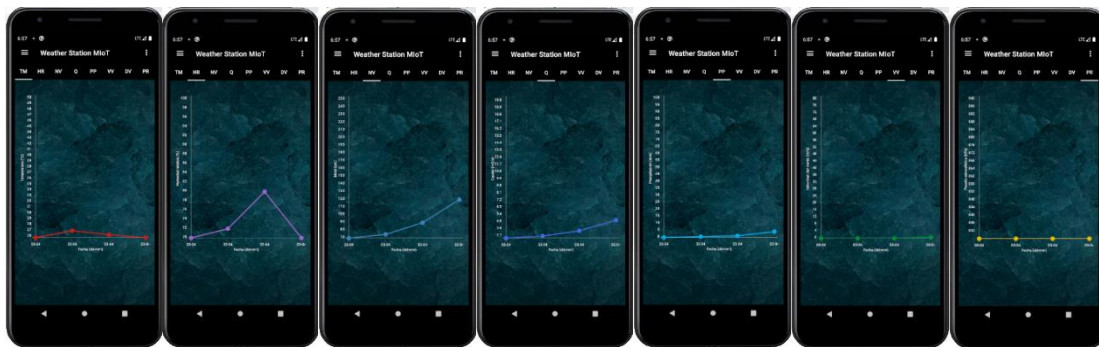


Figura 5.4.23 Validación de la pantalla Históricos de la App Móvil

Fuente: Propia

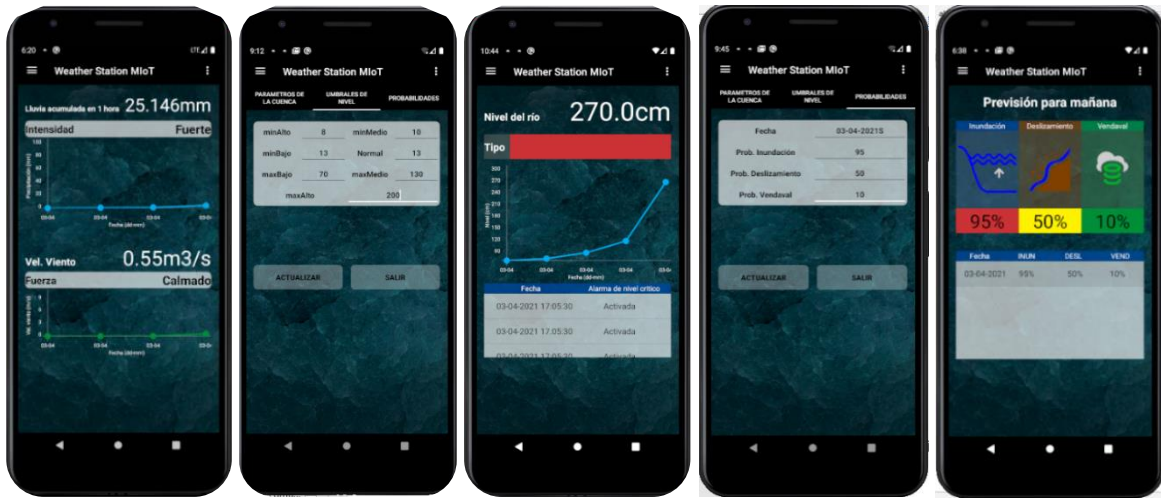
Sección D: en la figura 5.4.24 a, se puede observar que en la pantalla “Int. Lluvia, Fuerza viento” de la App Móvil, se clasificó y representó correctamente cada una de las clasificaciones.

Sección E: antes de validar la generación del tipo de alerta por nivel, fue necesario ingresar manualmente los umbrales de nivel en la sección “Ajustes” pantalla “Umbrales de nivel”, figura 5.4.24 b; para ello, se debe realizar el proceso de autenticación.

Los valores de la anterior pantalla, se establecieron a manera de ejemplo. Como la generación del tipo de alerta por nivel se realiza en el momento en que el Esclavo1 comunica el mensaje de alerta a través del dispositivo Breakout desde la estación de monitoreo, se implementó nuevamente la herramienta Postman. En este caso, se envió una trama idéntica a la que es transmitida por el dispositivo Breakout, es decir, una trama de cuatro dígitos hexadecimales que contuviera el valor de la variable nivel, que, para esta prueba, se eligió de 270cm (010E, hexadecimal). Como este valor supera el máximo umbral (i.e. 200cm) definido en la figura 5.4.24 c, el tipo de alerta por nivel, corresponde a “Alerta roja”. En la figura 5.4.26, se puede observar que en la pantalla “Alarma por nivel” de la App Móvil, se clasificó y representó correctamente el nivel del río y el tipo de alerta.

Sección F: para la validación de la representación de los resultados del modelo predictivo, en primer lugar, fue necesario ingresar manualmente las probabilidades en la sección “Ajustes” pantalla “Probabilidades”, figura 5.4.24 d; para ello, se debe realizar el proceso de autenticación.

Después de haber ingresado manualmente los resultados del modelo predictivo, el tipo de alerta por probabilidad es determinado en la pantalla “Probabilidad” de acuerdo a los rangos establecidos en la tabla 3.1.5. En la figura 5.4.24 e, se puede observar que en la pantalla “Probabilidad” de la App Móvil, se clasificó y representó correctamente los porcentajes de probabilidad y el tipo de alerta para cada evento.



a. Int. Lluvia, F. viento b. Umbral de nivel c. Alarma por nivel d. Probabilidades e. Probabilidad

Figura 5.4.24 Validación de las pantallas App móvil

Fuente: Propia

Sección G: para la validación de la comunicación de las alarmas, se verificó, en primer lugar, si cualquiera de las clasificaciones realizadas anteriormente superó el máximo permisible, es decir, aquel valor clasificado como alerta roja, viento fuerte o lluvia torrencial. Después de haber realizado este procedimiento, se identificó, que tanto el tipo de alerta por nivel, como la probabilidad de inundación, se habían clasificado como “Alerta roja” por nivel y “Alerta roja” por probabilidad, respectivamente; de esta manera, al comparar dichos resultados con la figura 5.4.28, se determinó que desde la App Móvil tendría que haberse comunicado un tipo de alarma. En la 5.4.25, se puede observar que efectivamente se comunicó las alarmas “Alarma roja por nivel máximo” y “Alarma roja por probabilidad de inundación”, a través de notificaciones y correo electrónico.

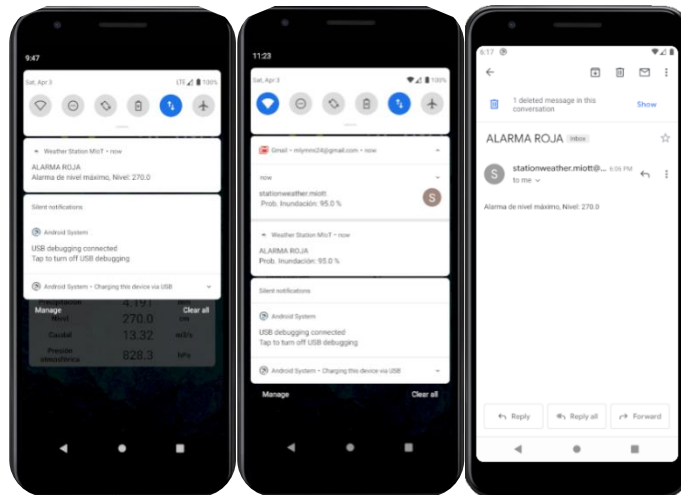


Figura 5.4.25 Validación de la comunicación de alarmas por la App Móvil

Fuente: Propia

5.4.2. Validación de la aplicación Web

La validación de la aplicación Web se realizó siguiendo un procedimiento similar al empleado en la validación de la App móvil, el cual se describe en el diagrama de la figura 5.4.26.

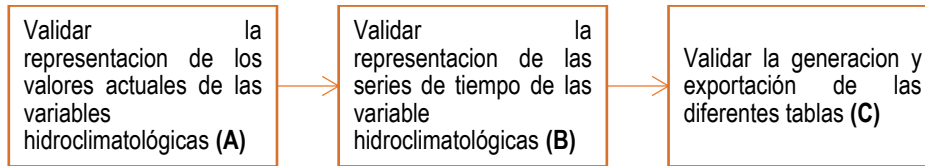


Figura 5.4.26 Etapas para la validación de la aplicación Web

Fuente: Propia

Sección A: en vista de que la actualización de la información se realiza de manera simultánea en las aplicaciones del sistema de visualización (i.e. App Móvil y Página Web), en las diferentes secciones de la página Web debería visualizarse la misma información obtenida en el proceso de validación de la App Móvil. En la figura 5.4.27, se puede observar que efectivamente esta página contiene el valor actual de cada una de las variables hidroclimatológicas.

VARIABLES HIDROCLIMATOLÓGICAS

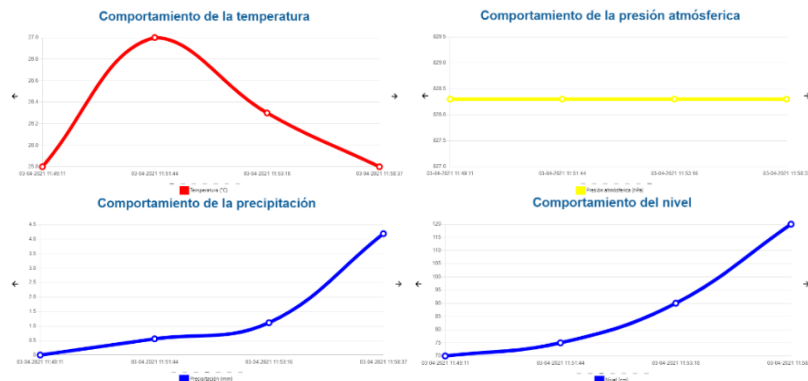
25.8°C 70%

Nivel	Caudal	Precipitación	Velocidad del viento	Dirección del viento	Presión atmosférica
120.0cm	4.73m3/s	4.191mm	0.55m/s	N	828.3hPa

Figura 5.4.27 Validación de la página de Variables hidroclimatológicas del sitio Web

Fuente: Propia

Sección B: para la validación de la página de representaciones gráficas, se verificó si en dichas representaciones se había registrado correctamente el valor actual de cada variable. En la figura 5.4.28, se puede observar que efectivamente se agregó cada uno de los valores actuales de las variables hidroclimatológicas.



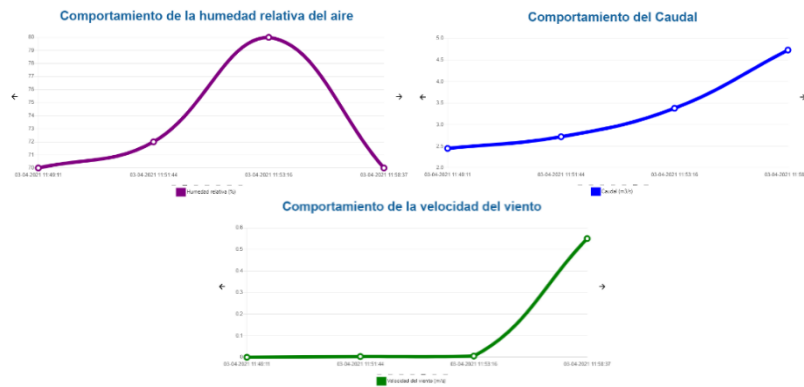


Figura 5.4.28 Validación de la página de representaciones gráficas del sitio Web
Fuente: Propia

Sección C: para la validación de la página que contiene las tablas exportables de la base de datos, se verificó que el último registro correspondiera a la información actual del sistema. En la figura 5.4.29, se muestra la información contenida en la tabla de medidas hidroclimatológicas.

Medidas HidroClimatológicas

Registro	Fecha	Temperatura (°C)	Humedad del aire (%)	Velocidad del viento (m/s)	Dirección del viento (°)	Precipitación (mm)	Nivel (cm)	Caudal (m³/s)	Presión (hPa)
1	03-04-2021 11:49:11	25.8	70	0	N	0	70.0	2.45	828.3
2	03-04-2021 11:51:44	27	72	0.0033	N	0.5588	75.0	2.72	828.3
3	03-04-2021 11:53:16	26.3	80	0.0055	N	1.1176	90.0	3.38	828.3
4	03-04-2021 11:58:37	25.8	70	0.55	N	4.191	120.0	4.73	828.3

Figura 5.4.29 Validación de la información representada en la tabla de Variables hidroclimatológicas del sitio Web
Fuente: Propia

La tabla de la figura 5.4.30, almacena información referente a las alertas por nivel que se hayan generado hasta el momento.

Alarmas por nivel del rio

Registro	Fecha	Nivel	Tipo
1	03-04-2021 11:49:11	70.0	Verde
2	03-04-2021 11:51:44	75.0	Verde
3	03-04-2021 11:53:16	90.0	Verde
4	03-04-2021 11:58:37	120.0	Verde

Figura 5.4.30 Validación de la información representada en la tabla de Alarmas por nivel del sitio Web
Fuente: Propia

La tabla de la figura 5.4.31, almacena información referente a las clasificaciones de intensidad de lluvia y fuerza del viento que se hayan generado hasta el momento.

Intensidad de lluvia, fuerza del viento



Registro	Fecha	Precipitación	Intensidad de lluvia	Velocidad del viento	Fuerza del viento
1	03-04-2021 11:49:11	25.146	Inapreciable	0.55	Calmado
2	03-04-2021 11:51:44	25.146	Moderado	0.55	Calmado
3	03-04-2021 11:53:16	25.146	Moderado	0.55	Calmado
4	03-04-2021 11:58:37	25.146	Fuerte	0.55	Ventolina

Figura 5.4.31 Validación de la información representada en la tabla Intensidad de lluvia, fuerza del viento del sitio Web

La tabla de la figura 5.4.32, almacena información referente a los resultados del modelo predictivo que se hayan registrado manualmente hasta el momento.

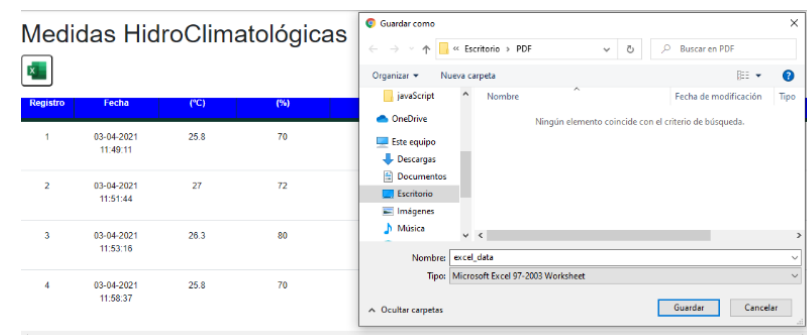
Probabilidad de ocurrencia



Fecha	Inundación	Deslizamiento	Deslizamiento
03-04-2021	95	50	10

Figura 5.4.32 Validación de la información representada en la tabla Probabilidad de ocurrencia del sitio Web
Fuente: Propia

Por último, se verificó que la información contenida en las tablas del sitio Web, fuesen exportables, figura 5.4.33.



Registro	Fecha	(°C)	(%)
1	03-04-2021 11:49:11	25.8	70
2	03-04-2021 11:51:44	27	72
3	03-04-2021 11:53:16	26.3	80
4	03-04-2021 11:58:37	25.8	70

Figura 5.4.33 Validación de la exportación de las tablas del sitio Web
Fuente: Propia

En conclusión, se puede observar que efectivamente en cada una de las tabas del sitio Web se registró de manera automática y correcta, la información que el sistema había generado hasta el momento sobre las variables hidroclimatológicas, alertas, clasificaciones y los resultados del modelo predictivo.

5.5. VALIDACIÓN DEL COMPONENTE DE ANALISIS

Para el desarrollo de esta etapa, en primer lugar, fue necesario definir la arquitectura de la red NNARX y las funciones que la regirían, después se sometió la red a una fase de aprendizaje supervisado donde se entrena para que “aprenda” a medida que se modifican sus pesos sinápticos, adaptándolos paulatinamente para que la respuesta de la red sea la correcta. Una vez terminada la fase de aprendizaje, se sometió la red a una nueva fase, denominada como fase de prueba, donde la red ya puede generalizar; es decir, ante entradas similares a las de un juego de ensayo proporcionado durante el entrenamiento (i.e. Patrón de estímulo-respuesta deseada), producirá salidas correctas. Hay que tener en cuenta que es muy difícil obtener la capacidad de generalización de una red sin utilizar grandes cantidades de datos y que estos sean muy variados.

En la tabla 5.5.12, se consignan los errores que se obtuvieron de la implementación de cada uno de los treinta y dos casos de prueba definidos en la sección 4.1.3 para la fase de entrenamiento y prueba; y en la figura 5.5.34, se representa el comportamiento del MSE a medida que se varía la cantidad de neuronas por capa.

Tabla 5.5.12 Desempeño de los diferentes casos de prueba en la etapa de entrenamiento y prueba

Fuente: Propia

CASO	MSE		CASO	MSE		CASO	MSE	
	TRAIN	TEST		TRAIN	TEST		TRAIN	TEST
1	0,0050	0,0066	12	0,0022	0,0067	23	0,0030	0,0063
2	0,0028	0,3391	13	0,0043	0,2585	24	0,0034	0,0158
3	0,0022	0,0165	14	0,0033	0,0082	25	0,0033	0,0373
4	0,0029	0,3192	15	0,0025	0,0201	26	0,0018	0,0093
5	0,0045	0,3355	16	0,0019	0,0195	27	0,0023	0,0597
6	0,0039	0,1963	17	0,0033	0,0311	28	0,0018	0,0913
7	0,0036	0,2495	18	0,0027	0,2192	29	0,0029	0,0119
8	0,0027	0,0852	19	0,0012	0,0110	30	0,0029	0,0399
9	0,0041	0,3347	20	0,0019	0,0095	31	0,0032	0,0055
10	0,0026	0,3206	21	0,0036	0,0214	32	0,0025	0,0069
11	0,0017	0,0068	22	0,0026	0,0122			

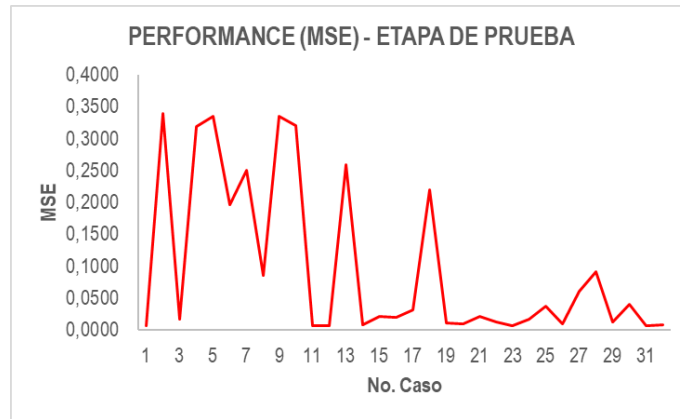


Figura 5.5.34 Comportamiento del MSE de los casos de prueba
Fuente: Propia

El hecho de cambiar el número de neuronas por capa aumentó y disminuyó el tiempo de aprendizaje en cada caso, al igual que el MSE. En la tabla anterior, se puede observar que el mejor resultado en la etapa de prueba corresponde al caso número 31, ya que su MSE es el menor entre los 32 casos; al contrario del caso número 2, el cual obtuvo el máximo MSE. De igual forma, en la figura 5.5.38 se puede observar que el comportamiento del MSE presenta una tendencia decreciente, lo cual quiere decir que a medida que se incrementó el número de neuronas en las capas ocultas, el MSE tendió a disminuir.

Después de haber identificado el mejor caso de prueba, se construye la arquitectura de la red NNARX a partir de éste. En la figura 5.5.35, se presenta la arquitectura de la red NNARX, la cual presenta siete entradas, veinte neuronas en la primera capa oculta, treinta neuronas en la segunda capa oculta y tres salidas.

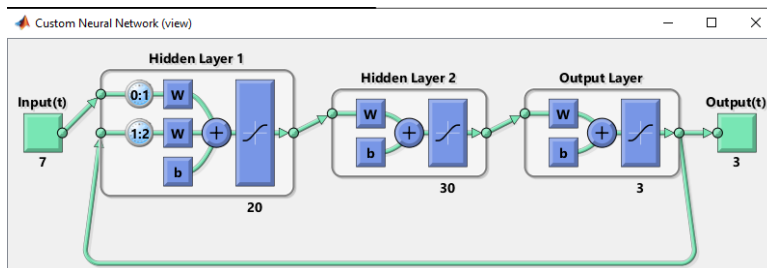


Figura 5.5.35 Arquitectura NNARX del presente estudio
Fuente: Propia

Con respecto al rendimiento predictivo del modelo NNARX construido con base al mejor caso de prueba, figura 5.5.36, se puede decir que los resultados entregados por el modelo presentan una buena aproximación con respecto a los resultados objetivo, al coincidir hasta en un 90%.

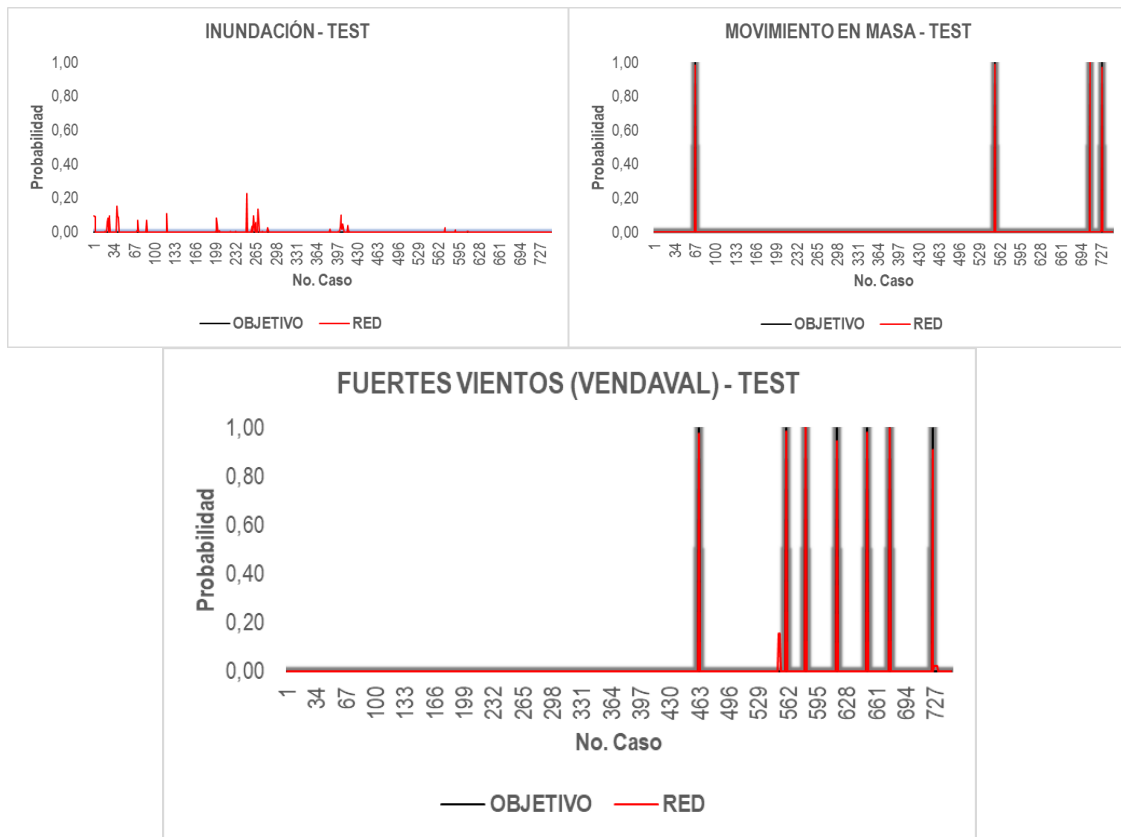


Figura 5.5.36 Generalización de la red NNARX construida a partir del mejor caso de prueba con la función Sigmoidal para la capa de salida
Fuente: Propia

A fin de evaluar la precisión de la red ante cada una de las respuestas, se obtuvieron las métricas de regresión en aprendizaje automático (i.e. Error Medio Absoluto (MAE, del inglés), MSE y el coeficiente de determinación R^2), tabla 5.5.13.

Tabla 5.5.13 Métricas de regresión para evaluar el desempeño de la red NNARX
Fuente: Propia

MÉTRICAS DE REGRESIÓN			
SALIDA	MSE	MAE	R^2
INUNDACIÓN	1,22,E-05	1,28,E-04	0,80
MOV. MASA	1,39,E-31	1,36,E-17	0,98
VENDAVAL	0,00,E+00	0,00,E+00	0,95

El factor de determinación expresa la correlación entre las salidas de la red y las salidas deseadas, donde, un factor de determinación cercano a 1, indica que ambas salidas se encuentran próximas entre sí, o que es lo mismo decir, que el error del modelo predictivo es cercano a 0. Por su parte, el MAE expresa el error promedio de predicción del modelo en unidades de las salidas de interés, en el cual, un resultado bajo indica que el modelo presenta un buen desempeño. Por último, el MSE también

expresa, en términos sencillos, el desempeño de la red, en el cual, un valor cercano a 0 significa que el modelo es perfecto y mayor a 0 significa el modelo es pésimo.

En conclusión, después de haber sometido la red al proceso de aprendizaje, se puede decir que el modelo logró generalizar y dar respuesta ante patrones de estímulos nuevos con una precisión aceptable; es decir, fue capaz de obtener la probabilidad de que se presente una inundación con un R2 del 80%, vendaval con un R2 del 98% o movimientos en masa con un R2 del 95%, a partir de nuevos valores de las variables hidroclimatológicas.

Por otra parte, los modelos predictivos basados en redes neuronales dependen, en gran medida, del volumen y la representatividad de los datos empleados para el entrenamiento; no obstante, el municipio de Popayán dispone de un conjunto de datos limitados por la insuficiencia de estudios en la zona, pudiendo ser gravemente subestimado o sobreestimado el resultado de predicción. En general, cuando aumenta el tamaño y variedad del juego de ensayo disminuye la necesidad de que los datos de entrada durante la fase de trabajo normal se parezcan mucho a los patrones del juego de ensayo empleados para el entrenamiento; es decir, la red generaliza mejor. Asimismo, a una red neuronal es importante mostrarle tanto los patrones de entrada que llevan a evaluaciones positivas, como los patrones de entrada que llevan a evaluaciones negativas; pues de lo contrario, la red simplemente aprenderá que todo es correcto siempre.

Una situación común es entrenar la red con un juego de ensayo que contiene ruido, puesto que en el mundo real en muchas ocasiones no se puede eliminar totalmente el ruido de las mediciones que se realizan; que en últimas, dificulta el proceso de aprendizaje y la capacidad de generalización de la red.

5.6. DESPLIEGUE TECNOLÓGICO

En esta etapa, se implementó el sistema de detección y catalogación en un entorno real, con el fin de evaluar el desempeño general del sistema; es decir, desde la medición de las variables hidroclimatológicas, almacenamiento en la memoria flash, comunicación hacia la base de datos, visualización de la información, hasta la predicción del modelo neuronal. En el diagrama de la figura 5.6.37, se representa la topología del sistema, los elementos de hardware, software y sus relaciones.



Figura 5.6.37 Diagrama de despliegue tecnológico
Fuente: Propia

5.6.1. Implementación de la estación

La instalación y puesta en marcha de la estación se realizó a las 4:00pm del día 26 de abril del 2021; sin embargo, para la prueba de despliegue se tuvieron en cuenta los datos registrados a partir de las 12:01am del día 27 de abril del 2021 hasta las 12:01am del 1 de mayo del 2021, para un total de cuatro días de monitoreo. La figura 5.6.38, muestra la respectiva instalación de la estación para la prueba de despliegue en el punto de monitoreo La Violeta.



Figura 5.6.38 Implementación de la estación en el punto de monitoreo La Violeta
Fuente: Propia

5.6.2. Verificación de almacenamiento

En la prueba de despliegue, se verificó si la memoria flash efectivamente contenía los datos crudos en formato hexadecimal registrados cada cinco minutos para un total de 1152 registros durante los cuatro días de prueba; de igual manera, si contenían la marca temporal, el valor de temperatura, humedad, pulsos del anemómetro, pulsos del pluviómetro, nivel, voltaje de la batería, dirección del viento y la presión atmosférica.

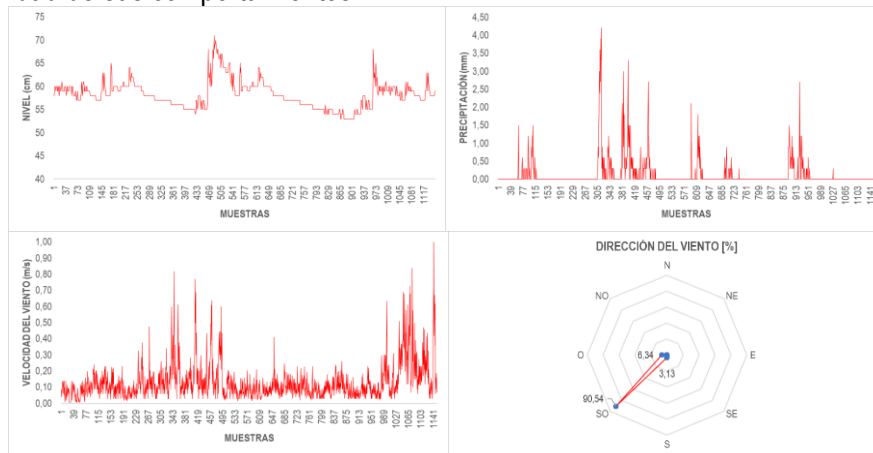
```

Prueba_despliegue: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
1b;04;7e5;00;01;0ba;055;019;00;0e0;99;06;2042
1b;04;7e5;00;06;0bc;054;06d;00;0e1;99;06;2041
1b;04;7e5;00;0b;0bc;054;04d;00;0e2;99;06;203f
1b;04;7e5;00;10;0c1;052;07e;00;0e0;99;03;2040
1b;04;7e5;00;15;0c8;051;05f;00;0e1;99;03;203c
1b;04;7e5;00;1a;0d0;04f;073;05;0e1;99;06;203b
1b;04;7e5;00;1f;0de;04c;069;00;0e1;99;02;203a
1b;04;7e5;00;24;0e2;04b;014;00;0e0;99;02;2036
1b;04;7e5;00;29;0e4;04b;006;00;0df;99;06;2037
1b;04;7e5;00;2e;0e9;04a;01c;00;0e1;99;06;2038
1b;04;7e5;00;33;0ec;04a;035;00;0df;99;02;2038
1b;04;7e5;00;38;0ed;049;055;00;0df;9a;06;2038
1b;04;7e5;00;01;0f7;048;005;00;0df;9a;06;2038
1b;04;7e5;00;06;0f6;04a;015;00;0df;9b;02;2039
1b;04;7e5;00;0b;0fd;048;035;00;0e0;9a;06;203a
1b;04;7e5;00;10;0f3;04a;047;00;0e0;9b;06;203a
1b;04;7e5;00;15;0ef;04b;06c;00;0df;9a;03;203c
1b;04;7e5;00;1a;0f6;04a;06b;00;0e1;9a;06;203c
1b;04;7e5;00;1f;0fa;04b;076;00;0df;9b;06;203c
1b;04;7e5;00;24;0f2;04d;043;00;0df;9c;06;203e
1b;04;7e5;00;29;0ee;04e;07e;00;0e0;9b;06;2040
1b;04;7e5;00;2e;0e9;04f;01c;00;0e0;9b;07;2041
1b;04;7e5;00;33;0e0;04f;004;00;0e0;0c;06;2042

```

Figura 5.6.39 Datos almacenados en la memoria flash durante la prueba de despliegue
Fuente: Propia

Por medio de la figura anterior, se comprobó que en la memoria flash se había registrado correctamente cada una de las observaciones y además contenía la marca temporal correspondiente a cada registro. En la figura 5.6.40, se puede observar la representación gráfica de cada una de las siete variables, que al ser muestreadas a un intervalo de tiempo más corto permite tener una mayor representatividad de sus comportamientos.



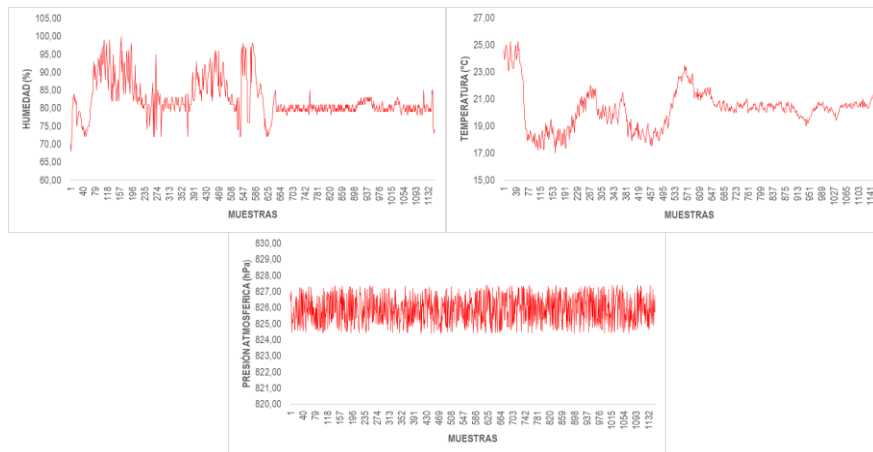


Figura 5.6.40 Datos obtenidos a un menor intervalo de muestreo durante la prueba de despliegue

Fuente: Propia

Del comportamiento del nivel se puede reconocer que los valores oscilaron dentro de un intervalo de 53cm-71cm, asimismo, durante la prueba de despliegue es posible suponer que se presentaron lluvias en la parte alta de la subcuenca (i.e. Aguas arriba) lo que conllevó a un incremento rápido de nivel en el punto de monitoreo, sin embargo, al transcurrir el tiempo se puede observar la respectiva recuperación o disminución del nivel de agua. Del comportamiento de la lluvia se puede reconocer que se presentaron lluvias leves dentro del intervalo 0mm-4.2mm, asimismo, si se relaciona ésta con el comportamiento del nivel, se puede observar que no necesariamente el nivel en el punto de monitoreo se encuentra determinado por la presencia o ausencia de lluvia en ese mismo punto. Del comportamiento de la velocidad del viento se puede reconocer que los valores oscilaron dentro del intervalo 0m/s-1m/s, además, la mayor parte del tiempo la velocidad se mantiene por debajo de 0.35m/s. Del comportamiento de la dirección del viento se puede observar que la mayor parte del tiempo (%) la procedencia del viento corresponde a Sur Oeste (SO). Si se compara los comportamientos de la humedad y la temperatura, se puede observar que tienden a ser inversamente proporcionales, lo que quiere decir que mientras la temperatura incrementa, la humedad del aire disminuye y viceversa; esto se puede deber a que al inicio del día la humedad es más alta y la temperatura es mínima, pero a medida que transcurre el día esta relación cambia; de igual manera, la temperatura osciló dentro del intervalo 17°C-25.3°C y la humedad entre 68%-100%, en el punto de monitoreo. Por último, del comportamiento de la presión barométrica, se puede reconocer que osciló dentro del intervalo 824.4hPa-827.4hPa y que no se presentan tendencias de ningún tipo, es decir que, su comportamiento es meramente estacionario.

5.6.3. Verificación de visualización

En la prueba de despliegue, se verificó la información representada en las aplicaciones Web y Móvil, así como las diferentes alertas y clasificaciones generadas y almacenadas respectivamente en cada una de las tablas de la base de datos. En la figura 5.6.41, se puede observar la representación gráfica de los históricos correspondiente a cada una de las variables, además se puede apreciar la representación de la variable caudal que fue estimada en Node.js y posteriormente almacenada en la base de datos.

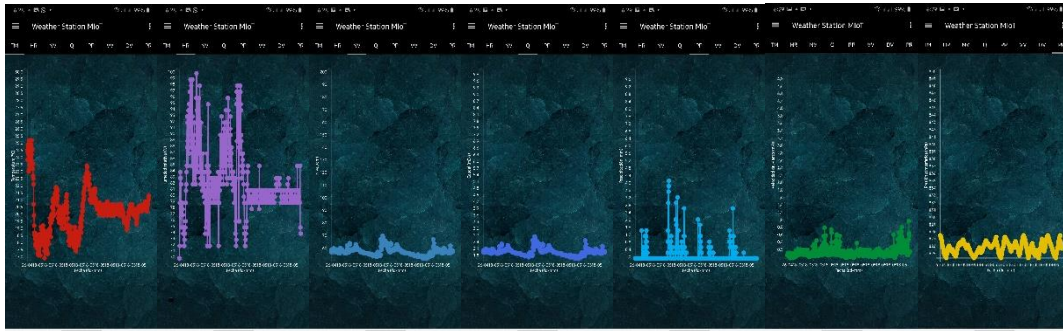


Figura 5.6.41 Contenido de la pantalla Históricos de la aplicación Android durante la prueba de despliegue
Fuente: Propia

En la anterior figura se puede observar que la representación de cada variable, efectivamente corresponde a la información que se almacenó en la memoria flas de la estación, a diferencia de que los datos transmitidos se muestrearon a un intervalo de diez minutos en lugar de un intervalo de muestreo de cinco minutos empleado para el almacenamiento. En la figura 5.6.42, se puede observar la información representada en las pantallas Alarma por nivel, Int. Lluvia, Fuerza viento e Inicio, respectivamente, y además corresponde al último mensaje transmitido en la prueba de despliegue.

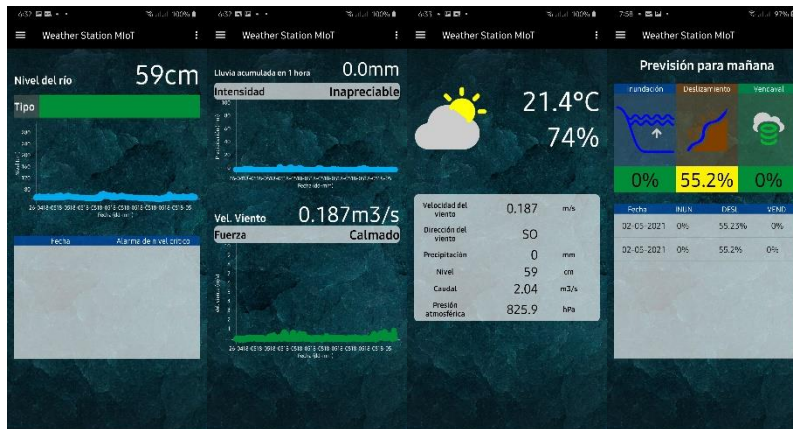


Figura 5.6.42 Contenido de las pantallas Alarma por nivel, Int. Lluvia, Fuerza viento e Inicio en la prueba de despliegue
Fuente: Propia

En la anterior figura se puede observar que efectivamente se determinó el tipo de alerta por nivel, se clasificó la lluvia y fuerza del viento, y se representaron los valores actuales de las variables, con base al último valor transmitido en la prueba de despliegue. Por otra parte, debido a que, en ningún momento durante la prueba el valor de las variables nivel, velocidad del viento y lluvia, superaron los valores máximos establecidos los cuales representan un estado crítico de cada variable, no se declaró ningún estado de alarma y por ende la aplicación Android no comunicó ninguna eventualidad de esta índole.

Asimismo, en el sitio Web se verificó el contenido de cada página, con el fin de determinar si se había representado correctamente toda la información.

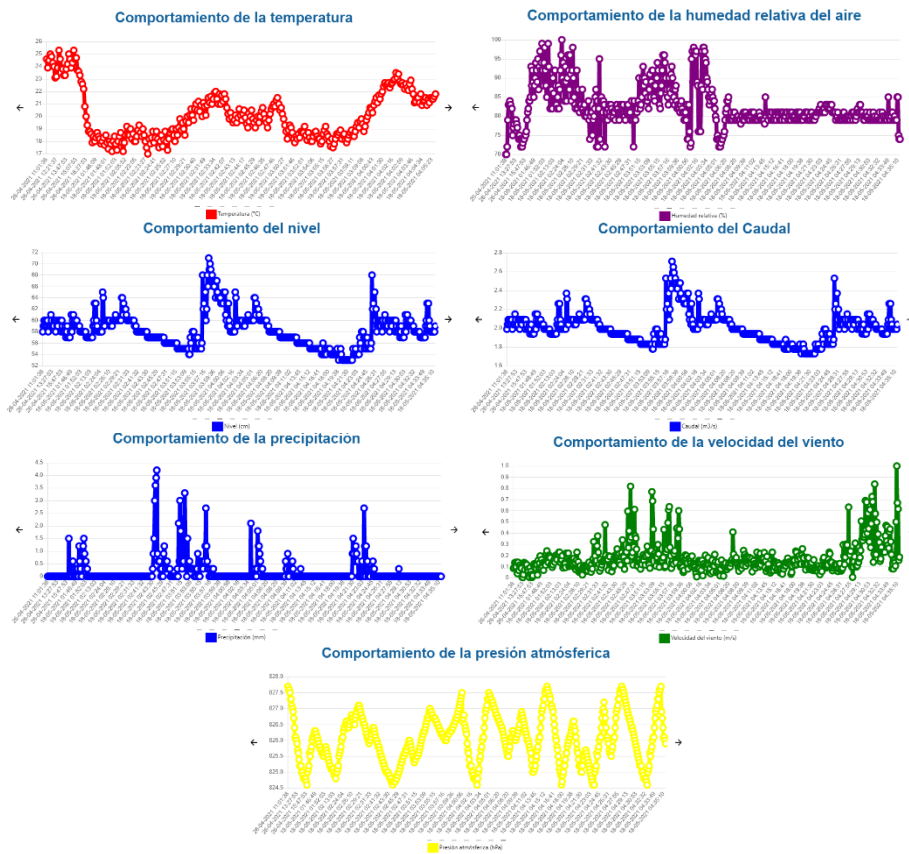


Figura 5.6.43 Contenido de la seccion Gráficas de la Pagina Web en la prueba de despligue Fuente: Propia

Con respecto a los datos que representados en el sitio Web, se tiene que corresponden exactamente a los que se representaron en la aplicacion Android y a los datos que se almacenaron en la memoria flash de la estacion. Ademas, desde el mismo sitio, se verificó el contenido de cada una de las tablas de la base de datos, figura 5.6.44.

Medidas HidroClimatológicas									
Registro	Fecha	Temperatura (°C)	Humedad del aire (%)	Velocidad del viento (km/h)	Dirección del viento (°)	Precipitación (mm)	Nivel (m)	Caudal (m³/s)	Presión (hPa)
1	25-04-2021 11:01:38	24.5	79	0.9859	50	0	58	1.90	0.777
1	25-04-2021 11:11:38	23.0	79	0.9959	50	0	59	2.04	0.725
2	28-04-2021 11:21:37	24.5	72	0.1384	50	0	60	2.99	0.728
3	28-04-2021 11:31:37	25	76	0.1384	0	0	63	7.04	0.755

Intensidad de lluvia, fuerza del viento					
Registro	Fecha	Precipitación	Intensidad de lluvia	Velocidad del viento	Fuerza del viento
1	25-04-2021 11:01:38	0	Inapreciable	0.0059	Calmado
1	25-04-2021 11:11:38	0	Inapreciable	0.0025	Calmado
3	25-04-2021 11:21:37	0	Inapreciable	0.0164	Calmado
3	28-04-2021 11:31:37	0	Inapreciable	0.1387000000000002	Calmado
4	29-04-2021 11:41:37	0	Inapreciable	0.1001000000000001	Calmado
5	29-04-2021 11:51:37	0	Inapreciable	0.1201000000000002	Calmado

Alarmas por nivel del rio				
Registro	Fecha	Nivel	Tipo	
1	25-04-2021 11:01:38	58	Verde	
1	25-04-2021 11:11:38	60	Verde	
2	25-04-2021 11:21:37	60	Verde	
3	25-04-2021 11:31:37	59	Verde	
4	25-04-2021 11:41:37	60	Verde	
5	29-04-2021 11:51:37	60	Verde	

Probabilidad de ocurrencia			
Fecha	Intensidad	Desarrollo	Desarrollo
28-04-2021	0	54.77%	0
30-04-2021	0	0.71%	0
01-05-2021	0	50.81%	0
03-05-2021	0	55.23%	0

Figura 5.6.44 Contenido de las tablas de la base de datos en la prueba de despligue Fuente: Propia

En la tabla “Medidas Hidroclimatológicas” se puede observar que se almacenó correctamente el valor correspondiente a cada variable, con su respectiva marca temporal. Por su parte, en la tabla “Intensidad de lluvia, fuerza del viento” se puede observar que se realizó la respectiva clasificación de la lluvia de acuerdo a su intensidad y la clasificación de la fuerza del viento de acuerdo a su velocidad, a medida que llegaba cada mensaje desde la estación. De igual manera, en la tabla “Alarmas por nivel” se puede observar que se determinó correctamente el tipo de alerta por nivel a medida que llegaba cada mensaje y se almacenaba en la base de datos. Con respecto a la tabla “Probabilidad de ocurrencia” debido a que era necesario primeramente obtener el total de 144 mensajes por día (i.e. Final del día) para calcular los respectivos indicadores que se utilizan como vectores de entrada a la red neuronal, se obtuvo un total de cuatro resultados, los cuales representan la probabilidad de ocurrencia de una inundación, vendaval y movimiento en masa, para el siguiente día en el municipio Popayán.

5.6.4. Verificación de predicción

En la prueba de despliegue, se compararon los resultados del modelo predictivo con la situación que se presentó realmente en el municipio de Popayán durante los cuatro días de la prueba. En la figura 5.6.45, se pueden observar cada uno de los resultados del modelo predictivo que se obtuvieron diariamente después de que la estación comunicara la totalidad de las mediciones correspondientes a cada día; es decir, al final de cada día.

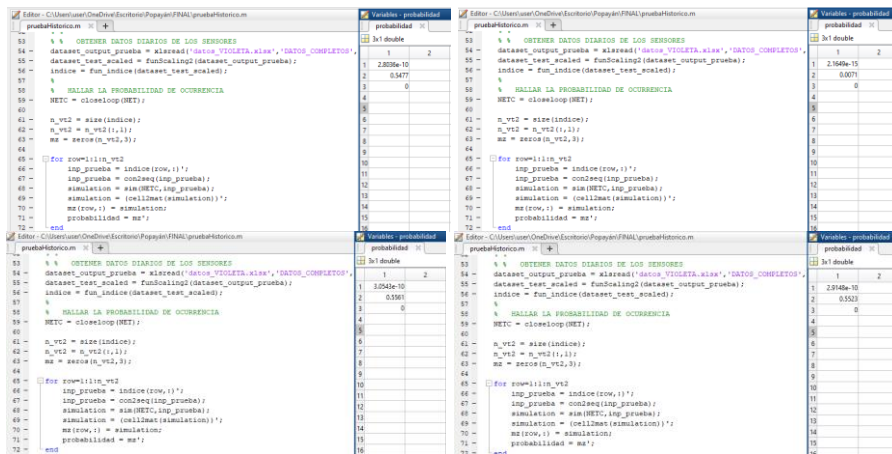


Figura 5.6.45 Predicción del modelo NNARX en la prueba de despliegue
Fuente: Propia

En la tabla 5.6.14, se relacionan las predicciones correspondientes al día siguiente.

Tabla 5.6.14 Resultados del modelo NNARX en la prueba de despliegue
Fuente: Propia

EVENTOS	28/04/2021	29/04/2021	30/04/2021	1/05/2021
INUNDACIÓN	2,803 ⁻¹⁰	2,164 ⁻¹⁵	3,054 ⁻¹⁰	2,914 ⁻¹⁰
MOV. EN MASA	0,547	0,007	0,556	0,552
VENDAVAL	0	0	0	0

Debido a que durante los cuatro días en que se realizó la prueba de despliegue no se presentaron realmente ninguno de los eventos evaluados, se concluye que al presentarle a la red NNARX estímulos o patrones de entrada desconocidos que se obtuvieron por medio de la estación de monitoreo, ésta comete un error absoluto con respecto a los resultados reales hasta del 54.7% en la predicción de movimiento en masa, 0% en la predicción de vendaval, y hasta del $3.054E-8\%$ en la predicción de inundación; en otras palabras, presenta una capacidad de generalización baja. Este resultado se puede deber a lo siguiente:

- Se debe tener en cuenta que es muy difícil obtener la capacidad de generalización de una red sin utilizar grandes cantidades de datos y que estos sean muy variados.
- Para conseguir un mejor rendimiento de generalización, los datos usados para el entrenamiento deben cubrir un rango de hechos suficientemente amplio.
- Es posible que la red haya aprendido los patrones existentes en el juego de ensayo, pero realmente no ha sido capaz de abstraer y generalizar las relaciones entre los mismos, por lo que esta red necesita ser reentrenada con un conjunto de datos más amplio que cubra todas las combinaciones que se deban conocer.
- Es posible que a pesar de haber implementado un filtro pasa-bajos en la etapa de medición de las variables, no se haya eliminado por completo el ruido del ambiente, de manera que los valores registrados contienen información que no representa únicamente a la variable.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

Se ha propuesto el desarrollo e implementación de un sistema para la detección y clasificación de los eventos que han golpeado con mayor fuerza el municipio de Popayán (i.e. Inundaciones, vendavales y movimientos en masa) a partir del monitoreo de variables hidroclimatológicas, como una herramienta tecnológica coadyuvante en los procesos de adaptación a la variabilidad climática que se desarrollan en la región, donde se busca salvaguardar la vida y riqueza de los habitantes del municipio alertando, principalmente, a las comunidades ubicadas en zonas de alto riesgo ante una posible emergencia.

- La implementación del modelo matemático permite estimar el caudal con una precisión hasta del 90%; no obstante, debido a que las cuencas presentan un cambio continuo y consigo sus parámetros morfométricos y físico-hidráulicos lo cual es provocado por causas naturales y antrópicas (e.g. Cambio climático, usos del suelo), implica que el modelo deba ser ajustado periódicamente.
- La implementación de un filtro pasa-bajo en la etapa de medición permite, en gran medida, minimizar el error en las lecturas; asimismo, la implementación de un controlador de carga PWM permite aprovechar mejor el recurso solar, recargando por completo la batería a medida que realiza el proceso de carga de manera gradual, constante y sistemática durante las horas de sol.
- La tecnología de comunicación SigFox, resulta ser una solución competente y económica, debido a que no requiere de una mayor inversión para su implementación y además permite transmitir a larga distancia y a un muy bajo consumo, garantizando siempre la integridad y totalidad de los datos.
- Disponer de un registro ininterrumpido y coherente en la base de datos, permite realizar estudios con una mayor precisión; para ello, es necesario realizar un mantenimiento preventivo de la estación de monitoreo, donde se revise el estado de los sensores, se haga una limpieza de la cobertura vegetal en el lugar de emplazamiento y se revisen las conexiones eléctricas.
- La aplicación móvil se desarrolló en conformidad a las necesidades básicas de un sistema de alertas tempranas real (i.e. SAT Molino) descritas en el Anexo B, en cuanto a la representación de la información generada, donde se requiere visualizar en tiempo real el valor de las variables ambientales, representar gráficamente los históricos de cada variable de manera que permita abstraer información sobre su comportamiento, representar las diferentes alertas del sistema de manera clara y precisa, y restringir el acceso para la modificación y actualización de parámetros esenciales.
- La implementación de un sistema que detecte y estime la probabilidad de ocurrencia, permite realizar el respectivo seguimiento antes y durante la generación de cada uno de los eventos de una manera efectiva.
- La implementación de modelos para la predicción de eventos hidrometeorológicos basados en Redes Neuronales Recurrentes, más específicamente en la red NNARX, resulta ser una técnica muy efectiva siempre que se disponga de un gran volumen de datos representativos y de calidad para las respectivas fases de entrenamiento y prueba. Desafortunadamente, Popayán dispone de

un conjunto de datos limitados por la insuficiencia de estudios en la zona, pudiendo ser gravemente subestimado o sobreestimado el resultado de predicción.

- El hecho de que en Popayán no haya estaciones que monitoreen la totalidad de las variables hidroclimatológicas que se requieren para la implementación del modelo predictivo, incrementa el nivel de incertidumbre que se tiene acerca del dataset para el entrenamiento y prueba de la red, al tener que recopilar los datos de estaciones de diferentes entidades, que utilizan diferentes sensores, diferentes métodos de observación, que se acogen a estándares diferentes y que quizás no se encuentran ubicadas en lugares representativos de la ciudad para este tipo de estudios.

6.2. Recomendaciones

- En lugar de implementar dos tarjetas de adquisición en la estación de monitoreo (i.e. Arduino Mega y Soul One) y complicar la lógica de desarrollo, se recomienda utilizar únicamente un Arduino Mega, el cual dispone de cuatro puertos seriales UART, consigo, dos módulos transmisores Breakout para la observación y comunicación de las variables y los eventos que se presenten.
- La implementación de baterías de ion litio como acumuladores del sistema fotovoltaico permitiría reducir el tamaño de la caja de protección y almacenar mayor energía con el fin de proporcionar más días de autonomía a la estación.
- A pesar de que el sensor de nivel HC-SR04 presentó un buen rendimiento, no se recomienda su implementación en este tipo de aplicaciones debido a que tiende a perder precisión rápidamente cuando se expone a condiciones climáticas extremas de operación.
- Se recomienda construir una garita que permita ubicar el sensor de humedad y temperatura por fuera de la caja de protección, y además garantice una mejor ventilación a medida que lo protege de la radiación solar.
- Con el fin de evitar la intervención humana en la medida de lo posible, se recomienda que el proceso de ingresar a la base de datos los resultados del modelo predictivo desarrollado en Matlab, se realice de forma automática.
- Se recomienda realizar este tipo de estudios en coordinación con otras disciplinas, con el fin de disminuir el tiempo y los costos de desarrollo.

REFERENCIAS

- [1] R. Sánchez, G. Vargas, H. González, and D. Pabón, "Los fenómenos cálido del Pacífico (El Niño) y frío del Pacífico (La Niña) y su incidencia en la estabilidad de laderas en Colombia," in *III Simposio Panamericano de deslizamientos*, 2001, pp. 1–12.
- [2] UNISDR, "Desarrollo de Sistemas de Alerta temprana: Lista de comprobación," in *EWCIII Tercera Conferencia Internacional sobre Alerta Temprana: Del concepto a la acción*, 2006, p. 13, [Online]. Available: https://www.unisdr.org/files/608_spanish.pdf.
- [3] A. Campos *et al.*, *Análisis de la gestión del riesgo de desastres en Colombia Un aporte para la construcción de políticas públicas*, Primera ed. Bogota, Colombia, 2012.
- [4] L. Villaquirán, "Identificación De Las Condiciones Naturales Y Antrópicas, Que Generan Riesgo Por Inundación Del Río Molino En El Municipio De Popayán-Colombia.," Universidad de Manizales, 2017.
- [5] A. Capacci and S. Mangano, "Las catástrofes naturales," *Cuad. Geogr. Rev. Colomb. Geogr.*, vol. 24, no. 2, pp. 35–51, 2015, doi: 10.15446/rcdg.v24n2.50206.
- [6] R. Jovel, "Los desastres naturales y su incidencia economico-social," *Rev. la CEPAL*, no. 38, p. 23, 1989.
- [7] SIAC - Sistema de Información Ambiental para Colombia, "Clima en Colombia." <http://www.siac.gov.co/clima>.
- [8] E. Landazábal and L. Vargas, "Vulnerabilidad Del Departamento De Cauca Ante El Fenomeno De La Niña."
- [9] UNISDR, "Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030," in *Resolución aprobada por la Asamblea General el 3 de junio de 2015*, 2015, p. 26, [Online]. Available: http://www2.ohchr.org/spanish/bodies/hrcouncil/docs/gaA.RES.60.1_Sp.pdf.
- [10] UNGRD - Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres, "Balance de cierre segunda temporada de lluvias 2017 y Plan de Contingencia por temporada seca 2018," Colombia, 2018.
- [11] Gobierno de Colombia - GOV, "Desastres naturales de 1999 a 2013 en el Cauca - Col," 2014. <https://www.datos.gov.co/Ambiente-y-Desarrollo-Sostenible/Desastres-Naturales-de-1999-a-2013-en-el-Cauca-Col/smk6-mrnz>.
- [12] E. Domínguez-Calle and S. Lozano-Báez, "Estado del arte de los sistemas de alerta temprana en Colombia," *Rev. la Acad. Colomb. Ciencias Exactas, Físicas y Nat.*, vol. 38, no. 148, p. 321, 2014, doi: 10.18257/raccefyn.132.
- [13] UNGRD - Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres, "Impactos de los eventos recurrentes y sus causas en Colombia," Colombia, 2018.
- [14] J. C. Gonzales Velandia, "LA GESTIÓN DEL RIESGO DE DESASTRES EN LAS INUNDACIONES DE COLOMBIA: UNA MIRADA CRÍTICA," Universidad Católica de Colombia, 2014.
- [15] C. A. Mata, "Climatológicos Extremos," *Fis. y Soc.*, pp. 38–41.
- [16] J.-D. López-García and Y. Carvajal-Escobar, "Sistemas De Alerta Temprana Con Enfoque Participativo: Un Desafío Para La Gestión Del Riesgo En Colombia Early Warning Systems With a Participative Approach: a Challenge for Risk Management in Colombia," no. April, pp. 1–24, 2017, doi: 10.17151/luaz.2017.44.14.
- [17] F. R. Caina Clavijo, Leidy katherin; Castro Rodríguez, "GENERACIÓN DE PARÁMETROS Y PROTOCOLOS PARA UN SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA EN LA CUENCA ALTA DE RÍO CAUCA," Universidad Católica de Colombia, 2018.
- [18] M. Abella, "Sistemas fotovoltaicos," Escuela de organización industrial, 2015.
- [19] F. Rodríguez Barrientos, "Cuencas Hidrográficas, Descentralización Y Desarrollo Regional Participativo," *InterSedes Rev. las Sedes Reg.*, vol. VII, no. 12, pp. 113–125, 2006.
- [20] R. M. R. Jiménez, Á. B. Capa, and A. P. Lozano, *Meteorología Y Climatología*. 2004.
- [21] R. Villodas, "Hidrología," Univesidad Nacional de Cuyo, 2008.
- [22] D. Evans, "Internet de las cosas Internet de las cosas Cómo la próxima evolución de Internet lo cambia todo," San José, EUA, 2011.
- [23] E. Rich, K. Knight, and S. Nair, *Artificial Intelligence*, Tercera. New Delhi: Tata McGraw Hill Education Private Limited, 2009.
- [24] D. Poole and A. Mackworth, *ARTIFICIAL INTELLIGENCE FOUNDATIONS OF COMPUTACIONAL AGENTS*. New York: Cambridge University Press, 2010.
- [25] J. J. Romero, C. Dafonte, Á. Gòmez, and F. J. Penousal, *Inteligencia Artificial Y Computación Avanzada*. 2007.
- [26] J. Cesar and R. Rodríguez, "PRONÓSTICO DE TEMPERATURAS MÍNIMAS EN TODAS LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS CUBANAS UTILIZANDO REDES NEURONALES ARTIFICIALES.," Univesidad Central "MARTA ABREU" de las Villas, 2015.

- [27] IDEAM, "ADQUISICIÓN, INSTALACIÓN Y PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DE SIETE (7) ESTACIÓN HIDROMETEOROLÓGICAS AUTOMÁTICA EN LA JURISDICCIÓN DEL AO – 06 CON SEDE EN DUITAMA – ÁREA DE INFLUENCIA LAGO DE TOTA, DE ACUERDO CON LOS REQUERIMIENTOS TÉCNICOS ESTABLECIDOS POR EL I," 2016, [Online]. Available: <http://www.ideam.gov.co/documents/24277/889227/Anexo+Técnico+01/20a0adb6-9091-49b6-bada-1a4b962db907?version=1.0>.
- [28] N. Z. H. Alfonso Avila, *Principales normas ambientales colombianas*, Dirección. Bogota, Colombia, 2014.
- [29] J. Pérez, "Diseño de un sistema de alertas agroclimáticas tempranas participativas en la subcuenca Río Piedras del Macizo colombiano," Universidad Nacional de Colombia, 2013.
- [30] W. Quintero, C. A. Robles, and A. M. Viloria, "Sistema de información para detección de crecientes súbitas en la cuenca del Río Manzanares en Santa Marta, Colombia," *Inf. Tecnol.*, vol. 28, no. 6, pp. 95–102, 2017, doi: 10.4067/S0718-07642017000600011.
- [31] A. Cama-Pinto, G. Piñeres-Espitia, R. Zamora-Musa, M. Acosta-Coll, J. Caicedo-Ortiz, and J. Sepúlveda-Ojeda, "Diseño de una red de sensores inalámbricos para la monitorización de inundaciones repentinas en la ciudad de Barranquilla, Colombia," *Ingeniare*, vol. 24, no. 4, pp. 581–599, 2016, doi: 10.4067/s0718-33052016000400005.
- [32] L. Cea and E. Bladé, "Modelización matemática en lecho fijo del flujo en ríos. Modelos 1D y 2D en régimen permanente y variable," *Grup. GIAMA*, pp. 1–30, 2007, [Online]. Available: [http://www.iberaula.es/public/files/file_1_6_Modelizacin matemtica en lecho fijo de fl.pdf](http://www.iberaula.es/public/files/file_1_6_Modelizacin%20matemtica%20en%20lecho%20fijo%20de%20fl.pdf).
- [33] C. W. Dawson, R. J. Abrahart, A. Y. Shamseldin, and R. L. Wilby, "Flood estimation at ungauged sites using artificial neural networks," vol. 319, pp. 391–409, 2006, doi: 10.1016/j.jhydrol.2005.07.032.
- [34] M. B. Kia *et al.*, "An artificial neural network model for flood simulation using GIS : Johor River Basin , Malaysia," *Env. Earth Sci*, vol. 67, pp. 251–264, 2012, doi: 10.1007/s12665-011-1504-z.
- [35] N. Seckin, M. Cobaner, and R. Yurtal, "Comparison of Artificial Neural Network Methods with L-moments for Estimating Flood Flow at Ungauged Sites : the Case of East Mediterranean River," *Water Resour Manag.*, vol. 27, pp. 2103–2124, 2013, doi: 10.1007/s11269-013-0278-3.
- [36] H. F. Zou, G. P. Xia, F. T. Yang, and H. Y. Wang, "An investigation and comparison of artificial neural network and time series models for Chinese food grain price forecasting," *Neurocomputing*, vol. 70, pp. 2913–2923, 2007, doi: 10.1016/j.neucom.2007.01.009.
- [37] B. Bazartseren, G. Hildebrandt, and K. Holz, "Short-term water level prediction using neural networks and neuro-fuzzy approach," *Neurocomputing*, vol. 55, pp. 439–450, 2003, doi: 10.1016/S0925-2312(03)00388-6.
- [38] J. Marcela, M. Castillo, U. F. Jos, J. Marcela, and M. Castillo, "Generacion y simulacion de un modelo predictivo para prevenir inundaciones en viviendas aledañas a zonas de riesgo mediante técnicas de inteligencia artificial," Francisco José de Caldas, 2019.
- [39] J. Hertz, Anders Krogh, and R. G. Palmer, *introduction to the theory of neural computation*. Boca Raton, London, New York: CRC Press, 2018.
- [40] A. Lapedes and R. Farber, "How Neural Nets Work," pp. 442–456, 1988.
- [41] A. Johannet, T. Darras, and D. Bertin, "Influence of the Complexity Selection Method on Multilayer Perceptron Properties Case Study on Environmental Data," *2018 IEEE Int. Conf. Environ. Eng.*, pp. 1–9.
- [42] J. Denker, T. B. Laborato, and M. Hill, "Large Automatic Learning , Rule Extraction , and Generalization," vol. 1, 1987.
- [43] N. Kartam and A. Members, "Neural networks in civil engineering.," vol. 8, no. 2, 1994.
- [44] IDEAM, "Adquisición , Instalación Y Puesta En Funcionamiento De Siete (7) Estación Hidrometeorológicas Automática En La Jurisdicción Del Ao – 06 Con Sede En Duitama –," 2016.
- [45] M. C. Vidal Crisanto, "Sistema de Sensado Remoto para la Medición de Variables Ambientales," Universidad Veracruzana, 2014.
- [46] M. H. Rashid, *Electrónica de Potencia: Circuitos, Dispositivos y Aplicaciones*. Mexico: Alan Apt, 2004.
- [47] E. A. Luna Paipa, M. Á. Laguado Serrano, and S. B. Sepúlveda Mora, "Controlador de carga PWM eficiente y de bajo costo para sistemas fotovoltaicos autónomos," *Respuestas*, vol. 23, no. S1, pp. 6–13, 2018, doi: 10.22463/0122820x.1491.
- [48] J. D. Puentestar Narvaez and L. D. Rodríguez Nacimba, "DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL CARGADOR DE UN BANCO DE BATERIAS DE 96VDC E INDUCTANCIA DEL CONVERTOR DC/DC ELEVADOR DE 96VDC A 311VDC A SER UTILIZADOS EN UN VEHICULO ELECTRICO," Escuela Politécnica Nacional, 2011.
- [49] M. y A. de T. (HIMAT) Instituto Colombiano de Hidrología, "Emplazamiento de estaciones hidrometricas," Bogota, Colombia, 1988.

- [50] GLOBAL Eco Riesgo SoLuciones S.A.S, "DOCUMENTO SOBRE CALIDAD, ROBUSTEZ Y PRECISIÓN ESTADÍSTICA DE LA INFORMACIÓN PARA EL DISEÑO DEL SEGURO AGROPECUARIO CATASTRÓFICO EN COLOMBIA."
- [51] Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), "MANUAL PARA LA OPERACIÓN , INSPECCION Y MANTENIMIENTO DE ESTACIONES METEOROLOGICAS," Bogota, Colombia, 2019.
- [52] Oficina Asesora de Gestión deL Riesgo (OAGR), "SAT Molino." <http://satmolino.popayan.gov.co:4000/>.
- [53] F. J. Gaspari, A. M. Rodríguez Vagaría, G. E. Senisterra, M. I. Delgado, and S. I. Besteiro, *Elementos metodológicos para el manejo de cuencas hidrográficas Libros de Cátedra*. 2013.
- [54] Organización Meteorológica Mundial (OMM), *Guía de prácticas hidrológicas. Volumen II. Gestión de recursos hídricos y aplicación de prácticas hidrológicas*. 2008.
- [55] Organización Internacional de Estandarización (ISO), "Hidrometry - Slope-area method," 2018.
- [56] B. Lux Cardona, "Conceptos básicos de Morfometría de Cuencas Hidrográficas," p. 8, 2014, [Online]. Available: <http://www.repositorio.usac.edu.gt/4482/1/Conceptos%0Abásicos%0Ade%0AMorfometría%0ACuencas%0AHidrográficas.pdf>[http://www.repositorio.usac.edu.gt/4482/1/Conceptos básicos de Morfometría de Cuencas Hidrográficas.pdf](http://www.repositorio.usac.edu.gt/4482/1/Conceptos%0Abásicos%0Ade%0AMorfometría%0ACuencas%0AHidrográficas.pdf).
- [57] G. Estrada, "Laboratorio de Hidraulica de Canales," 2016.
- [58] D. Flores, "Evaluación De La Fórmula De Manning En El Rio Ostua, Guatemala.," *Univ. San Carlos Guatemala Fac. Ing.*, p. 131, 2010, [Online]. Available: UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA REGIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA%0AEVALUACIÓN.
- [59] Organización mundial de meteorología (OMM), *Guía de Instrumentos y Métodos de observación*, vol. 3. 2018.
- [60] ASABE Standard, "Measurement and Reporting Practices for Automatic Agricultural Weather Stations," vol. 2004, p. 12, 2005.
- [61] Aosong Electronics Co Ltd, "Digital-output relative humidity & temperature sensor/module DHT22 (DHT22 also named as AM2302)."
- [62] Sparkfun, "Guía de conexión del medidor meteorológico." <https://learn.sparkfun.com/tutorials/weather-meter-hookup-guide>.
- [63] Cytron Technologies, "User ' s Manual V1.0," pp. 1–6, 2012.
- [64] Bosch, "BMP280 Digital Pressure Sensor," p. 49, 2015, [Online]. Available: <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/BST-BMP280-DS001-11.pdf>.
- [65] SEONG JI, "Seong Ji / Sfm10R1." [Online]. Available: https://www.alphamicro.net/wp-content/uploads/2019/03/DS_WSSFM11R2DAT_REV07_20190820.pdf.
- [66] The Soul of Things (TST), "Soul one," 2019. [Online]. Available: <https://www.tstthings.com/>.
- [67] Maulana, "Arduino Mega 2560 Datasheet," *Power*, p. 3, 2015, [Online]. Available: <http://www.robotshop.com/content/PDF/ArduinoMega2560Datasheet.pdf>.
- [68] Sandisk Corporation, "SanDisk © Industrial microSD TM Card Datasheet," 2016.
- [69] The Soul of Things (TST), "Breakout tst."
- [70] MathWorks, "Suavizado de señales." <https://la.mathworks.com/help/signal/examples/signal-smoothing.html>.
- [71] UNGRD - Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres, "Sistema de alertas tempranas." <http://portal.gestiondelriesgo.gov.co/Paginas/SAT.aspx>.
- [72] H. A. T. Bernal, "ANÁLISIS DE TECNOLOGÍAS DE COMUNICACIONES INALÁMBRICAS PARA DETERMINAR LA MEJOR OPCIÓN A IMPLEMENTAR PARA LOS SERVICIOS QUE PRESTA LA DITG-EAAB," Santo Tomás de Aquino, 2020.
- [73] Google, "Firebase," [Online]. Available: <https://firebase.google.com/>.
- [74] Google, "Firebase Realtime Database." <https://firebase.google.com/docs/database?hl=es>.
- [75] Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), "Nota Técnica 002 - Control de Calidad Automático de Datos Meteorológicos," Bogota, Colombia, 2007.
- [76] R. Dahl, "Introduction a Node.js." <https://nodejs.dev/learn>.
- [77] H. C. Ávila Cruz and J. C. Cortés Díaz, "GUÍA PARA LA REALIZACIÓN DE APLICACIONES MÓVILES EN LOS SISTEMAS OPERATIVOS ANDROID E iOS," Universidad Daistrital Francisco José de Caldas, 2016.
- [78] GitHub, "hellocharts-android." [Online]. Available: <https://github.com/lecho/hellocharts-android>.
- [79] T. Lin, B. G. Horne, P. Tiiio, C. L. Giles, and S. Member, "Learning Long-Term Dependencies in NARX Recurrent Neural Networks," vol. I, no. 6, pp. 1329–1338, 1996.
- [80] A. Ali, "Nonlinear multivariate rainfall – stage model for large wetland systems," *J. Hydrol.*, vol. 374, no. 3–4, pp. 338–350, 2009, doi: 10.1016/j.jhydrol.2009.06.033.

- [81] W. Lee, T. Asmaa, and T. Resdi, "Simultaneous hydrological prediction at multiple gauging stations using the NARX network for Kemaman catchment, Terengganu, Malaysia," vol. 6667, no. May, 2016, doi: 10.1080/02626667.2016.1174333.
- [82] M. T. Hagan and M. B. Menhaj, "Training Feedforward Networks with the Marquardt Algorithm," vol. 5, no. 6, pp. 2–6, 1994.
- [83] H. M. Noor, D. Ndzi, G. Yang, N. Zuraidin, and M. Safar, "Rainfall-based River Flow Prediction Using NARX in Malaysia," no. March, pp. 10–12, 2017.
- [84] M. Mohri, Afshin Rostamizadeh, and Ameet Talwalkar, *Foundations of Machine Learning*, Second. Massachusetts Cambridge: The MIT Press, 2018.
- [85] MathWorks, "Reconstrucción de los datos que faltan." <https://la.mathworks.com/help/signal/examples/reconstructing-missing-data.html#ReconstructingMissingDataExample-6>.
- [86] Servicio Geológico Colombiano (SGC), "Sistema de información de movimientos de masa SIMMA." <http://simma.sgc.gov.co/#/public/results/>.
- [87] Gobierno de Colombia - GOV, "Datos abiertos de Colombia." <https://www.datos.gov.co/browse?sortBy=newest&utf8=✓>.
- [88] S. García, J. Luengo, F. Herrera, S. García, J. Luengo, and F. Herrera, *Data Preprocessing in Data Mining*, vol. 72. 2015.
- [89] F. Medina and M. Galván, *Imputación de datos: teoría y práctica*, vol. 4. 2007.
- [90] G. Colmenares, "PRE-PROCESAMIENTO DE LOS DATOS," pp. 96–116.
- [91] L. V. C. Parra, "Análisis de la robustez de un modelo de Redes Neuronales para la predicción de caudales en la cuenca alta del río Paute," Universidad Politécnica Salesiana del Ecuador, 2011.
- [92] J. Castillo Moreno, Marcela, "Generación y simulación de un modelo predictivo para prevenir inundaciones en viviendas aledañas a zonas de riesgo mediante técnicas de inteligencia artificial," 2019.
- [93] IDEAM, "Metodología De La Operación Estadística Variables Meteorológicas," *Inst. Hidrol. Meteorol. y Estud. Ambient.*, p. 113, 2018, [Online]. Available: <http://www.ideam.gov.co/documents/11769/72085840/Documento+metodologico+variables+meteorologicas.pdf/8a71a9b4-7dd7-4af4-b98e-9b1eda3b8744>.
- [94] E. Jhohan and M. García, "Sistema Meteorológico con Comunicación Remota Usando Zigbee Meteorological System with Remote Communication Using Zigbee," no. 20, pp. 13–21, 2018.
- [95] POSTMAN, "La pataforma API de Postman." https://www.postman.com/api-platform/?utm_source=www&utm_medium=home_hero&utm_campaign=button.

ANEXO A: DIMENSIONAMIENTO ENERGÉTICO

Básicamente este anexo se concentra en definir y determinar los parámetros técnicos generales a tener en cuenta, como punto de partida, para seleccionar y calcular la instalación solar fotovoltaica para la estación hidro climatológica.

Topología de la instalación

La topología de la instalación del sistema energético para el presente proyecto, se refiere al tipo de conexión aislada (i.e. "Off Grid", no conectada a red eléctrica) para consumo de corriente directa (DC); consta básicamente del panel solar, batería y controlador de carga, como se muestra en el esquema de la ilustración 1.1.

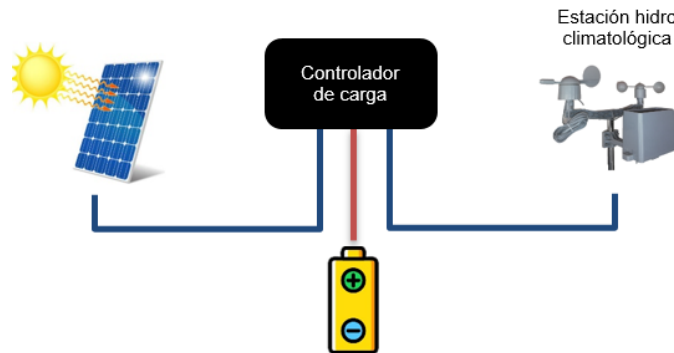


Ilustración 0.1. Topología del sistema fotovoltaico
Fuente: Propia

Consumo eléctrico de la instalación

Para dimensionar los equipos de la instalación, es necesario conocer y comprender el comportamiento y tipo de carga eléctrica que se va a alimentar. La carga en este proyecto, hace referencia a la estación hidro climatológica compuesta por los sensores (DC), dispositivos reguladores de voltaje (DC), Soul One, Arduino Mega, Breakout, sirena y reloj RTC.

El consumo eléctrico es la energía eléctrica media demandada durante un tiempo determinado, la energía eléctrica que consume un dispositivo (carga) se da en Wh/día y se obtiene de multiplicar la potencia que demanda la carga para su operación por el tiempo de funcionamiento, por medio de la siguiente ecuación:

$$E_i = P_i * t_i$$

Ecuación 0-1

Donde,

- E_i : consumo de energía eléctrica del dispositivo (carga) i , en Wh.
- P_i : potencia requerida por el equipo i , en W.

- T_i : tiempo de funcionamiento del dispositivo i , en horas.

La energía total consumida por la estación durante un tiempo determinado (generalmente día o mes) se obtiene de la suma del consumo de energía de cada uno de los dispositivos que la integran, por medio de la siguiente ecuación:

$$E_t = \sum_{i=1}^n E_i \quad \text{Ecuación 0-2}$$

Donde,

- E_t : consumo total de energía eléctrica media diaria de la estación.
- n : cantidad de dispositivos que integran la estación.

El cálculo del consumo de energía media diaria de la estación se lista en la tabla 1.1.

Tabla 0.1. Consumo de energía media diaria por la estación
Fuente: Propia

DISPOSITIVO	POTENCIA (W) REAL POR HORA	TIEMPO DE USO DIARIO (h)	CONSUMO DE ENERGÍA DIARIA (Wh/día)
HC-SR04	0,04	24	0,90
BMP280	0,000000045	24	0,0000011
DHT22	0,0000042	24	0,00010
Anemómetro	0,05	24	1,08
Pluviómetro	0,05	24	1,08
Veleta	0,05	24	1,08
Arduino Mega	0,12	24	2,83
RTC 1302	0,000021	24	0,00051
Soul One	0,08	24	1,92
Breakout	0,01	24	0,30
LM7805	0,07	24	1,66
Convertidor LM2596	0,37	24	8,89
LM7806	0,04	24	0,95
Total	0,862125544		20,69101306

Radiación solar global horizontal para el sitio de estudio

Para determinar el valor de la radiación global en un plano horizontal del sitio de estudio, se hace uso de la herramienta PVSYS. Este es un potente software muy útil para el dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos, puede importar datos meteorológicos de diferentes bases de datos como

Meteonorm 7.2, NASA-SSE, PVGIS TMY, NSRDB TMY [1][1]; sin embargo, la base de datos Meteonorm 7.2 es la mas recomendada para lugares de latinoamerica. El primer paso es determinar la ubicación del sitio de la instalacion, como se muestra en el mapa de la ilustración 1.2.

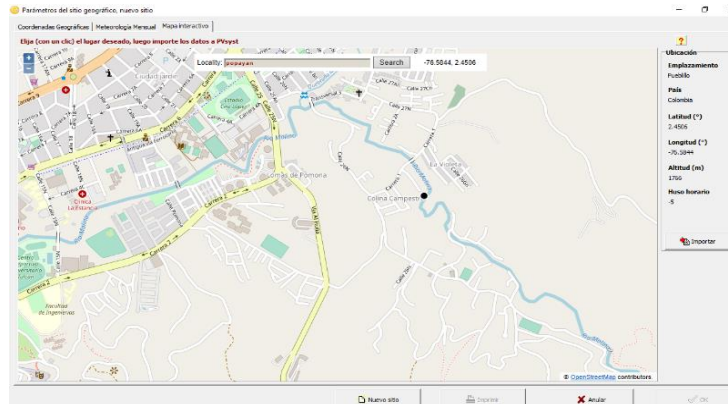


Ilustración 0.2. Ubicación geográfica del sitio de estudio PVSYST
Fuente: adaptada de [1]

Seguidamente, para este estudio, se selecciona e importa la base de datos Meteonorm 7.2, como se indica en la ilustración 1.3.

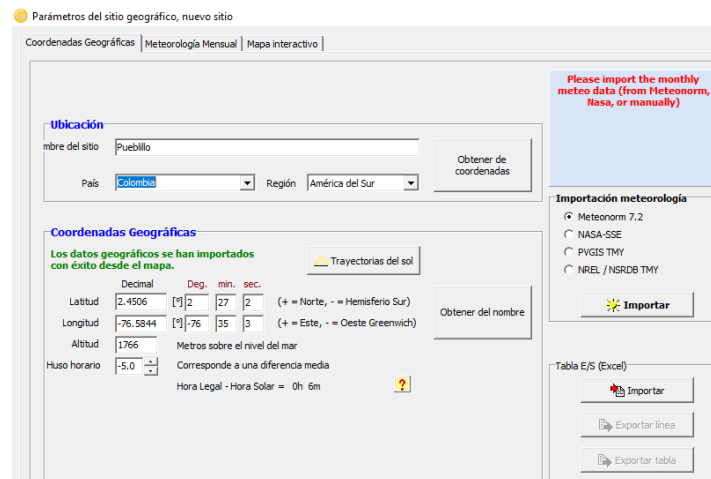


Ilustración 0.3. Base de datos Meteonorm 7.2 PVSYST
Fuente: adaptado de [1]

Finalmente, se obtiene los datos de radiación global diaria en un plano horizontal para el sitio de estudio, como se indica en la ilustración 1.4.

Coordenadas Geográficas | Meteorología Mensual | Mapa interactivo

Sitio **Pueblo (Colombia)**

Origen de datos: Meteorolog 7.2 (1988-1997), Sat=100%

	Irradiación global horizontal kWh/m ² .dia	Irradiación difusa horizontal kWh/m ² .dia	Temperatura °C	Velocidad del Viento m/s	Linke Turbidity [-]	Relative Humidity %
Enero	5.23	2.14	19.2	1.80	3.258	76.1
Febrero	5.19	2.38	19.7	1.79	3.399	73.7
Marzo	5.23	2.31	19.5	1.69	3.658	75.5
Abril	4.98	2.45	19.2	1.59	3.946	78.0
Mayo	4.79	2.16	19.5	1.60	3.258	77.6
Junio	4.97	2.02	19.2	1.60	3.330	77.5
Julio	5.10	2.25	19.8	1.90	3.112	73.6
Agosto	5.42	2.24	20.0	2.10	3.330	71.8
Septiembre	5.54	2.25	19.4	2.09	3.258	75.1
Octubre	5.10	2.26	19.3	2.00	4.269	75.7
Noviembre	4.67	2.13	19.0	1.80	3.258	78.2
Diciembre	5.04	1.99	19.2	1.70	3.330	77.2
Año	5.10	2.21	19.4	1.8	3.451	75.8

Irradiación global horizontal variabilidad de un año al otro 6.6%

Ilustración 0.4. Radiación global horizontal del sitio de estudio PVSYST
Fuente: adaptado de [1]

Condiciones ambientales de la zona de estudio

Es importante conocer las condiciones ambientales de la zona, ya que los equipos seleccionados deben operar bajo estas condiciones típicas del trópico sin problemas. De acuerdo a la alcaldía de Popayán [2], el sitio de estudio presenta las siguientes características como se listan en la tabla 1.2:

Tabla 0.2. Características de la zona de estudio
Fuente: Propia

CARACTERÍSTICA	VALOR	UNIDAD
Latitud (Norte)	2,450681	
Longitud (Oeste)	-76,584485	
Temperatura máxima	29	°C
Altitud	1738	msnm
Humedad relativa media	84	%
Precipitación media anual	1,94	mm
Radiación solar horizontal	4,67	KWh/m ²

Cálculo de la irradiancia sobre un plano inclinado

Se debe realizar el cálculo de la irradiancia sobre paneles solares inclinados en la zona de estudio para el mes de noviembre. Para el cálculo se utiliza el razonamiento del apéndice C del documento elaborado por la UPME (Unidad de Planeación Minero Energética) y el IDEAM, denominado “atlas de radiación solar de Colombia” [3]. Se deben tener en cuenta las variables indicadas en la ilustración 1.5.

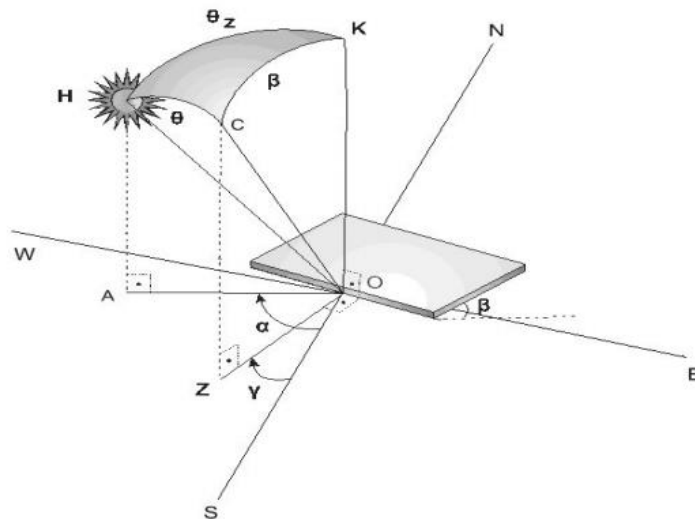


Ilustración 0.5. Radiación solar sobre superficies inclinadas
Fuente: tomado de [3]

Donde,

- o : Punto del observador
- ϕ : Latitud
- γ : Ángulo azimut sobre la superficie
- β : Ángulo de inclinación de la superficie

Como es bien sabido, la tierra gira alrededor del sol y la separación y el ángulo que forman dependen de la época del año que se conoce como declinación solar, por consiguiente, afecta la incidencia de rayos solares en temporadas de invierno y verano; sin embargo, para el área de estudio que se encuentra localizada cerca de la línea ecuatorial en donde, para fines prácticos, permanece constante dicha incidencia. Esta es la razón por la que autores como Enríquez Harper en [4], afirman que, para la instalación de paneles solares en zonas como estas, es suficiente con tener en cuenta que los paneles ubicados en el hemisferio norte tengan una orientación hacia el sur y viceversa; y con un ángulo de inclinación igual al que resulta de sumar la latitud del sitio de montaje más 10° o simplemente 15° , para garantizar que el agua que cae sobre el panel se deslice libremente, evitando que se acumule, lo que afectaría drásticamente el rendimiento del mismo.

Para determinar la radiación solar sobre una superficie inclinada en la presente investigación, se debe tener en cuenta las siguientes características:

- Orientación del panel hacia el sur.
- Inclinación del panel a 15° con respecto de la horizontal.
- Para el día 22 de junio, día 173 del año.
- Lugar: vereda Pueblillo, límites del municipio de Popayán sobre el Rio Molino.
- Latitud: 2.4506

- Longitud: -76.5844

$$\beta = 15^\circ$$

$$\phi = 2.4506$$

$$nd = 173$$

$$\gamma = 0$$

El cálculo de la posición angular de la tierra en la órbita se realiza bajo el razonamiento del apéndice A del documento “atlas de radiación solar de Colombia”[5]

$$\alpha = \frac{2\pi(nd-1)}{365}$$

Ecuación

Donde;

- α : posición angular de la tierra en la órbita.
- nd : número del día del año.

$$\alpha = \frac{2\pi(173 - 1)}{365}$$

$$\alpha = 2.96^\circ$$

Cuando el $\alpha = 0^\circ$, la tierra se encuentra más cerca del sol (i.e. perihelio), y cuando el $\alpha = 180^\circ$, la tierra se encuentra en la posición más distante del sol (i.e. afelio).

El ángulo formado entre el plano ecuatorial de la tierra y la línea tierra-sol, se denomina declinación solar, debido al movimiento de la tierra alrededor del sol, dicho ángulo varía durante el año, como se indica en la ilustración 1.6.

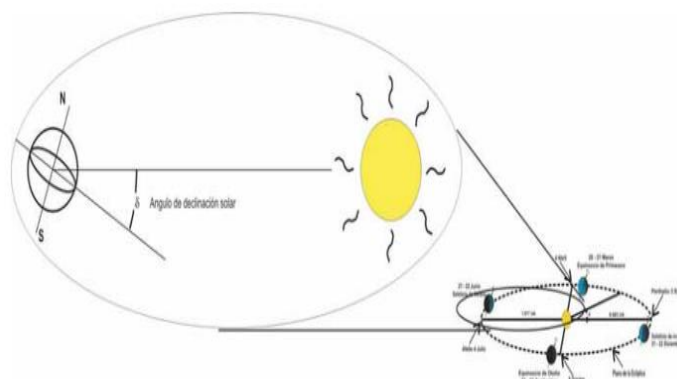


Ilustración 0.6. Declinación solar

Fuente: tomado de [5]

El valor del ángulo de declinación solar varía entre -23.45° (valor mínimo el 20 de diciembre) y $+23.45^\circ$ (valor máximo el 21 de junio), es positivo cuando el sol incide perpendicularmente sobre algún lugar en el hemisferio norte, entre el 21 de marzo y 23 de septiembre, y negativo cuando incide perpendicularmente sobre algún lugar en el hemisferio sur, entre el 23 de septiembre y el 21 de marzo; la declinación es cero en el equinoccio de primavera (21 de marzo) y en el equinoccio de otoño (22 de septiembre), durante estos días, la longitud del día, independientemente de la latitud, es exactamente 12 horas; como se indica en la ilustración 1.7 [5].

Se calcula el ángulo de la declinación solar de la tierra respecto a la línea tierra-sol para el día del año, según el apéndice A del documento "atlas de radiación solar de Colombia"[5], como se muestra a continuación:

$$\delta = (0,006918 - 0,399912 \cos \alpha + 0,070257 \sin \alpha - 0,006758 \cos 2\alpha + 0,000907 \sin 2\alpha - 0,002697 \cos 3\alpha + 0,00148 \sin 3\alpha) \left(\frac{180}{\pi}\right)$$

Ecuación 0-4

$$\delta = (0,006918 - 0,399912 \cos(2.96) + 0,070257 \sin(2.96) - 0,006758 \cos 2(2.96) + 0,000907 \sin 2(2.96) - 0,002697 \cos 3(2.96) + 0,00148 \sin 3(2.96)) \left(\frac{180}{\pi}\right)$$

$$\delta = 23.448^\circ$$

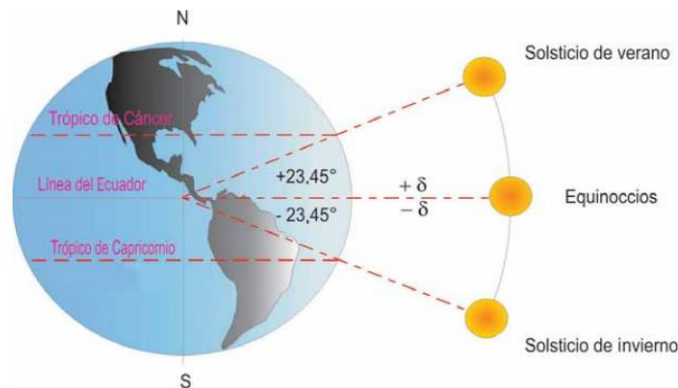


Ilustración 0.7. Esquema del cambio de declinación con movimiento del sol con respecto al plano del ecuador

Fuente: tomado de [5]

La posición del sol está determinada por la declinación y el ángulo horario, el ángulo horario es el ángulo formado en el polo por la intercepción entre el meridiano y el observador y el meridiano del sol, se expresa en unidades de arco (grados) o unidades de tiempo (horas), su conversión es $1h = 15^\circ$, como se indica en la ilustración 1.8.

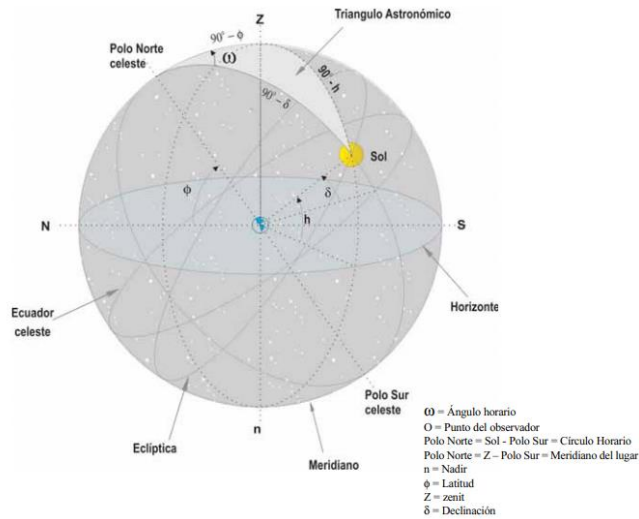


Ilustración 0.8. Sistemas de coordenadas celestes ecuatoriales
Fuente: tomado de [5]

La duración astronómica del día N , es la duración en horas desde la salida hasta la puesta del sol; se calcula el ángulo horario según la ecuación 1-9 del apéndice A [5].

$$\cos \omega_s = -\tan(\phi) \tan(\delta) \quad \text{Ecuación 0-5}$$

$$\cos \omega_s = -0.0185625$$

$$\omega_{s1} = 91.064^\circ$$

Se calcula el ángulo horario de puesta del sol para un plano inclinado de acuerdo a la ecuación 1-9 de apéndice A [5].

$$\cos \omega_s = -\tan(\phi - \beta) \tan(\delta) \quad \text{Ecuación 0-6}$$

$$\cos \omega_s = -\tan(2.4506 - 15) \tan(23.448)$$

$$\omega_{s2} = 84.46^\circ$$

Se escoge como ángulo horario el menor de los resultados obtenidos anteriormente ω_{s1} y ω_{s2} .

$$\omega_{ss} = 84.46^\circ$$

En el caso de las superficies ubicadas en el hemisferio norte, inclinadas con cualquier ángulo y dirigidas hacia el sur, como el presente caso; la relación de proporción de radiación entre superficie horizontal e inclinada ($\overline{R_b}$), se calcula según la ecuación 3-34 del apéndice C [3]. Este factor se necesita para encontrar la irradiancia directa sobre una superficie inclinada, es adimensional.

$$\overline{Rb} = \frac{\cos(\phi - \beta) \cos(\delta) \sin(\omega_{s2}) + \left(\frac{\pi}{180}\right) \omega_{s2} \sin(\phi - \beta) \sin(\delta)}{\cos(\phi) \cos(\delta) \sin(\omega_{s1}) + \left(\frac{\pi}{180}\right) \omega_{s1} \sin(\phi) \sin(\delta)}$$

Ecuación

0-7

$$\overline{Rb} = 0.81$$

La radiación solar diaria que incide sobre una superficie horizontal fuera de la atmósfera terrestre denotada por $H_o(n)$, donde n es el número de día del año, establecida en una latitud determinada, como se ilustra en la ilustración 1.9.

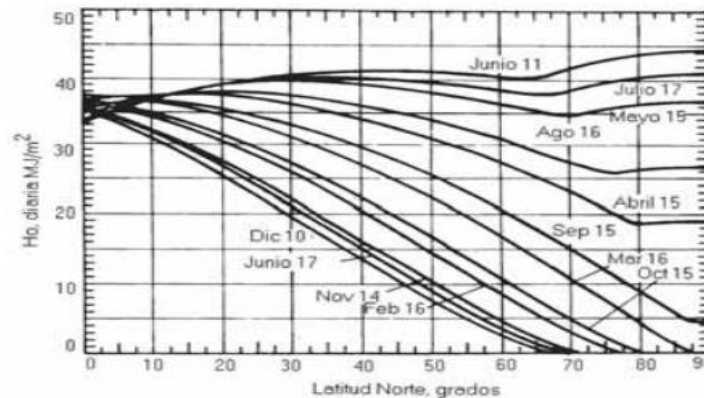


Ilustración 0.9. Radiación diaria sobre una superficie horizontal fuera de la atmósfera terrestre y paralela a la superficie terrestre

Fuente: tomado de[6]

El cálculo de esta irradiancia extraterrestre, representa la cantidad de energía incidente sobre la superficie horizontal desde la salida hasta la puesta del sol. Según la ecuación 2-3 del apéndice B[6] dicha irradiancia es:

$$H_o(n) = \frac{T}{\pi} \bar{I}_o \left(\frac{R_o}{R}\right)^2 \left(\cos(\phi) \cos(\delta) \sin(\omega_1) + \frac{2\pi}{360} (\omega_1 \sin(\delta) \sin(\phi)) \right)$$

Ecuación

0-8

Donde;

- T : es la longitud del día, para cualquier cálculo es igual a 24h.
- $\left(\frac{R_o}{R}\right)^2$: es la distancia tierra-sol en determinado día del año, con respecto a un valor promedio constante.
- R_o : es la distancia promedio tierra-sol durante el año.
- R : es la distancia promedio tierra-sol en determinado día del año.

- \bar{I}_o : es la constante solar, que es la irradiancia extraterrestre en la trayectoria alrededor del sol, equivalente a $1367 \frac{W}{m^2}$.

Para encontrar el valor de la relación de distancia solar, se hace uso de la ecuación 1-3 del apéndice A[5]

$$\left(\frac{R_o}{R}\right)^2 = 1.00011 + 0.034221 \cos(\alpha) + 0.00128 \sin(\alpha) + 0.000719 \cos(2\alpha) + 0.000077 \sin(2\alpha) \quad \text{Ecuación 0-9}$$

$$\left(\frac{R_o}{R}\right)^2 = 1.03507$$

$$H_o(n) = 10197.566 \frac{Wh}{m^2}$$

$$H_o(n) = 10.197 \frac{kWh}{m^2}$$

El índice de claridad (K_t) es la relación entre la radiación solar promedio en la superficie horizontal de la tierra y la radiación en la superficie extraterrestre para la misma localización, se calcula de acuerdo a la ecuación 3-5 del apéndice C.[3]

$$K_t = \frac{\bar{H}}{H_o} \quad \text{Ecuación 0-10}$$

Donde;

- \bar{H} : es la radiación global horizontal para el sitio de estudio, hallado en la ilustración 1.3 mediante la herramienta PVSYST 7.1.
- \bar{H} : para el mes de junio equivale a $4.97 \frac{kWh}{m^2}$.
- H_o : es la radiación solar diaria que incide sobre una superficie horizontal fuera de la atmosfera terrestre.

$$K_t = \frac{\bar{H}}{H_o} = \frac{4.97}{10.197}$$

$$K_t = 0.487$$

Ahora, se debe encontrar la relación entre la radiación solar difusa y la radiación global media diaria ($\frac{H_d}{H}$), que en estudios de los datos de radiación solar disponible han mostrado que el promedio de la fracción es una función de (K_t), según la ecuación 3-19 del apéndice C[3].

Para $0.17 < K_t < 0.75$, la ecuación es la siguiente:

$$\frac{H_d}{H} = 1.188 - 2.272K_t + 9.473K_t^2 - 21.865K_t^3 + 14.648K_t^4 \quad \text{Ecuación 0-11}$$

Donde;

- H_d : es la radiación difusa horizontal sobre la superficie de la tierra.

Reemplazando en la ecuación 1-11, se tiene que:

$$\frac{H_d}{H} = 0.62673$$

$$H_d = 0.62673 * H$$

$$H_d = 3.11 \frac{kWh}{m^2}$$

Se debe encontrar la relación entre la radiación solar global diaria promedio mensual sobre una superficie inclinada y la radiación global diaria promedio mensual sobre una superficie horizontal, según la ecuación 3-31 del apéndice C.[3]

$$\bar{H}_{(\beta)} = \bar{R} * \bar{H} \quad \text{Ecuación 0-12}$$

Donde;

- $\bar{H}_{(\beta)}$: radiación solar global diaria promedio mensual sobre una superficie inclinada.

De acuerdo a la ecuación 3-32 del apéndice C[3], (\bar{R}) se calcula mediante:

$$\bar{R} = \left(\frac{\bar{H}-H_d}{\bar{H}}\right) * \bar{R}_b + \left(\frac{H_d}{\bar{H}}\right) * \frac{(1+\cos(\beta))}{2} + \frac{r*(1-\cos(\beta))}{2} \quad \text{Ecuación 0-13}$$

Donde;

- r : es la reflectancia de la superficie, que para un panel con capa anti reflectante es aproximadamente 0.025.

$$\bar{R} = 0.303138 + 0.615093 + 0.003407$$

$$\bar{R} = 0.918656$$

Finalmente, se calcula la radiación global diaria promedio mensual sobre una superficie inclinada $\bar{H}_{(\beta)}$.

$$\bar{H}_{(\beta)} = \bar{R} * \bar{H}$$

Ecuación 0-14

$$\bar{H}_{(15^\circ)} = 4.56 \frac{kWh}{m^2}$$

Este valor representa la cantidad de radiación solar global, durante todo el día 22 de junio, sobre un panel inclinado a 15° y orientado hacia el sur, para el sitio de estudio. Se considera como el primer paso para el dimensionamiento de los equipos de la instalación fotovoltaica en cualquier aplicación.

El día 21 y 22 de junio, la declinación solar alcanza su valor máximo (i.e. $+23.45^\circ$). Este día se llama solsticio de verano en el hemisferio norte y solsticio de invierno en el hemisferio sur. Durante el solsticio de verano, todos los lugares al norte del Ecuador tienen días con longitudes mayores a doce horas, mientras que todas las localidades al sur del Ecuador (e.g. presente caso) tienen días con longitudes menores a doce horas. Además, durante estos mismos días, la tierra se encuentra en los lugares más distantes del sol, sobre la órbita que recorre, como se indica en la ilustración 1.10.

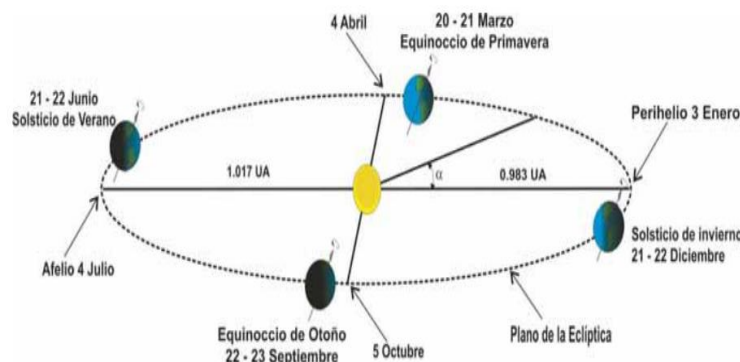


Ilustración 0.10. Movimiento de la tierra alrededor del sol
Fuente: tomado de[5]

Caracterización y cálculo de los paneles

Ahora se tienen todos los datos necesarios para el cálculo de la potencia y el número de paneles fotovoltaicos (FV), de tal manera que se pueda cumplir con la energía demandada por la estación hidro climatológica, como se lista en la tabla 1.3.

Tabla 0.3. Caracterización eléctrica para el sistema fotovoltaico
Fuente: [propia]

DATO	VALOR	UNIDADES
Potencia de carga	0,86	W
Consumo de energía diario	20,69	Wh/dia
Radiación solar sobre el panel	4,56	kWh/m ²
Eficiencia de la instalación	0,64	
Orientación del panel	Sur	
Inclinación del panel	15,00	°
Latitud	2,4506	°
Longitud	-76,5844	°

La eficiencia de la instalación se halla de la siguiente manera:

$$n = nb * nr$$

Ecuación 0-15

Donde;

- nb : eficiencia de la batería plomo acido
- nr : eficiencia del regulador de carga

Para el presente estudio, se elige una batería de plomo acido con eficiencia de 0.92, y el regulador controlador de carga PWM construido (ver sección 2.1), presenta una eficiencia de 0.7, de esta manera:

$$n = 0.92 * 0.7$$

$$n = 0.644$$

La hora solar pico (HSP) de acuerdo al estudio realizado por J. Alvarado en[7], es una unidad que mide la irradiación solar, y se define como la energía por unidad de superficie que se recibirá con una hipotética radiación solar en condiciones estándar de ensayo (*Standard Test Conditions* o STC) que equivale a 1000 W/m² (incidencia normal).

$$HSP = \frac{\bar{H}_{(15^\circ)}}{1000 \frac{W}{m^2}}$$

Ecuación

0-16

$$HSP = \frac{4560 \frac{Wh}{m^2}}{1000 \frac{W}{m^2}}$$

$$HSP = 4.56 h$$

La potencia que debe tener el sistema fotovoltaico (SFV) conformado por los paneles, para suplir el consumo de energía de la estación hidro climatológica se calcula por medio de la siguiente ecuación [8].

$$P_{SFV} = \frac{E_c}{HSP * n} \quad \text{Ecuación 0-17}$$

Donde;

- E_c : es el consumo de energía diario de la estación, estimado en la tabla 4.2

$$P_{SFV} = \frac{20.691 \text{ Wh}}{4.56h * 0.644}$$

$$P_{SFV} = 7.0458 \text{ W}$$

Esta es la potencia que debe generar el panel o el arreglo de paneles solares, para cubrir el total del consumo energético diario.

Se ha definido que los equipos que conforman el sistema fotovoltaico para la presente investigación, es el panel de material policristalino, batería de plomo acido modificadas tipo gel, y el regulador controlador de carga pwm auto fabricado. Hay fabricantes de paneles solares como Atersa, SolarWorld, Victron, Sanyo, SunPower, Jinko, etc. Comercialmente, se consiguen paneles de 10W[9] que se ajustan a la necesidad del presente caso, con las características enlistadas en la tabla 1.4.

Tabla 0.4. Características eléctricas del panel solar
Fuente: [propia]

CARACTERÍSTICA	VALOR
Potencia máxima	10 W
Voltaje nominal	12 V
Voltaje de máxima potencia (Vmp)	16,3 V
Corriente de máxima potencia (Imp)	0,61 A
Voltaje de circuito abierto (Voc)	20,7 V
Corriente en corto circuito (Isc)	0,68 A
Máxima tensión del sistema	600 V

El número de paneles necesarios se determina con la ecuación 1-18.

$$N_p = \frac{P_{SFV}}{P_{MPP}} \quad \text{Ecuación 0-18}$$

Donde;

- P_{MPP} : es la potencia máxima del panel en condiciones estándar STC.
- N_p : numero de paneles del SFV

$$N_p = \frac{7.0458 W}{10 W}$$

$$N_p = 0.7 \approx 1$$

La cantidad de paneles del SFV necesarios para satisfacer el consumo energético en la presente investigación, es un panel de 10W.

Caracterización y cálculo del regulador controlador de carga

Con el fin de aprovechar el recurso solar, en el presente proyecto se elige construir un controlador de carga PWM (*Pulse Width Modulation*), que utiliza dispositivos de alta frecuencia en los que se varía el tiempo de conmutación para controlar la corriente que de carga a la batería manteniéndola en el valor máximo de carga; para ello es necesario determinar sus características de entrada y salida.

La potencia del controlador se calcula en base al voltaje de circuito abierto y la corriente en corto circuito del panel, mediante la ecuación 1-19.

$$P_c = V_{OC} * I_{SC}$$

Ecuación 0-19

$$P_c = 20.7 V * 0.68 A$$

$$P_c = 14.076 W$$

La corriente de entrada está determinada por un factor de seguridad, numero de ramas en paralelo del SFV y corriente de corto circuito del panel solar, como se indica en la ecuación 1-20.[8]

$$I_{int} = 1.25 * I_{SC} * N_{PP}$$

Ecuación 0-20

Donde;

- 1.25: es el factor de seguridad del 25% para evitar daños en el controlador
- N_{PP} : es el número de paneles en paralelo del arreglo FV, que en este caso es 1.

$$I_{int} = 1.25 * 0.68 A * 1$$

$$I_{int} = 0.85$$

La corriente de salida está determinada por las potencias de consumo y el voltaje nominal de la batería, como se expresa en la ecuación 1-21.

$$I_{out} = \frac{1.25 * (P_{DC} * \frac{P_{AC}}{n_{inv}})}{V_{batt}} \quad \text{Ecuación 0-21}$$

Donde;

- P_{DC} : potencia de las cargas DC, calculado en la tabla 1.2.
- P_{AC} : potencia de las cargas AC, en este caso es cero.
- V_{batt} : voltaje nominal de la batería.

$$I_{out} = \frac{1.25 * (P_{DC})}{V_{batt}}$$

$$I_{out} = \frac{1.25 * (0.8621 W)}{12 V}$$

$$I_{out} = 0.0898 A$$

El controlador debe tener la capacidad, sin sufrir ningún daño, de proporcionar esta corriente de salida demandada por la estación, en todo momento.

Como el voltaje nominal del sistema fotovoltaico está determinado por el voltaje del sistema de acumulación o baterías, el voltaje de entrada y operación del controlador debe ser igual a dicho voltaje.

Caracterización y cálculo de las baterías

La batería seleccionada para la presente investigación presenta las siguientes características[10]:

- Vida útil de 500 ciclos al 50 % DOD (Profundidad de descarga).
- Capacidad nominal de 20HR (régimen de carga C/20) a 25°C.

La cantidad y capacidad de las baterías se calcula de acuerdo con el consumo de energía de la estación hidro climatológica, el voltaje nominal del sistema, tiempo de autonomía del SFV, y el porcentaje de profundidad de descarga DOD; como se expresa en la ecuación 4-22.

$$C_{Batt}(Ah) = \frac{E_C * N}{V_{batt} * DOD * n_b} \quad \text{Ecuación 0-22}$$

Donde;

- N : número de días de autonomía del sistema energético.

- V_{batt} : voltaje nominal de las baterías.
- DOD : porcentaje máximo de descarga de las baterías, 50%.
- n_b : eficiencia de la batería, 92%.

$$C_{Batt}(Ah) = \frac{20.691 * 1}{12 * 0.5 * 0.92}$$

$$C_{Batt}(Ah) = 3.748 A \approx 5Ah$$

Se aproxima a 5Ah por la disponibilidad de baterías en el mercado. En resumen, el sistema de acumulación queda conformado por una batería de 12V y 5Ah, de esta manera la estación puede operar continuamente durante todo el día.

A continuación, en la tabla 1.5, se realiza el resumen de las características eléctricas de los equipos que integran el sistema energético del presente estudio.

Tabla 0.5. Dimensionamiento de los equipos del sistema fotovoltaico
Fuente: [propia]

PANEL SOLAR		CARGADOR DE CARGA		BATERIA		CONDUCTOR	
Característica	Valor	Característica	Valor	Característica	Valor	Característica	Valor
Potencia máxima	10 W	Potencia	14,07 W	Capacidad nominal	5 Ah	Material	Cobre
Voltaje nominal	12 V	Corriente de entrada	0,85 A	Voltaje nominal	12 V	Calibre	20 AWG
Voltaje de máxima potencia (Vmp)	16,3 V	Corriente de salida	0,089 A	Profundidad de descarga	50%	Corriente máxima	2 Amp
Corriente de máxima potencia (Imp)	0,61 A	Voltaje de operación	12V	Ciclos de vida útil	500	Longitud	10 m
Voltaje de circuito abierto (Voc)	20,7 V	Corriente de carga	0,68 A	Capacidad 25 °C	20HR	Tipo	Duplex
Corriente de corto circuito (Isc)	0,68 A	Voltaje de sobrecarga	15 V	Corriente de carga máxima	3,6 A		
Máxima tensión del sistema	600 V	Voltaje de sobre descarga	11,5 V	Corriente de descarga máxima	180 A (5s)		
Eficiencia	15%			Vida flotante	5 años		

Sección del conductor de la instalación

Teniendo en cuenta que la corriente máxima que puede circular por la instalación fotovoltaica es menor a 1 A, la máxima caída de tensión permitida es del 3% y la longitud máxima del conductor es aproximadamente 6 m que corresponde a la distancia entre el panel y el controlador de carga; el conductor de la instalación es de calibre #20 AWG duplex que soporta una corriente máxima de 2 A de CENTELSA[11], según la norma técnica colombiana (NTC 2050, código eléctrico colombiano)[12]. de igual manera, se puede calcular la sección del conductor mediante la ecuación 1-23

$$S = \frac{2 * L * I_{max}}{\Delta V * k} \quad \text{Ecuación 0-23}$$

Donde;

- L : longitud del conductor
- I_{max} : intensidad máxima de corriente por el cable, generada por el arreglo de paneles del SFV, que en este caso es un solo panel con una corriente máxima de corto circuito de 0.68 A.
- ΔV : caída de tensión permitida por tramo, la máxima es de 3% y equivale a 0.36 V.
- k : conductividad eléctrica del panel.

La conductividad eléctrica de los cables depende de la temperatura, debido a que no se puede medir la temperatura en cada punto de la instalación, se utiliza el valor estándar de la conductividad a 20 °C, que en el caso del cobre es:

$$k = 56 \left[\frac{m}{ohm} \cdot mm^2 \right] \quad \text{Ecuación 0-24}$$

De esta manera,

$$S = \frac{2 * 6 * 0.68}{0.36 * (56)}$$

$$S = 0.41 \text{ mm}^2 \approx 0.5 \text{ mm}^2$$

Esta es la sección mínima del conductor, se debe elegir la sección normalizada que sea inmediatamente superior al valor obtenido. En la tabla 1.6, se listan los valores normalizados en el sistema AWG americano y su equivalencia en mm^2 para cables comprados en Colombia, de acuerdo a la norma UNE 60364-5-52 de 2014[13].

Tabla 0.6. Corriente máxima en conductor unipolar de cobre
Fuente: tomado de[13]

AWG	SECCIÓN REAL mm2	mm2 NORMALIZADO	CORRIENTE MAX A
22	0.324	0.5	3

20	0.517	0.75	8
18	0.821	1	10,5
16	1.31	1.5	13
14	2.08	2.5	18
12	3.31	4	24
10	5.26	6	31

REFERENCIAS

- [1] PVSYST Photovoltaic Software, “Un potente software para sus sistemas fotovoltaicos.” <https://www.pvsyst.com/>.
- [2] Alcaldía de Popayán, “Nuestra geografía.” <http://www.popayan.gov.co/ciudadanos/popayan/nuestra-geografia#:~:text=Popayán es la capital del,oeste del meridiano de Greenwich.>
- [3] IDEAM and Unidad de Planeación Minero Energético (UPME), “Apéndice C,” pp. 139–155, 2016, doi: 10.4000/books.ifea.5638.
- [4] G. Enriquez Harper, *Instalaciones y sistemas fotovoltaicos*. Mexico, 2014.
- [5] IDEAM and Unidad de Planeación Minero Energético (UPME), “Apéndice A,” pp. 115–126, 2016, doi: 10.1016/b978-84-8174-950-2.50025-7.
- [6] IDEAM and Unidad de Planeación Minero Energético (UPME), “Apendice B,” pp. 127–137, 2016.
- [7] J. Alvarado Ladron de Guevara, “Diseño y Cálculo de una instalcion fotovoltaica aislada,” Universidad Politecnica de Madrid, 2018.
- [8] Asociacion Municipal de Colonos de Pato (AMCOP), “Informe de calculos para sistema solar fotovoltaico,” San Vicente del Caguán, 2017.
- [9] AutoSolar, “Panel Solar 10W 12V Policristalino Atersa.” <https://autosolar.es/panel-solar-12-voltios/panel-solar-10w-12v-policristalino-atersa.>
- [10] Industria Electrica NewLine S.A.S, “AGM 12V-12AH,” [Online]. Available: <http://newline.com.co/producto/agm-12v-12ah/>.
- [11] Cables de Energia y Telecomunicaciones S.A. (CENTELSA), “Cables Flexibles,” 2021.
- [12] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, “Código eléctrico colombiano NTC2050,” *Código Eléctrico Colomb.*, p. 847, 1998.
- [13] Normalización Española (UNE), “Selección e instalación de equipos eléctricos. Canalizaciones,” 2014.

ANEXO B: CONDICIONANTES Y REQUERIMIENTOS TÉCNICOS

CONDICIONANTES PARA LA ELECCIÓN DEL EMPLAZAMIENTO DE LAS ESTACIONES, IDEAM

Uno de los aspectos más importantes para obtener una buena información hidrometeorológica es el correcto y funcional emplazamiento de las estaciones. La elección del emplazamiento se encuentra forzado por una serie de condicionantes que abarcan disciplinas muy diferentes relacionadas con la geografía, orografía, climatología, de seguridad, de accesibilidad y cobertura de comunicación en el punto de monitoreo. Además de una alta consistencia y robustez, es imperioso que las estaciones garanticen un correcto funcionamiento de los instrumentos. Algunos de los criterios establecidos por el IDEAM en documentos como [1], [2] y [3], para la ubicación de las estaciones hidrológicas y meteorológicas, son los siguientes:

Estaciones hidrológicas

- Fácil acceso por las vías de circulación comunes.
- Tramo recto, por lo menos cinco veces el ancho del cauce en ese punto;
- Sección en la cual el régimen hidrológico natural, no está influido por los aprovechamientos de aguas y obras hidrotecnias.
- Aguas arriba y en poblaciones, localidades y sitios de emplazamiento de obras hidrotecnias expuestas a peligro de avenidas e inundaciones; con el objeto de obtener datos que permitan prever, con anticipación debida de los eventos mencionados.
- Tramo de corriente recto, de orillas paralelas.
- Tramo de valle estrecho, preferiblemente de sección transversal "V" o una "U" sin zona inundable.
- Tramo de cauce sin irregularidades y obstrucciones, sin bloques de piedra o vegetación y de pendiente uniforme, poco fuerte y de perfil longitudinal y sin escalones, lo cual asegura la regularidad del flujo de agua, sin remolinos o turbulencias.
- Estabilidad del lecho de la corriente, tanto en perfil longitudinal, como en perfil transversal;
- Ausencia de confluencia con otras corrientes de agua, aguas arriba o abajo del sitio de observación, las cuales pudieran producir remansos;
- El sensor de nivel debe presentar una buena fijación, que garantice que no se produzcan movimientos verticales que alteren las lecturas, para ello se recomienda su instalación en sitios estables como en rocas, pilas de puentes, muelles, u otras estructuras resistentes;
- Fácil operación; los sensores de nivel se deben colocar de tal forma que se puedan leer con comodidad, seguridad y precisión, en consecuencia, deben tener facilidades de acceso.

Estaciones meteorológicas

- Los instrumentos se instalan en un terreno llano, sobre un área aproximada de 10m x 10m, cubierta de hierba baja, rodeada de una cerca o estacas para impedir el ingreso de personal no autorizado;

- El anemómetro debe instalarse sobre un mástil (generalmente un tubo galvanizado) de 1½", empotrado en una base de concreto, altura mínima desde el eje de las cazoletas hasta el piso de 2 metros;
- El pluviómetro se debe instalar dentro de una canastilla fijada a un mástil de 1½" galvanizado empotrado en una base de concreto; altura mínima desde el borde superior del pluviómetro (i.e. Boca colectora) hasta el piso de 1 metro;
- El sensor de temperatura y humedad, deben estar dentro de una caseta, protegidos de la radiación solar, de las corrientes fuertes del aire, de las precipitaciones, el hollín, los daños accidentales y con una ventilación adecuada para que indiquen los valores reales que circulan a su alrededor;
- Los medidores y registradores de precipitación deben estar retirados de obstáculos, tal que permita obtener la recepción total de la lluvia, de manera que, vistos desde la boca del pluviómetro, los obstáculos no rebasen la altura angular de 45° sobre el horizonte; en otras palabras, el medidor debe estar retirado del obstáculo en todas las direcciones (360°), 4 veces la altura del obstáculo;
- El pluviómetro deberá estar protegido del viento en todas las direcciones por objetos (árboles, arbustos, etc.), cuya altura sea lo más uniforme posible. La altura de estos objetos sobre la boca del pluviómetro deberá ser por lo menos la mitad de la distancia que existe entre el instrumento y los objetos (para proporcionarle una protección adecuada del impacto del viento), pero no deberá exceder la distancia existente entre el pluviómetro y los objetos (para evitar la intercepción de parte de la lluvia que llega al pluviómetro).

REQUERIMIENTOS TÉCNICOS EN LA MEDICIÓN

Algunos de los requerimientos se encuentran basados en los establecidos por el IDEAM en [4] a efectos de garantizar la calidad y disponibilidad de los datos.

- La estación hidro climatológica automática deberá contar con todos los sensores necesarios para la medición de las diferentes variables hidro-climatológicas planteadas en la investigación incluyendo, el sistema energético y las funciones propias del Datalogger como adquisición, procesamiento, transmisión y almacenamiento de los datos las 24 horas, sin necesidad de intervención de un operador.
- La ubicación y distribución de los sensores en la estación debe realizarse de acuerdo a los requerimientos establecidos por el IDEAM, con el fin de obtener lecturas confiables.
- La estación debe contar con un sistema de alimentación autónomo y permanente que garantice una autonomía energética mínimo de 24 horas, en base al consumo de sus componentes.
- La base del panel debe ser reclinable, con el fin de aprovechar al máximo la radiación solar.
- El soporte de la estación debe construirse con materiales resistentes y en base a un diseño de fácil manejo y transporte, que permita realizar las operaciones de instalación y mantenimiento a nivel del suelo con el mínimo riesgo, y a su vez garantice durabilidad, calidad en la medición y transmisión de la estación.

- Todas las conexiones de alimentación eléctrica del Datalogger y periféricos deberán tener protección de voltaje inverso y protección de corto circuito para prevenir daños accidentales al sistema.
- El gabinete deberá alojar, proteger y garantizar las condiciones adecuadas para el funcionamiento del Datalogger, el transmisor, el sensor de presión, sensor de temperatura y humedad, el regulador de carga, la batería, demás componentes y sistemas de interconexión eléctrica y de datos.
- La calidad de sus diferentes componentes debe soportar las diferentes condiciones climáticas y ambientales existentes en el territorio colombiano.
- Se deben realizar las obras y actividades asociadas a la construcción e instalación de la estación, garantizando buenas prácticas ambientales, haciendo uso adecuado de los recursos naturales (agua, suelo, aire) y evitar la generación de desperdicios o sobrantes que puedan generar contaminación o emisión de residuos nocivos o peligrosos.
- Se debe garantizar el almacenamiento de los datos sin sobrescribir información por un mínimo de 12 meses.

REQUERIMIENTOS TÉCNICOS EN LA COMUNICACIÓN

- El valor de las variables hidro-climatológicas se debe transmitir a una frecuencia máxima de 10 minutos;
- El tipo de alerta y el valor del nivel, se debe transmitir de manera inmediata cuando ocurra una transición de estado (i.e. verde a amarillo, amarillo a naranja, naranja a rojo);
- Debe haber cobertura de la red a implementar en el sitio de estudio;
- Para proporcionar un respaldo en la comunicación de un SAT ya establecido, el sistema de comunicación a implementar debe poder funcionar como un sistema de redundancia activo (i.e. ambos sistemas estén activos al mismo tiempo), que asegure la comunicación de los datos cuando se presente un fallo de enlace en el sistema de comunicación primario;
- Sistema de comunicación de bajo costo de operación;
- El sistema debe garantizar la fiabilidad en la comunicación, que opere bajo condiciones climáticas extremas y de manera continua en el tiempo;
- El sistema debe garantizar la integridad de los mensajes;
- El sistema debe operar en bandas de radio diferentes de las telecomunicaciones, con el fin de evitar problemas de comunicación por congestión de red cuando ocurre algún tipo de evento meteorológico;
- El sistema debe tener largo alcance, mayor a 5 Km.

REQUERIMIENTOS TÉCNICOS EN LA VISUALIZACIÓN

Analizar y entender las necesidades básicas, en cuanto a la visualización de la información, de un sistema de alertas tempranas, permite definir las características operacionales de las aplicaciones Web y Móvil de la presente investigación. Atendiendo a este requisito, se realizó una entrevista al ingeniero Giovanni Erazo Méndez quien es coordinador de la Oficina Asesora para la Gestión del Riesgo de Desastres (OAGRD) de la Alcaldía de Popayán, donde se estableció lo siguiente:

- El diseño y navegación de las aplicaciones web y móvil debe ser lo más intuitivo posible, es decir, deben presentar un entorno simple y amigable;
 - La aplicación móvil y la página web deben incluir en sus diseños gráficos, el logo institucional de la universidad, del semillero de investigación en gestión energética y de la OAGR;D;
 - La aplicación móvil se debe poder ejecutar en versiones superiores a Android 5.0, con el fin de garantizar su usabilidad en un gran porcentaje de los dispositivos;
 - La aplicación móvil debe diseminar las alarmas, por medio de canales como correo electrónico y notificaciones en el mismo teléfono, cuando las genere el sistema, bien sea por bajo nivel, por nivel máximo o por alta probabilidad en la que puede ocurrir un evento;
 - La aplicación móvil debe permitir la modificación, solo por el personal autorizado, de los niveles de umbral que definen el tipo de alarma y de los parámetros morfométricos e hidráulicos propios del punto de monitoreo, así como el registro en la base de datos de los resultados entregados por el sistema de análisis. Para ello la aplicación deberá disponer de un método de autenticación;
- La aplicación móvil debe brindar la siguiente información:
 - Representación gráfica de históricos de cada una de las variables hidroclimatológicas;
 - Valores actuales de las variables hidroclimatológicas;
 - Resultados del sistema de análisis, es decir, la probabilidad en la que puede ocurrir algún tipo de evento meteorológico y las alarmas según el nivel de probabilidad de cada evento;
 - Los tipos de alarmas generados por el comportamiento del nivel del río;
 - Clasificaciones de la intensidad de lluvia (i.e. inapreciable, débil, moderada, fuerte, muy fuerte y torrencial) y la fuerza del viento (i.e. calmado, ventolina, brisa ligera, moderado, fuerte, muy fuerte y huracanados);
- La página web debe brindar la siguiente información:
 - Representación gráfica de históricos de cada una de las variables hidroclimatológicas;
 - Valores actuales de las variables hidroclimatológicas;
 - Información referente a los autores, director y codirector de la investigación;
 - Información referente al proyecto de investigación;
 - Sección informativa que genere conciencia ciudadana con respecto al manejo y reducción del riesgo de desastres;

REFERENCIAS

- [1] M. y A. de T. (HIMAT) Instituto Colombiano de Hidrología, “Emplazamiento de estaciones hidrométricas,” Bogotá, Colombia, 1988.
- [2] GLOBAL Eco Riesgo SoLuciones S.A.S, “DOCUMENTO SOBRE CALIDAD, ROBUSTEZ Y PRECISIÓN ESTADÍSTICA DE LA INFORMACIÓN PARA EL DISEÑO DEL SEGURO

AGROPECUARIO CATASTRÓFICO EN COLOMBIA.”

- [3] Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), “MANUAL PARA LA OPERACIÓN , INSPECCION Y MANTENIMIENTO DE ESTACIONES METEOROLOGICAS,” Bogota, Colombia, 2019.
- [4] IDEAM, “Adquisición , Instalación Y Puesta En Funcionamiento De Siete (7) Estación Hidrometeorológicas Automática En La Jurisdicción Del Ao – 06 Con Sede En Duitama –,” 2016.

ANEXO C: CARACTERISTICAS DISPOSITIVOS DE TRANSMISIÓN

DEV KIT SOUL ONE

- Módulos

La tarjeta está compuesta por 12 módulos, indicados en la ilustración 1.1 y descritos en la tabla 1.1.

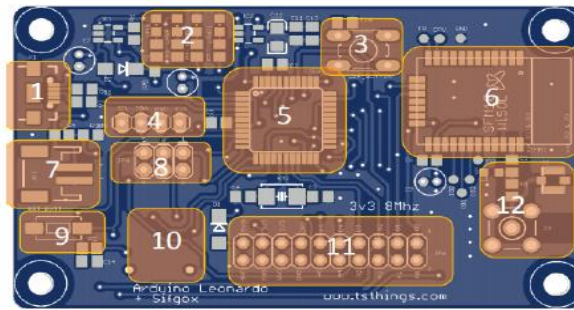


Ilustración 0.11 Módulos de la tarjeta Soul One
Fuente: tomado de [1]

Tabla 0.7. Descripción de módulos Soul One
Fuente: tomado de [1]

Módulo	Descripción
1	Conector micro USB para la carga y programación
2	Led's indicadores (carga, alimentación, UART Tx, UART Rx)
3	Boton de usuario D7
4	Conector I2C
5	Microcontrolador Atmega32u4
6	Modulo Wisol SFM11R2D
7	Conector batería litio Ion 3.7 Vdc
8	Conector ISCP
9	Botón reset
10	Conector para microSD (Parte abajo)
11	Conector de usuario pinhead 2x10
12	Conectores antena, RP-SMA, UFL, SMD

- **Características técnicas**

En la tabla 1.2, se resume el funcionamiento y otras características de la tarjeta Soul One, con el fin de facilitar su implementación y garantizar un buen resultado.

*Tabla 0.8. Características técnicas Soul One
Fuente: tomado de [2]*

Dimensions	• 46 mm height x 75mm wide.
Microcontroller	• ATmega32u4
Operating temperature	• -30oC to 85oC
Input Vcc	• USB - +5 Vdc • External battery lipo External 3.7 Vdc • Auxiliary input +3.7 Vdc - + 12 Vdc
Sigfox FCC Zone 2 and 4	• Output power: 22 dBm • Rx sensitivity :-124dBm • Uplink frequencies: 902.2 MHz and 920.8 MHz
External interface	
PWM outputs	• 2, D3, D5
Analog inputs	• 6, A0, A1, A2, A3, A4, A5
Digital inputs and outputs (I/O)	• 5, D2, D3, D4, D5, D7(User Button)
SPI Port	• 1 by Pinheader ISP
Port I2C	• 1, D2 (SDA), D3 (SCL)
Flash memory	• 32kb (4KB for Bootloader)
Sram	• 2.5 KB (ATmega32u4)
User EEprom memory	• 1 KB (ATmega32u4)
Serial/UART port	• AT commands available
Communications	• Native USB • I2C dedicated connector, SDA and SCL, They can be used as digital GPIO. • SPI via ISP connector • 3dBm helical antenna, optional SMA connector for external antenna, optional pads for SMD ceramic chip antenna.
Storage	• Socket for microSD, SPI control, capacity for memory up to 32 GB.
Consumption	Module SigFox • Tx SigFox-170mA • Rx Sigfox 32mA • Sleep SigFox 2.5mA MCU work to 8Mhz • Normal 10mA • Power Down<10uA • Consumption GPIO-20mA

- **PIN-OUT Soul One**

En la tabla 1.3, se describe detalladamente cada uno de los pines de la tarjeta, con el fin de facilitar su implementación.

*Tabla 0.9. Pines Soul One
Fuente: tomado de [2]*

PIN name	Pin number	Description	Interruption
Gnd	14, 16 18, 20	Gnd	
3V3	13, 15, 71	Output 3.3V 500mA	
5VIN	19	Raw, Aux in ext	
D0	1	TX Sigfox	
D1	3	RX Sigfox	
D2	5	Digital I/O- SDA	
D3	7	Digital I/O - SCL	
D4	9	Digital I/O	
D5	11	Digital I/O	
D7	Button	Digital I/O	Intext 4
A0	2	Analog input A0, 10Bit	
A1	4	Analog input A0, 10Bit	
A2	6	Analog input A0, 10Bit	
A3	8	Analog input A0, 10Bit	
A4	10	Analog input A0, 10Bit	
A5	12	Analog input A0, 10Bit	yes
Reset	SMD Button	External Hardware Reset	

Como se aprecia en la tabla 1.3, el módulo transmisor que utiliza la tarjeta se trata de un dispositivo fabricado por la empresa Wisol, de referencia SFM11R2D. este módulo opera en las zonas 2 y zona 4 (excepto Nueva Zelanda); la banda de operación y demás funcionalidades se configura por medio de comandos AT (comunicación UART).

BREAKOUT

Este dispositivo es el segundo desarrollo hardware de la empresa TST [3], que al igual que Soul One, integra un módulo transceptor Wisol SFM11R2D[6] y una antena de 3dBm helicoidal que tiene la capacidad de transmitir mensajes hacia internet vía SIGFOX. En la tabla 1.4, se describen las características técnicas más importantes de la tarjeta.

Tabla 0.10. Características técnicas del Breakout
Fuente: tomado de [3]

Dimensions	<ul style="list-style-type: none"> • 50 mm height x 45mm wide.
Operating temperature	<ul style="list-style-type: none"> • -30oC to 85oC
Input Vcc	<ul style="list-style-type: none"> • External battery lipo, External 3.7 Vdc • Auxiliary input +3.3 Vdc or +5 Vdc
Sigfox FCC Zone 2 and 4	<ul style="list-style-type: none"> • Output power: 22 dBm • Rx sensitivity :-124dBm • Uplink frequencies:902.2 MHz and 920.8 MHz
External interface	
Serial/UART port	<ul style="list-style-type: none"> • AT commands available
Communications	<ul style="list-style-type: none"> • 3dBm helical antenna, optional SMA connector for external antenna, optional pads for SMD ceramic chip antenna.
Consumption	Module SigFox <ul style="list-style-type: none"> • Tx SigFox-170mA • Rx Sigfox 32mA • Sleep SigFox 2.5mA

REFERENCIAS

- [1] The Soul of Things (TST), "Development Kit - IoT." <https://www.tstthings.com/development-kit>.
- [2] The Soul of Things (TST), "Soul one," 2019. [Online]. Available: <https://www.tstthings.com/>.
- [3] The Soul of Things (TST), "Breakout tst."

ANEXO E: TECNOLOGÍA SIGFOX

Introducción

Sigfox, es una red global del IoT que implementa redes de baja velocidad, también conocidas como “OG”, para poder escuchar a billones de objetos transmitiendo datos, sin necesidad de establecer y mantener conexiones de red; pensada para transmitir pequeñas cantidades de datos a largas distancias y a un muy bajo consumo de energía. Ofrece una comunicación basada en un software, donde toda la red y complejidad computacional se maneja desde la red y no desde los dispositivos, lo que permite reducir el coste de los dispositivos conectados y el consumo de energía.[1] Sigfox es único en el mercado, como controlador de tecnología y proveedor de servicios, al ofrecer la certificación de modem para que el dispositivo compatible con Sigfox se pueda suscribir a la red única administrada por SIGFOX Network Operator (SNO).

Arquitectura de alto nivel de la red

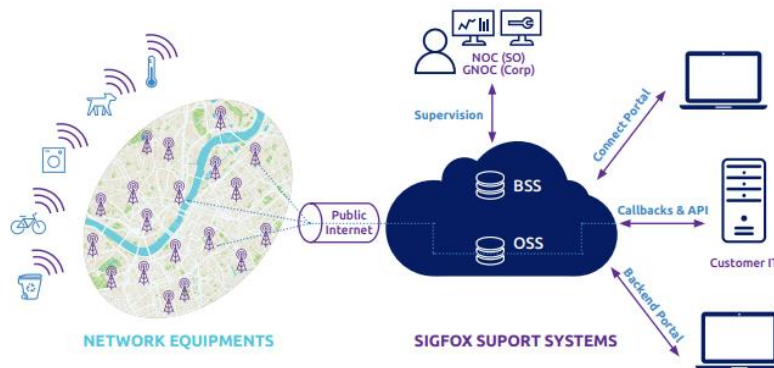


Ilustración 0.12. Arquitectura de alto nivel
Fuente: tomado de [2]

La red Sigfox está compuesta principalmente por dos capas principales:[2]

- La capa de equipo de red que consta de estaciones base y sus antenas, encargadas de recibir y modular los mensajes transmitidos por los dispositivos finales y retransmitirlos al *Backend* de Sigfox;
- El sistema de soporte de Sigfox se encarga de recibir, procesar y retransmitir los mensajes hacia los suscriptores del servicio (*Customer IT*), por medio de una URL de *callback* o utilizando una API, ambas proporcionadas por el Backend. En esta capa también incluye la gestión, administración y planificación de toda la red;
- La conexión de estas dos capas se encuentra asegurada por la internet pública, pero protegida por una red privada virtual (VPN, *Virtual Private Network*).

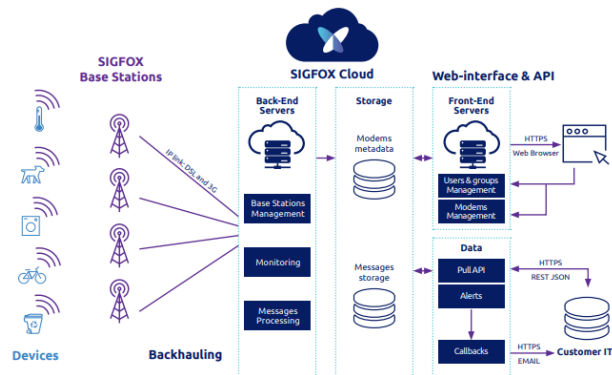


Ilustración 0.13. Arquitectura plana de Sigfox
Fuente: tomado de [2]

Los dispositivos envían los datos por radioenlace a través del aire hacia las estaciones base, y luego pasan por el Backhaul o transporte de retorno. El Backhaul implementa generalmente la conectividad DSL (*Digital Subscriber Line*) que utiliza los espectros de frecuencia no utilizados para la comunicación, y 3G o 4G; en caso de que ninguna de las anteriores este, es posible la conectividad por satélite, como un sistema de más respaldo.

El *Backend* es la etapa de procesamiento y control lógico de la nube, se encarga de seleccionar y almacenar solo un dato de todas las réplicas que llegan a la red central. Los servidores de la red central, también se encargan de monitorear y administrar las estaciones base de la red global.

Los datos que llegan al *Backend*, se pueden almacenar en dos ubicaciones: los metadatos que pueden utilizarse para la construcción de servicios y los mensajes disponibles para los clientes para que estos puedan recuperarlos. Por último, la interfaz web y API, les permiten a los usuarios ingresar a la plataforma en cualquier momento y desde cualquier dispositivo, y poder generar una descarga de los datos hacia cualquier plataforma o base de datos local o en la web.

Velocidad de transmisión y bandas de operación

Gracias a la modulación de banda ultra estrecha (UNB, del inglés), Sigfox opera en 192 KHz de la banda disponible públicamente para el intercambio de mensajes por aire.

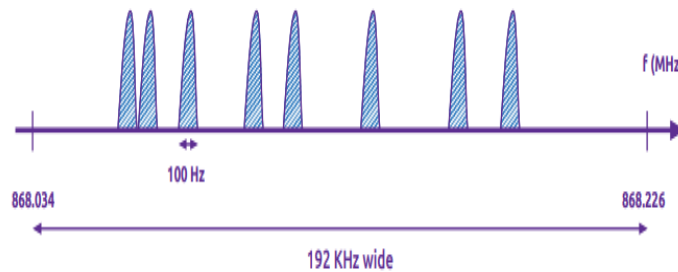


Ilustración 0.14. UNB, utilizada en SigFox
Fuente: tomado de [2]

Cada mensaje tiene unos 100Hz de ancho, transferido a una velocidad de 100 a 600 bps según la región, logrando transmitir a largas distancias con una alta tolerancia al ruido.

La red Sigfox opera en el espectro ISM o frecuencias sin licencia, coexistiendo con otras tecnologías de radio en estas frecuencias sin riesgo de colisión; por ejemplo, en Europa la banda varía entre 868 y 868.2 MHz, y el resto del mundo entre 902 MHz y 928 MHz. Dichas bandas dependen de las regulaciones de cada país.

Alcance

El largo alcance de las estaciones base le permite a Sigfox implementar una red nacional a bajo costo. Esto se debe principalmente a que la baja tasa de bits, velocidad de 100bps, la modulación de radio UNB, la potencia de salida del dispositivo y la sensibilidad de las antenas de las estaciones base, le permiten a Sigfox comunicar a largas distancias, 10km en zona urbana y hasta 40km en zona rural. Además, usa la modulación por desplazamiento de fase (BPSK, del inglés) para hacer redes IoT de área amplia (WAN). El alcance se ve afectado por la topografía del sitio, si es línea de vista el alcance será mucho mayor. En interiores la cobertura es buena de igual manera, debido al uso de la banda sub GHz.

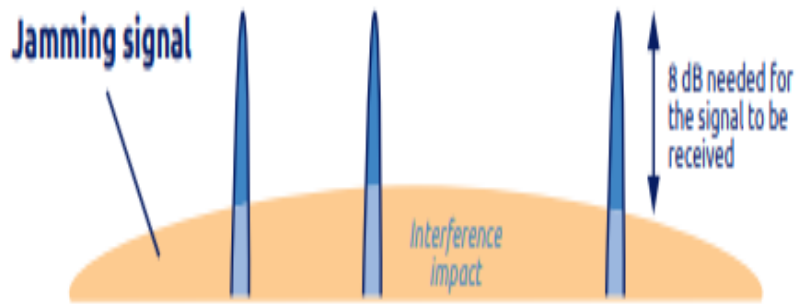
Eficiencia energética

Es un protocolo ligero que permite manejar mensajes pequeños y no se requiere de una conexión constante con la red o emparejamiento con las estaciones base, lo que permite disminuir el consumo de los dispositivos e incrementar la vida útil de las baterías hasta unos 10 años.

Gracias a los socios, Sigfox implementa chips semiconductores que llegan a consumir de 10 a 50 mA en la transmisión. Esta corriente se encuentra determinada por la potencia de transmisión permitida de cada país (e.g. Europa 14dB, EE. UU 22dB), lo que es compensado con el tiempo que tarda el mensaje en el aire; entre mayor potencia menos tiempo de vuelo, por ende, menos consumo.

Resistencia a la interferencia

La robustez intrínseca de UNB junto con la gran disponibilidad de estaciones base ofrecen excelentes capacidades anti interferencias, además, al implementarse bandas libres ISM se debe respetar las regulaciones que limitan los niveles de potencia transmitida. Por las razones expuestas, UNB es extremadamente robusto en un entorno donde se presentan más señales, incluidas las señales de espectro ensanchado.



*Ilustración 0.15. Resistencia a la interferencia
Fuente: tomado de [2]*

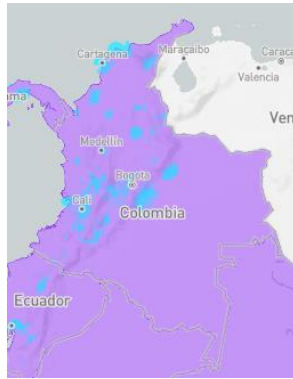
Para que un mensaje pueda ser recibido, la potencia de la señal debe encontrarse al menos 8dB por encima del nivel del ruido.

Cobertura



*Ilustración 0.16. Cobertura de la red Sigfox a nivel mundial
Fuente: tomado de [3]*

En la figura 5.6, el color azul indica los países que cuentan con cobertura SigFox. Es evidente el despliegue y aceptación que ha tenido Sigfox en todo el mundo, son cerca de 72 países y apunta a cubrir el 100% en los próximos años.



*Ilustración 0.17. Cobertura Sigfox en Colombia
Fuente: tomado de [3]*

A nivel nacional, actualmente son pocas las zonas donde se está implementando esta tecnología. Desde mayo del 2014 Sigfox decide tomar al municipio de Popayán como ciudad piloto para iniciar su expansión en Colombia. El operador de servicios Sigfox en Colombia es WND Colombia.



*Ilustración 0.18. Operador Sigfox Colombia
Fuente: tomado de [4]*

Calidad del servicio

El modem de radio de Sigfox envía ráfagas de datos a las antenas de la estación base, donde la señal es captada por más de una antena; de igual manera, un dispositivo no está conectado a una estación base específica, sus mensajes son recibidos por cualquier estación que se encuentre dentro del rango debido a que los mensajes se transmiten en todas las direcciones, y no hay necesidad de reconocimiento de mensajes. La diversidad espacial junto con la diversidad de tiempo y frecuencia de las repeticiones de tramas de radio conducen a una alta calidad de servicio de la red Sigfox.

Mensajes

Los mensajes están diseñados para ser muy pequeños y es posible transmitirlos de forma bidireccional. Para los mensajes ascendentes o Uplink, el *Payload* se encuentra limitado a tan solo 12 Bytes y teniendo en cuenta el encabezado, dirección dispositivo y demás partes de la trama, esta podría alcanzar un tamaño de hasta 26 Bytes máximo en total. Así mismo, permite un máximo de 144

mensajes por día. En el enlace descendente o *Downlink*, la carga útil máxima del mensaje es de 8 Bytes y una limitación de máximo 4 mensajes por día.

Una característica a tener en cuenta es que Sigfox es eficaz para las comunicaciones desde los nodos a las estaciones base, con una velocidad de 100 a 600 bps, pero no es particularmente eficaz en transmisiones desde las estaciones base hasta los puntos finales debido a que las descargas son más lentas que la subida de información [5].

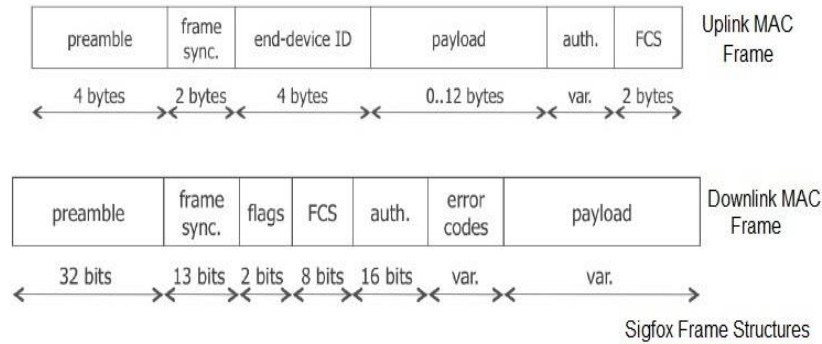


Ilustración 0.19. Trama de Sigfox
Fuente: tomado de [5]

Etapas para el envío de mensajes

En la figura 5.9, se muestra el proceso realizado en la transmisión de un mensaje desde el dispositivo final hasta el Backend de Sigfox.



Ilustración 0.20. Transmisión ascendente
Fuente: tomado de [5]

1. El dispositivo final envía un mensaje de radio con una carga útil de máximo 12 Bytes en modo ráfaga hacia las estaciones base de Sigfox;
2. Las estaciones base más cercanas al dispositivo reciben el mensaje;

3. Las estaciones envían el mensaje a la nube de Sigfox, donde se autentica el mensaje y se reagrupan los duplicados;
4. Por último, el mensaje es enviado a la plataforma IT del usuario.

Proceso para la transmisión descendente:

1. El dispositivo final debe enviar un mensaje Uplink que va hasta la plataforma del cliente, solicitando un mensaje downlink, de esta manera es el dispositivo final quien inicia la comunicación en forma de petición.
2. La aplicación cliente responde a la solicitud bidireccional hacia la nube, la nube solicita a las estaciones base más cercanas que envíen la respuesta hacia el dispositivo que realizó la petición.
3. Después de que el dispositivo haya realizado la petición, debe esperar alrededor de 30s para recibir la respuesta. Sigfox no tiene un método de confirmación si el mensaje fue o no recibido por el dispositivo.

Zonas

La configuración de los radios se realiza de acuerdo a la zona de implementación:

- RC1: Europa
- RC2: Canadá, Brasil, México, USA
- RC3: Japón
- RC4: Latinoamérica
- RC5: Corea del Sur
- RC6: India
- RC7: Rusia

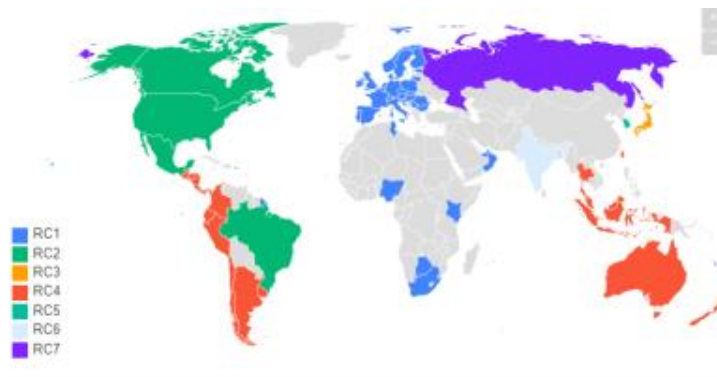


Ilustración 0.21. Distribución de zonas
Fuente: tomado de [2]

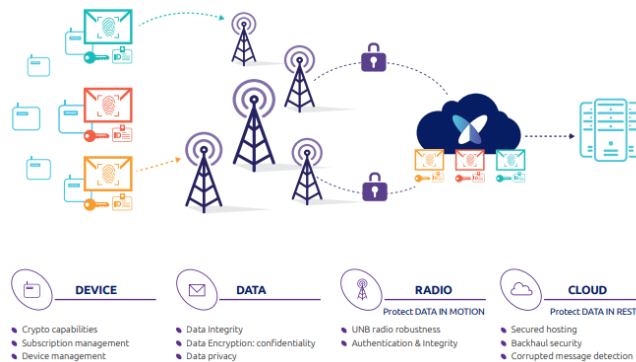
Modulación

Esta tecnología se basa en la modulación diferencial DBPSK para mensajes Uplink y una modulación GFSK para mensajes Downlink; en ambas direcciones trabaja sobre la tecnología de comunicación UNB, transmitiendo sobre las bandas de frecuencia sub-GHz libres.[5]

Seguridad

Sigfox implementa un nivel de seguridad en las diferentes etapas recorridas por el mensaje, como se describe a continuación:

- El mensaje se autentica en las estaciones base, además, la red permite la conservación de la integridad y evita la necesidad de enviar mensajes repetidos bajo la misma red;
- La demodulación de la información se realiza mediante radios desarrollados por software (SDR, del inglés), debido a que se trata de un algoritmo, el costo de operación se reduce;
- El aislamiento de cada uno de los componentes que se derivan de la composición de la red, permite mitigar el daño en caso de un intento de Hackeo;
- Los dispositivos no se comunican a través de internet o no están conectados con ninguna red o estación base, sino que cuando es requerido el dispositivo transmite un mensaje de radio que es recogido por las estaciones base. Esto hace que los dispositivos estén protegidos por un Firewall estricto;
- Para finalizar, el ecosistema Sigfox garantiza la integridad, disponibilidad y confidencialidad de los datos respetando las normativas locales.



*Ilustración 0.22. Seguridad de diseño de la red
Fuente: tomado de [2]*

Transceptores

En la tabla 1.1 se listan algunos transceptores (i.e. dispositivos que aceptan una comunicación bidireccional) de menos de 1 GHz que permiten la conectividad a Sigfox, comercialmente disponibles.

*Tabla 0.11. Transceptores de SigFox
Fuente: Propia*

Transceptor	Descripción	Bandas de frecuencia MHz	Zonas	Fabricante
S2-LP	Está diseñado para un rendimiento de RF de primer nivel y una eficiencia energética incomparable que extiende la vida útil de la batería de meses a más de 10 años. La radio incorporada garantiza un presupuesto de enlace de RF superior a 140 dB, además de una potencia de salida convincente de hasta +16 dBm, lo que da como resultado un enlace de comunicación robusto y confiable.	413-479 MHz (S2-LPQTR) 452-527 MHz (S2-LPCBQTR) 826-958 MHz (S2-LPQTR) 904-1055 MHz (S2-LPCBQTR)	Europa EE.UU Japon China	STMicroelectronics
CC1120	Transceptor de RF de alto rendimiento para sistemas de banda estrecha, con un funcionamiento de muy baja potencia y bajo voltaje en sistemas inalámbricos rentables. Todos los filtros están integrados, eliminando así la necesidad de costosos filtros externos SAW e IF.	136,7-160 164-192 205-240 273,3-320 410-480 820-960	Europa EE.UU Japon	Texas instruments
AX5043	El AX5043 es un verdadero transceptor de RF ASK y FSK de un solo chip, banda estrecha y potencia ultrabajo para las bandas de frecuencia de 27 MHz a 1050 MHz. Ofrece la combinación única de consumo de energía ultrabajo para la operación de transmisión y recepción combinada con la más alta sensibilidad y alta selectividad	27 MHz - 1050 MHz	Todas las zonas	ON Semiconductor
SL446X	Los dispositivos Si446x de Silicon Labs son transceptores de alto rendimiento y baja corriente	119 MHz - 1050 MHz	Todas las zonas	Silicon Labs

Módulos

Un módulo integra todo lo que se necesita para que un sistema se comunique con la red Sigfox. La tabla 1.2, describe algunos de ellos para la Zona 4 (zona en la que está incluido Colombia), comercialmente disponibles.

*Tabla 0.12. Módulos de SigFox
Fuente: Propia*

Módulo	Descripción	Zonas	Fabricante
SiPy 22dBm	El SiPy viene en dos versiones de placa de desarrollo: la versión de 14dBm para Europa y la versión de 22dBm para prácticamente el resto del mundo. El SiPy incluye 2 años de conectividad Sigfox, así como acceso completo al nuevo servicio de geolocalización Sigfox . Compatible con los protectores de sensores Pysense y Pytrack de Pycom. Los módulos OEM también están disponibles. Potente CPU, BLE y radio WiFi de última generación, Alcance WiFi de 1KM MicroPython habilitado, el Linux de IoT para una programación 10 veces más rápida. WIFI, Bluetooth, RTC.	2 y 4	Pycom
SN10-12	La serie SN10-1X está construida con la última tecnología inalámbrica SIGFOX en el interior junto con NXP OL2385 como núcleo. El OL2385 contiene un microcontrolador RISC para manejar la aplicación simple. InnoComm SN10-12, un módulo rentable, es la mejor opción para su solución de IoT que proporciona una estructura más eficiente y poderosa, además de un soporte integral tanto en el diseño de hardware como de software	2 y 4	InnoComm
Tipo ABZ Sigfox	El tipo ABZ (Sigfox) utiliza un microcontrolador inalámbrico basado en STMicro STM32 y SX1276 Semtech RFIC, opera en la banda de frecuencia de 860 a 930MHz. Proporciona una potencia de salida nominal de +14 dBm que puede aumentarse a +20 dBm para aplicaciones de largo alcance o ubicación de señal deficiente.	1, 2 y 4	Murata manufacturing Co
SRM100A	El SRM100A es un módulo Monarch + BLE5.0 con la solución BlueNRG-2 y S2-LP de STM y es el módulo Monarch más pequeño y ayuda al cliente al diseño rápido debido al tipo SMD de medio orificio y al servicio FOTA de BLE5.0.	Todas	Seong ji Industrial
WSSFM11R2D	El módulo de modo de doble banda SFM11R2D Sigfox Only es un módulo miniaturizado (13,0 x 20,0 x 2,21 mm). La banda se configura mediante el comando AT. El módulo tiene un MCU integrado, así como un transceptor de RF integrado y es compatible con UART para comunicación externa. TCXO se utiliza en el módulo para mantener la tolerancia de frecuencia para las bandas operativas durante toda la vida útil del producto	2 y 4 No Nueva zelanda	Seong ji Industrial, anteriormente por Wisol

Kits de desarrollo

Un kit de desarrollo o *Devkit*, es una placa sin carcasa, perfecta para descubrir Sigfox; en la tabla 1.3 se mencionan algunos de estos kits comercialmente disponibles.

Tabla 0.13. Kits de desarrollo para SigFox
Fuente: Propia

Kit	Descripción	Zonas	Fabricante
Arduino MKRFOX1200	MKRFOX1200 es una placa potente que combina la funcionalidad de la conectividad Zero y SigFox. Ha sido diseñado para ofrecer una solución práctica y rentable para los fabricantes que buscan agregar conectividad SigFox a sus proyectos con una experiencia previa mínima en redes. Se basa en el Microchip SAMD21 y un módulo ATA8520 SigFox.	RC1	Arduino
Xkit RC4	El primer kit de desarrollo completo Sigfox Ready de Thinxtra. Cuenta con un conjunto completo de funciones y accesorios para permitir que cualquiera pueda configurar una solución de IoT, incluso con muy poca experiencia en hardware. Perfecto para empresas de nueva creación, casas de diseño, universidades y escuelas, el kit tiene todo lo que necesita para comenzar a usar la red Sigfox disponible a nivel mundial.	1, 2, 3 y 4	Thinxtra Solutions

Tabla 1.3. Kits de desarrollo para SigFox
(Continuación)

DVK-SFAZ-1-GEVK	El Sigfox DVK (DVK-SFAZ-1-GEVK) es un kit de desarrollo miniaturizado para el diseñador que comienza con el chip SoC AX-SFAZ, un SoC verificado por Sigfox de muy bajo consumo y alto rendimiento para enlace ascendente y descendente para RCZ4 región. El hardware Sigfox DVK consta de un adaptador de depuración USB y un módulo de RF e incluye todo el software necesario para desarrollar sistemas en los tiempos más cortos. El módulo ocupa poco espacio y está equipado con un conector SMA.	4	On Semiconductor
EVBSFM10R4	El EVBSFM10R4 es un kit de evaluación para el módulo SFM10R4 en la región RCZ4. Está diseñado para una evaluación rápida de la solución SigFox. Depurador integrado para depuración de software de SFM10R4. Soporte de puerto UART conectado por USB para comunicación UART. Todos los pines disponibles del módulo SFM10R4 se pueden conectar con un conector de paso de 2,54 mm. La antena SMA y el cable USB para depuración y comunicación UART están en la caja.	Todas	Seong Ji Industrial Co
X-BOARD-SF01	Placa de evaluación autónoma Módulo SF01 (Módulo SIGFOX para RCZ2 y RCZ4). Módulo basado en BlueNRG-1. Conector de interfaz SWD. Regulador de voltaje. Convertidor USB / UART. SPI e I2C disponibles.	2, 4	JPL Tecnologia
SOUL ONE	Es una tarjeta multipropósito que es fácil de integrar con diferentes tipos de sensores a proyectos de Internet of Things (IOT), gracias a la integración de comunicación SigFox. SOUL ONE es una herramienta versátil, ya que se basa en la plataforma ARDUINO, lo que facilita el desarrollo de proyectos IOT y prueba de concepto. Es la mejor forma de iniciar proyectos con la red Sigfox para empresas, escuelas, universidades, start-ups y casas de diseño.	2, 4	The Soul of Things TST

Plataformas

Una plataforma es una solución en la nube que puede proporcionar servicios de datos conectados a la nube Sigfox. A continuación, en la tabla 1.4, se describen algunas plataformas comercialmente disponibles, certificadas por Sigfox y utilizadas especialmente para monitorear condiciones ambientales.

Tabla 0.14. Plataformas certificadas por SigFox
Fuente: Propia

Plataforma	Descripción	Desarrollador
allMETEO® weather map and weather station portal	Nuevo portal meteorológico allMETEO para la gestión de sus microestaciones meteorológicas MeteoHelix IoT, estaciones meteorológicas AWOS basadas en EasyLogGSM y sistemas de sensores y estaciones meteorológicas de terceros. Acceso a datos en vivo y gestión de estaciones meteorológicas, incluido mapa meteorológico. Interfaz de usuario simple con datos históricos y en vivo en vista de gráfico y tabla. Exportar a software analítico popular como MS Excel (CSV y JSON). API para una fácil transferencia de datos en tiempo real a su infraestructura existente	BARANI DESIGN Technologies, s.r.o.
Temphawk	Temphawk es una plataforma de monitoreo de temperatura y humedad que funciona con el dispositivo Temphawk. Temphawk permite a sus usuarios realizar un monitoreo ambiental desde la comodidad de una oficina hasta la comodidad de un teléfono inteligente. Al conocer la temperatura a tiempo, podemos ayudarlo a que su vida sea segura y permitirle reaccionar a sus cambios. La aplicación se compone de una aplicación web y una aplicación móvil (iOS y Android). Activa tus dispositivos. Administra tus usuarios. Descarga el informe de datos de tu dispositivo. Configura tus alertas.	FOX-TECH CO.

REFERENCIAS

- [1] Sigfox, "SigFox Technology." <https://www.sigfox.com/en/what-sigfox/technology>.
- [2] Sigfox, "Sigfox Technical Overview," vol. 1, no. May, p. 26, 2017, [Online]. Available: <https://www.disk91.com/wp-content/uploads/2017/05/4967675830228422064.pdf>.
- [3] SigFox, "Coverage." <https://www.sigfox.com/en/coverage>.
- [4] WND Group, "WND Colombia." <https://www.wndgroup.io/colombia/>.
- [5] P. P. Garcés, "Redes de Área Extensa para aplicaciones de IoT: modelado de comunicaciones Sigfox," p. 80, 2017, [Online]. Available: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/86052/PARDAL - Redes de Área Extensa para aplicaciones de IoT: modelado de comunicaciones Sigfox.pdf?sequence=1>.

MANUAL DE USUARIO A NIVEL DE HARDWARE

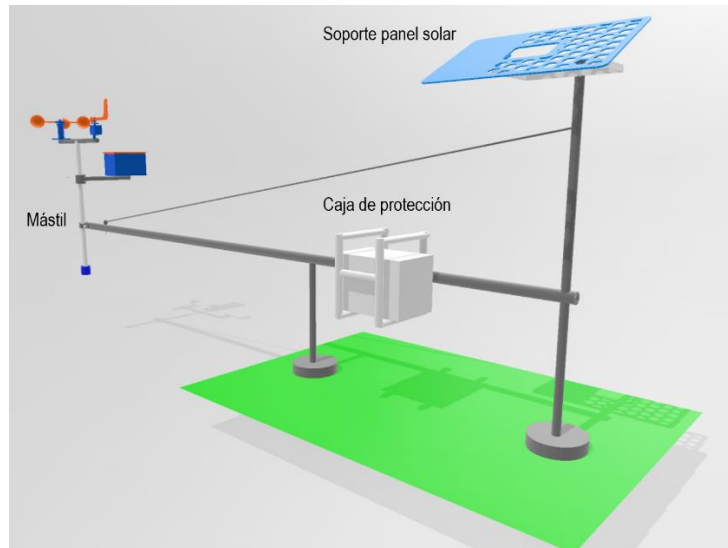
PRECAUCIONES

Cuando se utiliza cualquier artefacto electrónico siempre se deben seguir precauciones básicas de seguridad para evitar el riesgo de incendio, descarga eléctrica, entre otras. Entre las precauciones principales se incluyen las siguientes:

1. Lea todas las instrucciones antes de poner en funcionamiento la estación.
2. No toque los bornes de la batería sin guantes de protección.
3. No derramar ningún tipo de líquido dentro de la caja de protección.
4. No golpear ninguno de los dispositivos de la estación.
5. No sumergir ningún dispositivo, a excepción del panel el cual es resistente al agua.
6. Ubique la caja de protección en una ubicación completamente horizontal y estable.
7. No tocar los elementos que se encuentran dentro de la caja con un objeto conductor durante la operación, para evitar cortocircuitos.
8. Sellar completamente la caja antes de su implementación en la intemperie.
9. Evitar que los conductores de los diferentes sensores queden presionados con algún objeto.

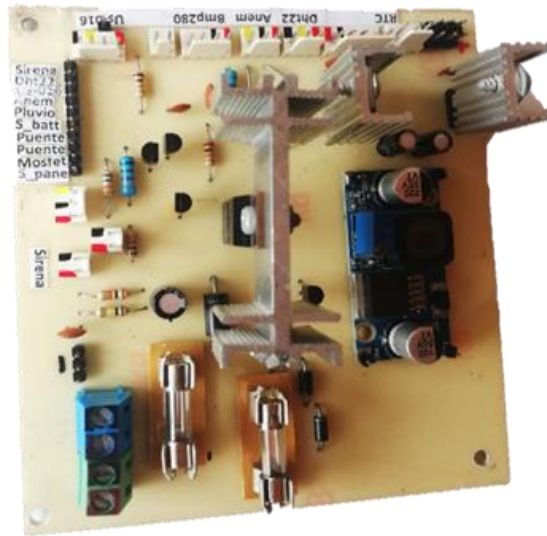
INSTALACIÓN DE LA ESTACIÓN

La instalación de cada uno de los diferentes elementos de la estación, es decir, sensores, panel, caja de protección y conexiones, es un proceso que se debe realizar cuidadosamente y siguiendo siempre las siguientes indicaciones, con el fin de obtener un correcto funcionamiento del sistema.

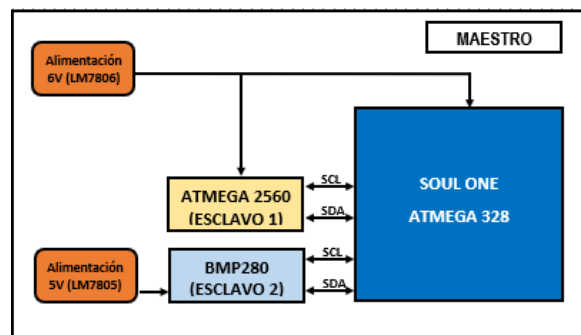


1. Ubique y asegure el pluviómetro, anemómetro, veleta y sensor de nivel en el mástil, preferiblemente que sea de tubo galvanizado y permita ubicar los sensores a una altura mínima de 2m desde el suelo.

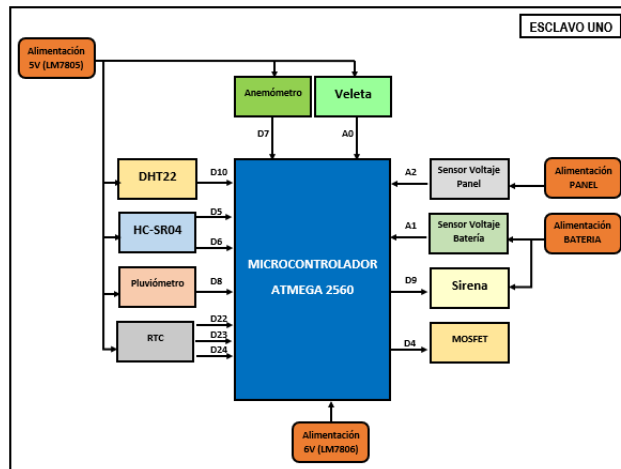
2. Ubique y asegure la caja de protección en un lugar seco, estable, nivelado y a una altura mínima de 0.5m desde el suelo.
3. Ubique y asegure el soporte del panel de manera que permita posicionarlo en orientación sur y a una inclinación de 15°.
4. Conecte cada uno de los sensores y demás dispositivos, tal como se describe en la siguiente figura.



5. En primer lugar, se deben conectar las cargas, en segundo lugar el panel, y por último la batería.
6. El panel se debe conectar en el borne de color azul y la batería en el borne de color verde, de la figura anterior. Para ello, se debe implementar un destornillador de pala.
7. Para las conexiones entre la placa PCB y la tarjeta de adquisición Arduino Mega, se deben utilizar conectores jumper macho hembra.
8. La conexión entre el Arduino Mega, sensor BMP280 y la tarjeta Soul One se debe realizar como se indica en la siguiente figura.



9. La conexión entre los diferentes sensores, dispositivos de control y fuentes de alimentación, con la tarjeta Arduino Mega, se debe realiza como se indica en la siguiente figura.



PUESTA EN MARCHA DE LA ESTACIÓN

Una vez efectuadas todas las conexiones descritas anteriormente, solo queda conectar la batería al borne de color verde de la placa de circuito impreso (PCB) para poner en funcionamiento toda la estación. El primer mensaje se transmitirá hacia el SigFox Backend a los diez minutos transcurridos a partir de ese momento.

MANTENIMIENTO DE LA ESTACIÓN

El mantenimiento de cualquier dispositivo electrónico es siempre imprescindible y cuando se habla de una estación meteorológica es imperativo porque además añade componentes que están expuestos a la intemperie y dispone de dispositivos que están en movimiento a causa de ella. De cara a proporcionar una exactitud y calidad de los datos es necesario que la estación meteorológica este en buenas condiciones. Una serie de comprobaciones y calibraciones rutinarias (cada tres meses) harán que el equipo este en óptimas condiciones, más aún si se espera la llegada del invierno. Las siguientes son algunas pautas generales para el adecuado mantenimiento de la estación.

1. Revisar el estado de los empalmes, terminales y demás puntos de conexión.
2. Revisar el voltaje de la batería, este no debe ser inferior a 10 V, de ser el caso revise la conexión del panel o cambie la batería.
3. Haga la limpieza pertinente de malezas y arboles alrededor de la estación.
4. Retirar hojas o bichos del pluviómetro, anemómetro, veleta y sensor de nivel.
5. Asegúrese que cada uno de los elementos de la estación, a excepción del panel, se encuentren nivelados.
6. Reinicie el sistema presionando simultáneamente los botones de reset del Arduino Mega y Soul One.

PROBLEMAS Y SOLUCIONES

Errores de instalación y mantenimiento del pluviómetro y anemómetro

1. Terreno con obstáculos (los posibles obstáculos deben estar a una distancia superior o igual a diez veces la altura del obstáculo con respecto al anemómetro).
2. Terreno con obstáculos (los posibles obstáculos deben estar a una distancia superior o igual a cuatro veces la altura del obstáculo con respecto a la boca de captación del pluviómetro).
3. Dificil acceso.
4. La estación no es representativa de la zona.
5. Instrumentos desnivelados o el soporte no tiene firmeza.
6. Des calibración del instrumento.

Las fallas más comunes de los instrumentos se pueden deber a:

1. Falta de sensibilidad.
2. Error por rozamiento.
3. Des calibración.
4. Instrumento sin mantenimiento o mantenimiento defectuoso.
5. Probeta de pluviómetro en mal estado o engrasada.
6. Balancín del pluviómetro desnivelado.
7. Área de recepción del pluviómetro obstruida por hojas y bichos.

Posibles fallas del sistema de alimentación

1. Bornes de la batería o panel corroídos por la humedad.
2. Terminales de la batería o panel mal conectados, falso contacto.
3. La batería supera los tres años promedio de vida útil.
4. El panel no se encuentra orientado hacia el sur y con una inclinación de 15°.
5. Sobrecalentamiento de las fuentes reguladoras o el dispositivo de conmutación, se recomienda utilizar crema disipadora.
6. Fusibles o varistor destruidos por sobre descarga.
7. Si la batería se descarga rápidamente, puede ser problema del diodo rectificador.

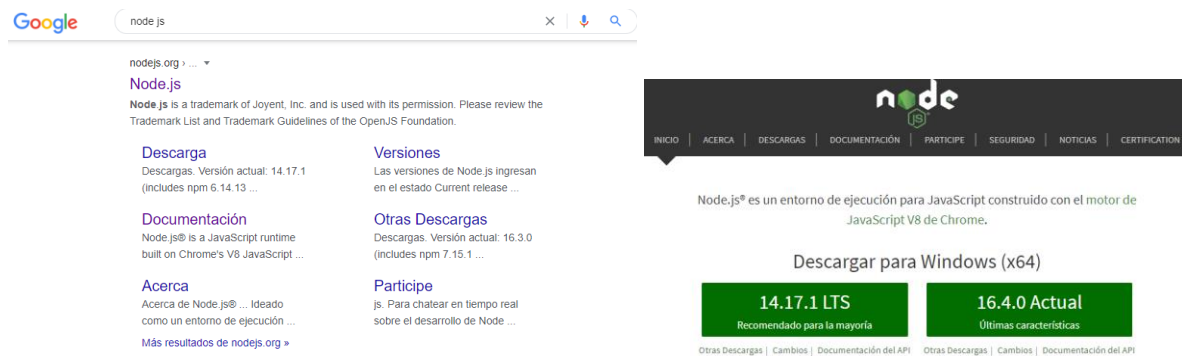
MANUAL DE USUARIO A NIVEL DE SOFTWARE

ENVÍO DE DATOS DESDE SIGFOX A FIREBASE

Para comenzar con este proceso, primero se debe instalar los siguientes programas: Node.js; además, tener una cuenta de Google, una cuenta en el Backend de SigFox y un dispositivo de SigFox activado.

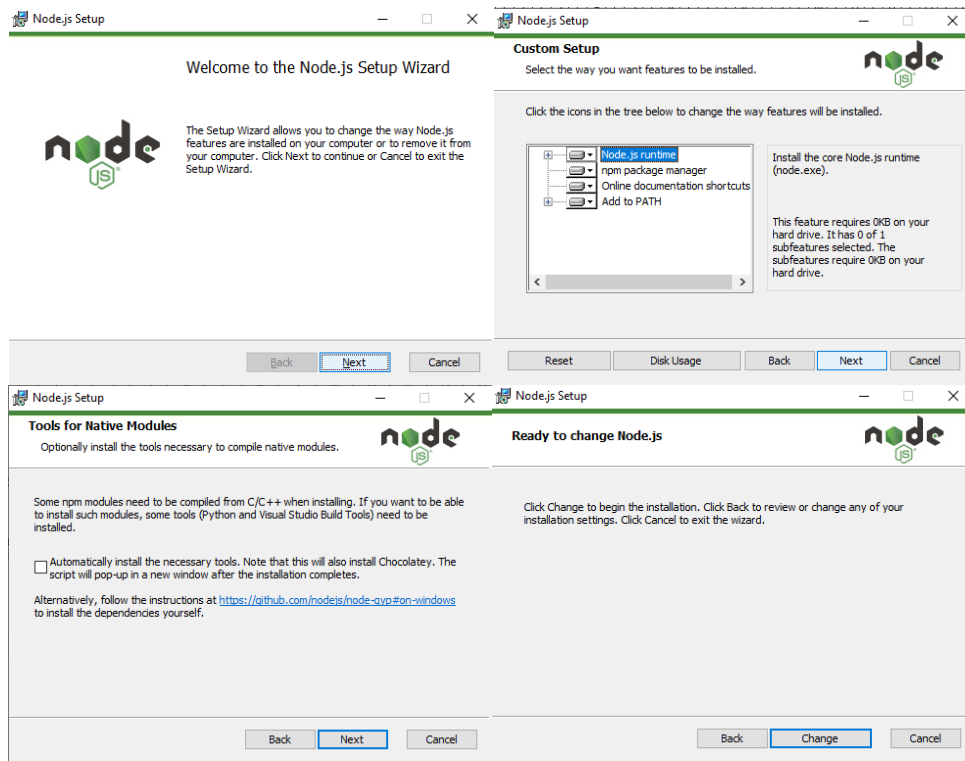
- **Instalación de Node.js**

En primer lugar, se debe dirigir a la página oficial de node.js “nodesjs.org” y dar clic en el botón de descarga para Windows.



The image shows a Google search for 'node.js' and the official Node.js website. The search results on the left include links for 'Descarga', 'Documentación', 'Acerca', 'Versiones', and 'Participe'. The website screenshot on the right features the Node.js logo, a navigation menu, and a prominent green button for '14.17.1 LTS' with the text 'Recomendado para la mayoría'.

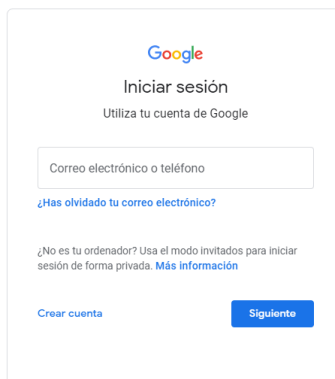
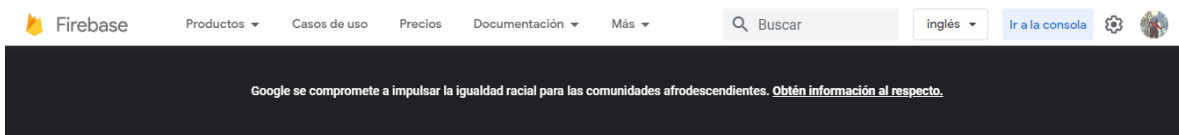
Despues de haberse descargado el archivo, se debe ejecutar como administrador, y seguir los pasos que se ilustran en las siguientes figuras:



Después de haber instalado Node.js, se procede a realizar el proceso de envío de datos.

- **Iniciar sesión en Firebase Console**

Ahora, para comenzar a enviar datos, primeramente, vaya a Firebase Console y le da clic en el menú “ir a la consola”, donde te aparecerá un recuadro para iniciar sesión o crear una cuenta.

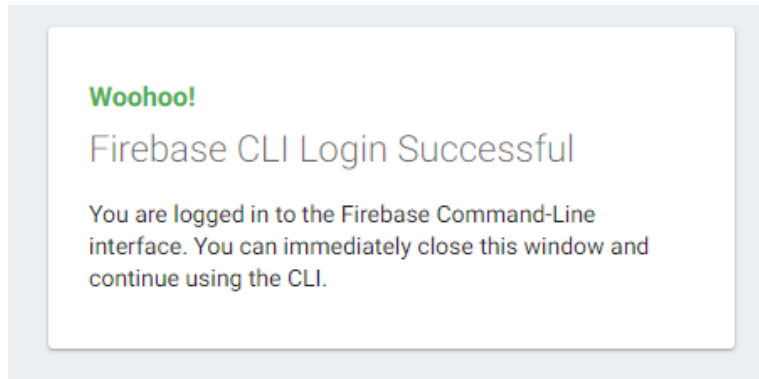


- **Creación de un punto final de Rest**

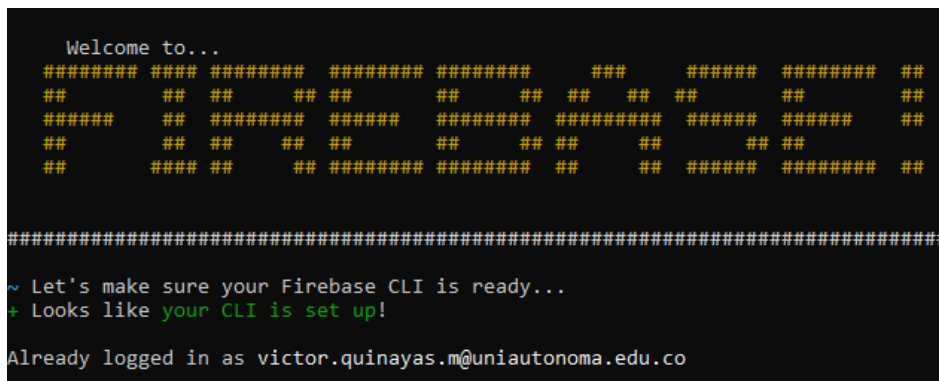
Para administrar, ver e implementar proyectos de Firebase, instalaremos Firebase CLI.

Instale Firebase CLI ejecutando este comando `npm install -g firebase-tools`

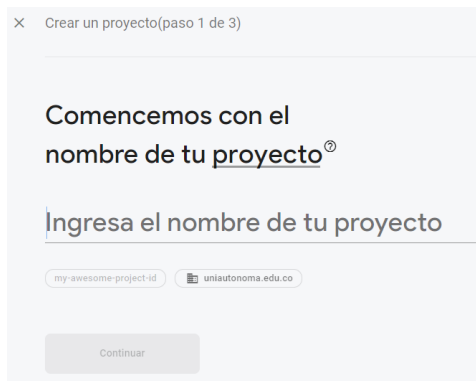
Después de eso, ejecute `firebase login` para iniciar sesión en Firebase usando la cuenta de Google. También podrá conectar su máquina local a Firebase y acceder a sus proyectos de Firebase.



Ahora vamos a crear un proyecto. Para generar un proyecto de función en la nube de firebase, ejecute `firebase init function`. Generará el proyecto, después de lo cual debería ver a continuación en la consola.



Regrese a la consola de base de fuego y cree su proyecto de base de fuego siguiendo los tres pasos.



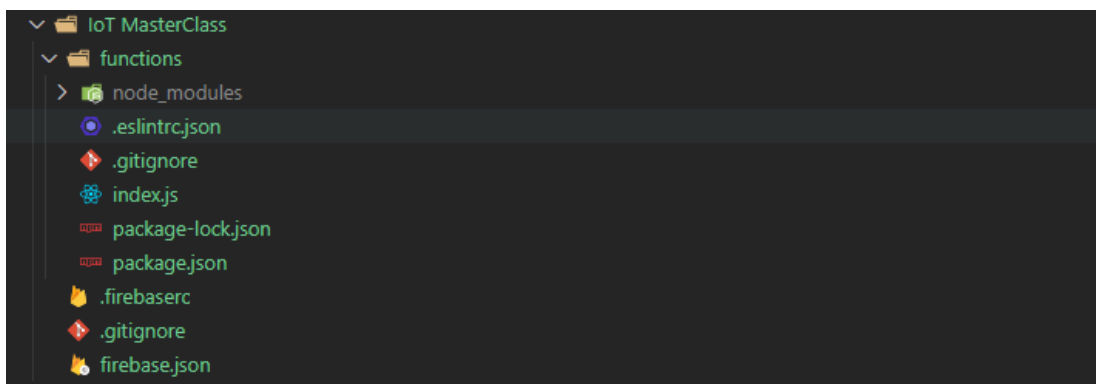
En la terminal, seleccione "Usar proyecto existente" e instale todas las dependencias. La herramienta le ofrece la opción de instalar dependencias con npm. Es seguro rechazarlo si desea administrar las dependencias de otra manera.

```
=== Project Setup

First, let's associate this project directory with a Firebase project.
You can create multiple project aliases by running firebase use --add,
but for now we'll just set up a default project.

? Please select an option: Use an existing project
? Select a default Firebase project for this directory: (Use arrow keys)
> sigfire-XXXX(Sigfire)
yoh-yoh (yoh-yoh)
```

Una vez que haya instalado las dependencias, debería ver varios cambios en sus archivos. Correr firebase init function.



Vaya al archivo index.js y encontrará un ejemplo de código de funciones en la nube. Queremos que nuestras funciones de Firebase Cloud manejen la solicitud de publicación http entrante para Warefab Konnect devkit y registren los datos en la consola.

```

1  /*****
2  Bulding Connected Devices with Sigfox
3  Ngesa N., Liquid Labs
4  *****/
5
6  const functions = require('firebase-functions');
7
8  // End point handling incoming http post req for warefab devkit
9  exports.warefabv1 = functions.https.onRequest((req, res) => {
10     const data = req.body.data || "Unknown";
11     console.log(req.body.data);
12     res.send(data);
13     // TODO: liquid functions - warefab parser
14
15     // TODO: send data to real time database
16 });

```

firesketch-sigfox-endpoint.js hosted with ❤️ by GitHub

[view raw](#)

- **Analizar la carga útil de Sigfox**

Escribe un módulo para decodificar lo recibido data e importarlo como decoded.

```

6  const functions = require("firebase-functions");
7  let decoded = require("./liquidfxns/warefab_konnect");
8
9  //End point handling incoming http post req for warefab
10
11 exports.warefabv1 = functions.https.onRequest((req, res) => {
12     const data = req.body.data || "Unknown";
13     console.log(req.body.data);
14
15     // liquid functions - warefab parser
16     let warefabdata = decoded.decodePayload(req.body.data);
17
18     const {
19         latitude: latitude,
20         longitude: longitude,
21         temperature: temperature,
22         humidity: humidity
23     } = warefabdata;
24
25     const decodedData = {
26         latitude: latitude,
27         longitude: longitude,
28         temperature: temperature,
29         humidity: humidity
30     };
31
32     const messages = JSON.stringify(decodedData);

```

- **Firebase Realtime Database**

Para guardar los datos decodificados en Firebase Database, necesitamos requerir herramientas de administración de Firebase e inicializarlo.

```
1  const functions = require("firebase-functions");
2  const admin = require("firebase-admin");
3  admin.initializeApp();
4  let decoded = require("../liquidfxns/warefab_konnect");
5
6  const messages = JSON.stringify(decodedData);
7
8  // send data to real time database
9  admin
10   .database()
11   .ref("/messages")
12   .push({ decodedData })
13   .then(() => res.json("New Message added!"))
14   .catch(err => res.status(400).json("Error: " + err));
```

A continuación, podemos guardar el decodificado messages en los mensajes de referencia.

- **Implementar la función**

Para implementar en el proyecto de Firebase, ejecute el siguiente comando desde el directorio de su proyecto firebase deploy.

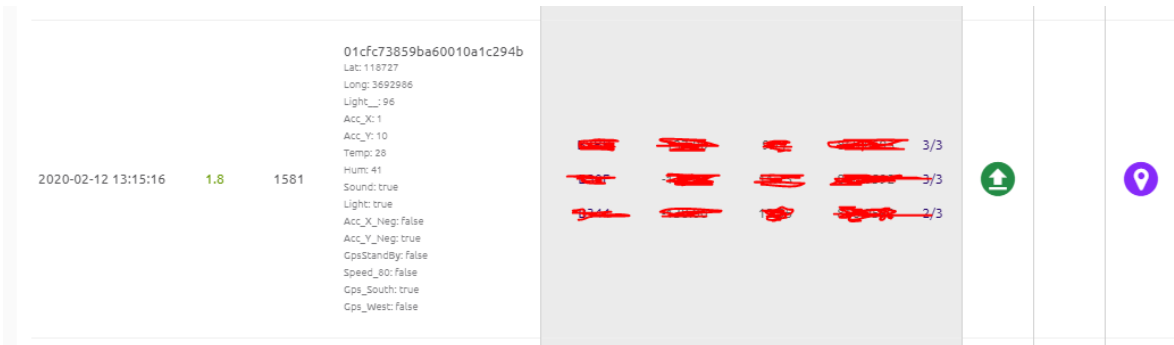
```
=== Deploying to 'sigfire-2939b'...
i  deploying functions
Running command: npm --prefix "$RESOURCE_DIR" run lint
> functions@ lint C:\Users\user\Documents\IoT MasterClass\functions
> eslint .
+  functions: Finished running predeploy script.
i  functions: ensuring necessary APIs are enabled...
+  functions: all necessary APIs are enabled
i  functions: preparing functions directory for uploading...
i  functions: packaged functions (41.26 KB) for uploading
+  functions: functions folder uploaded successfully
i  functions: creating Node.js 8 function warefabv1(us-central1)...
+  functions[warefabv1(us-central1)]: Successful create operation.
Function URL (warefabv1): https://us-central1-sigfire-2939b.cloudfunctions.net/warefabv1
+  Deploy complete!
```

- Integración red SigFox IoT con Firebase

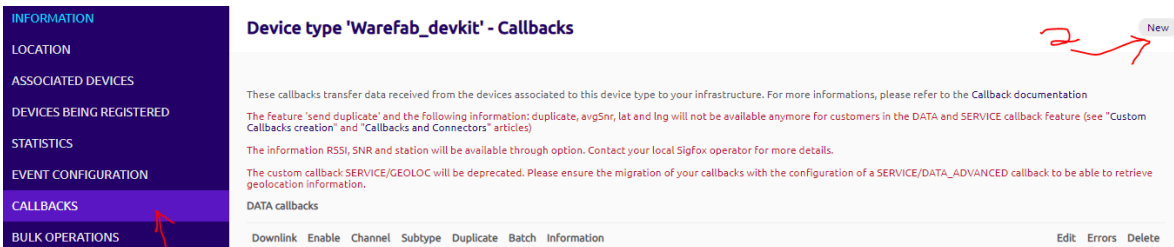
Configure el backend de SigFox para activar las funciones de Firebase HTTP Cloud. La configuración de las devoluciones de llamada se realiza en la página de tipo de dispositivo de backend de Sigfox.

Asegúrese de que puede ver los mensajes enviados por su dispositivo en su backend Sigfox, en Dispositivo> Mensajes.

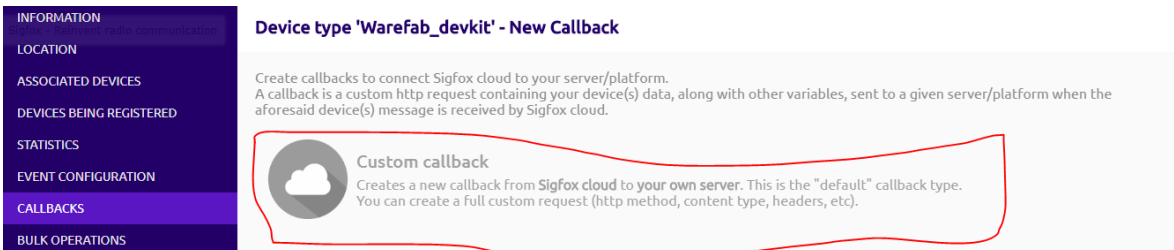
Ejemplo de mensajes de SigFox



Si puede ver los mensajes enviados por su dispositivo, puede continuar con el siguiente paso.

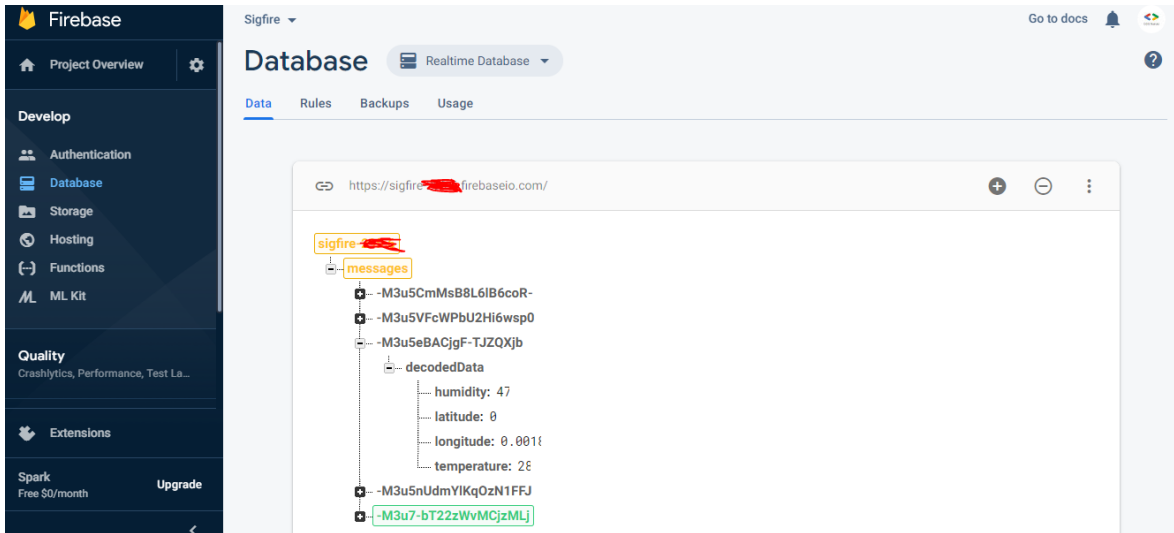


Haga clic en "devoluciones de llamada" y luego en "Nuevo"



Elija la "devolución de llamada personalizada"

Firestore Realtime Database



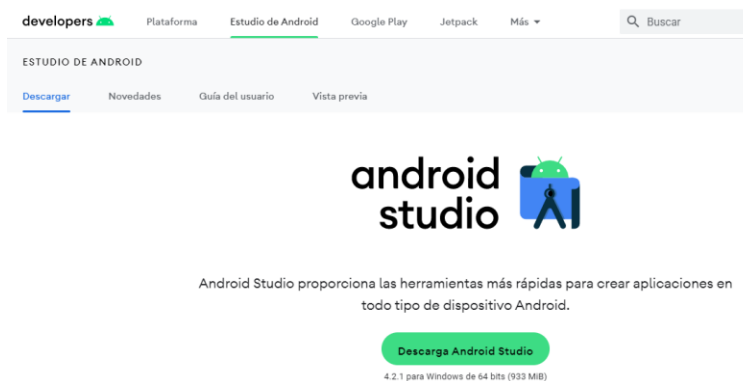
APP MÓVIL

Para llevar a cabo el desarrollo de la aplicación mediante la plataforma Android Studio, se requiere, primeramente, realizar la instalación de los programas listados en la tabla, los cuales se descargaron de las páginas oficiales de Oracle y Android Studio

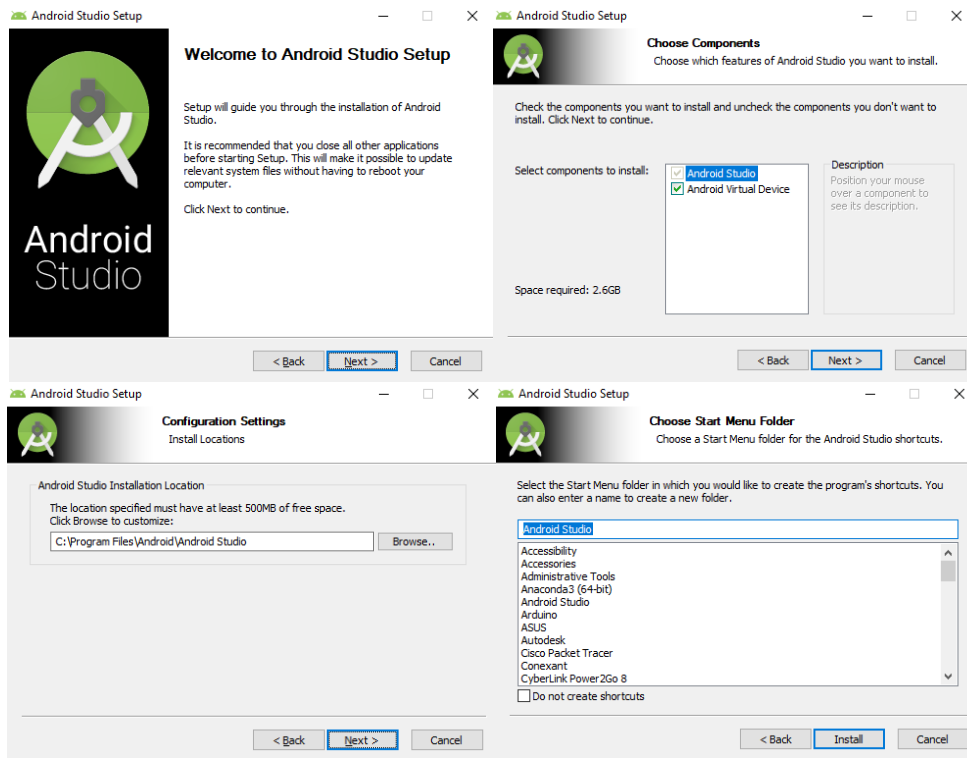
PROGRAMA	DESCRIPCIÓN
IDE Android Studio	Plataforma para el desarrollo móvil en Android
SDK	Permite implementar el emulador y algunas herramientas de depuración
JDK	Permite implementar las bibliotecas API y las herramientas que posibilitan la creación, prueba y depuración de las aplicaciones; además, encargado de compilar la app incluyendo todos sus recursos y ficheros en un archivo con extensión APK

- **Instalación IDE Android Studio**

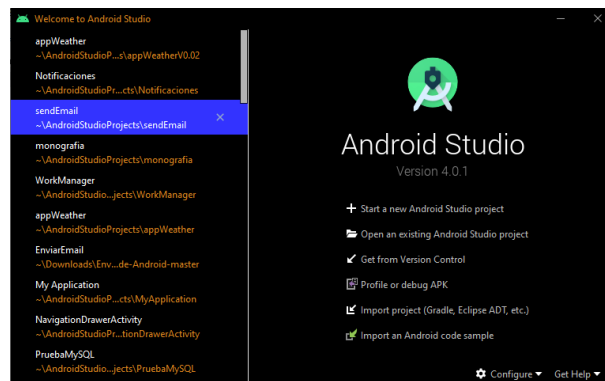
En primer se debe dirigir a la página oficial de Android Studio, y dar clic en descargar.



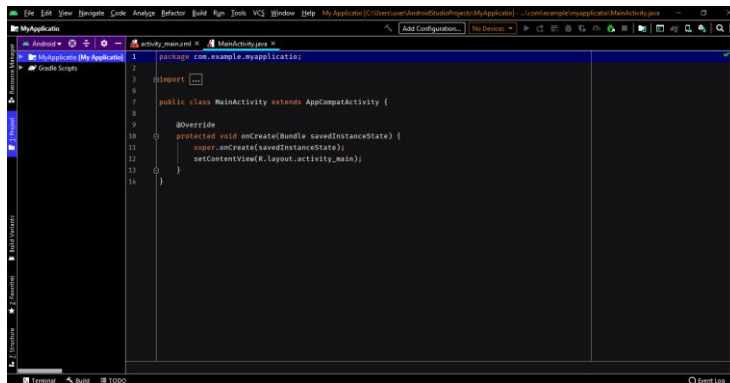
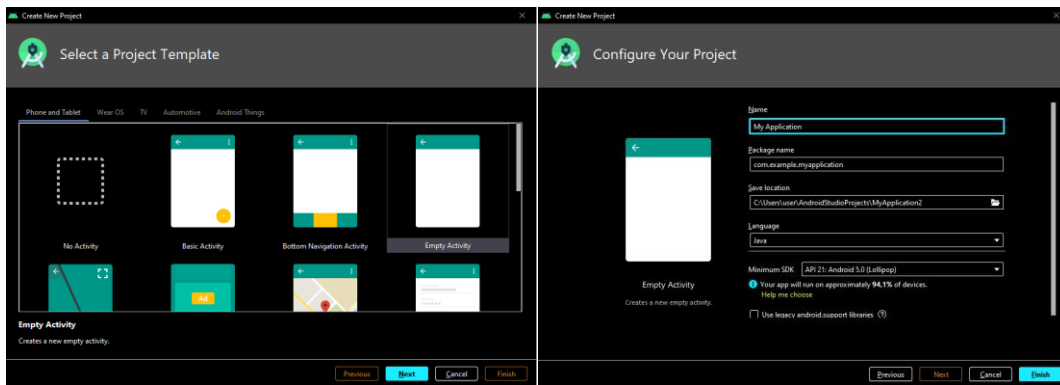
Luego, se ejecuta el archivo descargado como administrador, y se procede a seguir los siguientes pasos:



Seguidamente, aparece la pantalla de bienvenida a Android Studio.

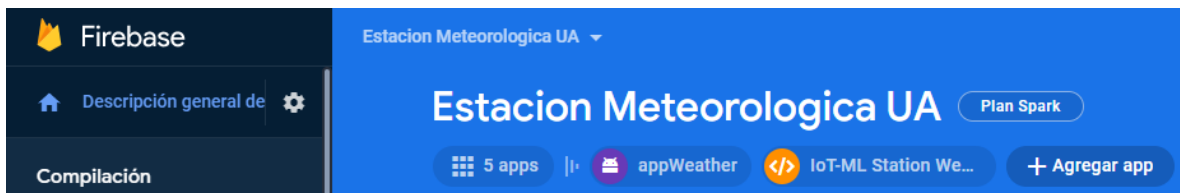


El siguiente paso es seleccionar una plantilla con la que va iniciar su proyecto, es decir, se selecciona de acuerdo a los requerimientos del estudio. Luego se debe configurar la aplicación, ingresando el nombre, lenguaje y SDK.



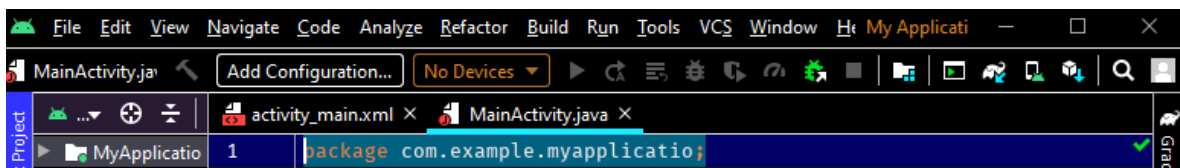
- **Enlace Aplicación móvil con Firebase**

Primeramente, accede al proyecto creado en Firebase Console, y le das clic en el botón Agregar App y selecciona que tipo de aplicación vas a crear, en este caso Android.



Seguidamente, se completará un formulario de configuración realizando 3 pasos.

1. Ingresar el nombre del paquete de la aplicación, sobrenombre, y, por último, dar clic en el botón registrar




```

Archivo build.gradle de nivel de proyecto (<project>/build.gradle):
buildscript {
  repositories {
    // Check that you have the following line (if not, add it):
    google() // Google's Maven repository
  }
  dependencies {
    ...
    // Add this line
    classpath 'com.google.gms:google-services:4.3.8'
  }
}

allprojects {
  ...
  repositories {
    // Check that you have the following line (if not, add it):
    google() // Google's Maven repository
  }
}

Archivo build.gradle de nivel de app (<project>/<app-module>/build.gradle):
apply plugin: 'com.android.application'
// Add this line
apply plugin: 'com.google.gms.google-services'

dependencies {
  // Import the Firebase BoM
  implementation platform('com.google.firebase:firebase-bom:28.1.0')

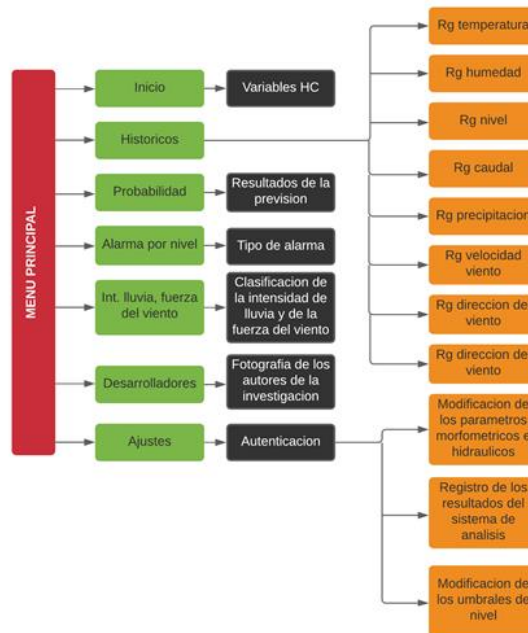
  // Add the dependency for the Firebase SDK for Google Analytics
  // When using the BoM, don't specify versions in Firebase dependencies
  implementation 'com.google.firebase:firebase-analytics'

  // Add the dependencies for any other desired Firebase products
  // https://firebase.google.com/docs/android/setup#available-libraries
}

```

- **Navegación por el menú de la App móvil**

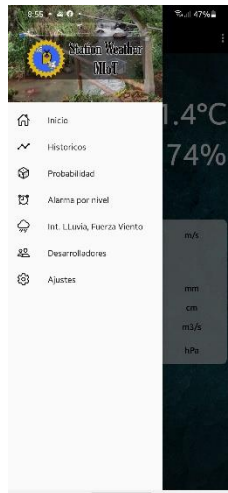
Después de haber desarrollado la aplicación móvil, se debe guiar al usuario por la navegación del menú, de la siguiente forma:



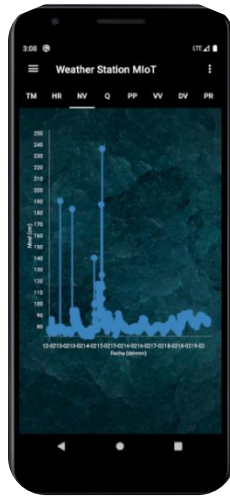
Al iniciar la aplicación aparece la siguiente pantalla



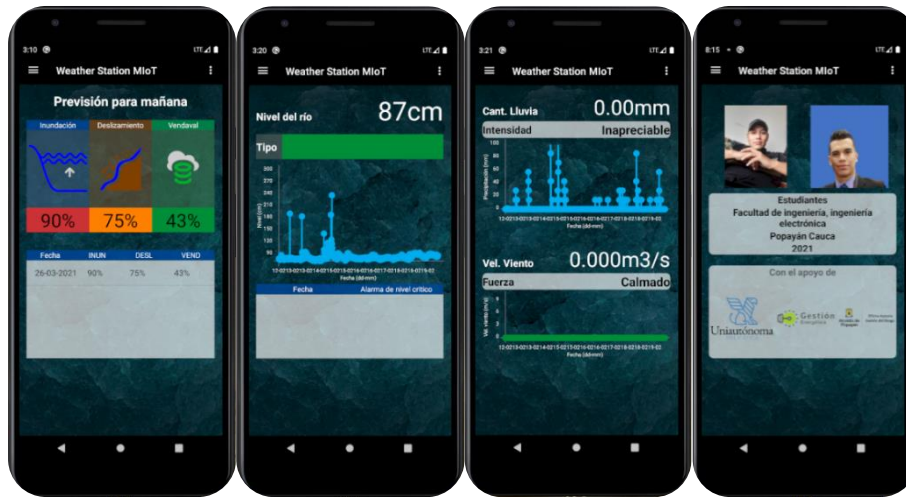
Al dar clic en el menú ubicado en la parte superior izquierda, aparece el siguiente menú desplegable.



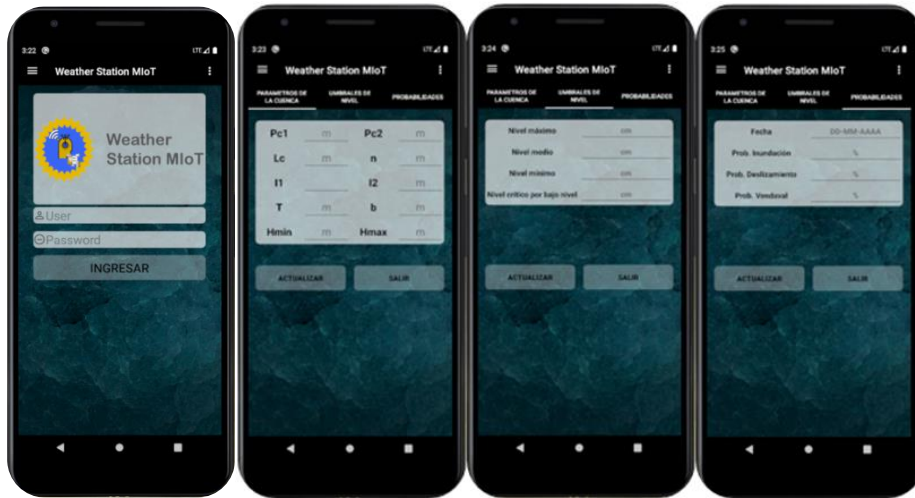
Al presionar Históricos, se dirige a la siguiente pantalla, donde encuentra un cajón de slices, con el fin de observar las gráficas de históricos de todas las variables.



Del mismo modo, se despliega para las demás opciones, obteniendo las siguientes pantallas



Para la pantalla de ajustes, se debe ingresar un usuario y contraseña, para ello debe ser solicitada al diseñador de la aplicación, al ingresar los datos se encuentra con una pantalla donde se modifican tres aspectos, probabilidades, umbrales y parámetros cuenca, los cuales al presionar en el botón actualizar serán actualizados en la base de datos de Firebase. Por otro lado, si presionas el botón Salir, cierras sesión.



APLICACIÓN WEB

- Enlace aplicación WEB con Firebase

Del mismo modo que en la aplicación móvil, se accede a el proyecto creado en Firebase Console, le da clic en agregar app, y selecciona el icono de una página web. Esta aplicación se desarrolla mediante los lenguajes Javascript, HTML y CSS.

Ahora, se llena el formulario de configuración en 2 pasos:

1. Se registra la aplicación con un nombre, y se le da clic en el botón registrar app

× Agrega Firebase a tu aplicación web

1 Registrar app

Sobrenombre de la app ?

Además, configura **Firebase Hosting** para esta app. [Más inform](#)

También puedes configurarlo más adelante. Puedes comenzar a usarlo si

Registrar app

2. Se agrega el SDK de Firebase mediante un archivo Java Script en la parte inferior de la plantilla HTML.

```

<!-- The core Firebase JS SDK is always required and must be listed first -->
<script src="https://www.gstatic.com/firebasejs/8.6.8/firebase-app.js"></scrip

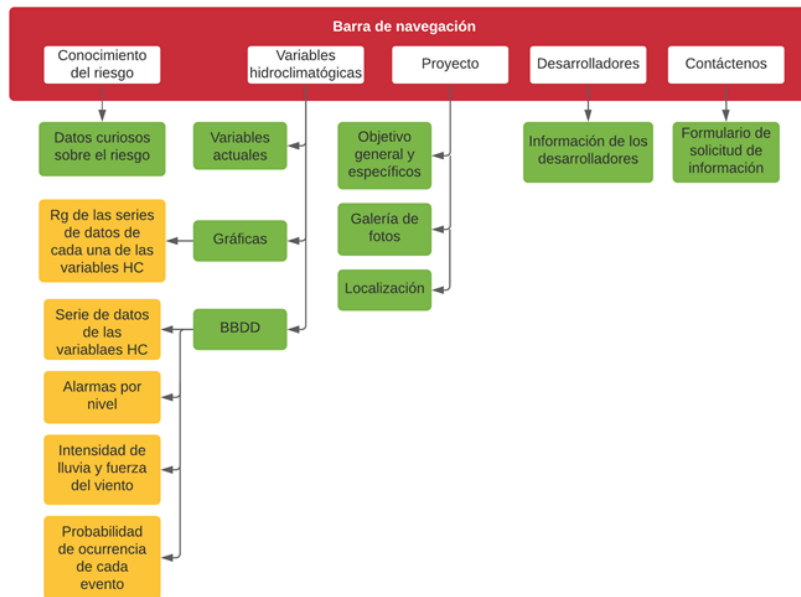
<!-- TODO: Add SDKs for Firebase products that you want to use
https://firebase.google.com/docs/web/setup#available-libraries -->
<script src="https://www.gstatic.com/firebasejs/8.6.8/firebase-analytics.js"><

<script>
// Your web app's Firebase configuration
// For Firebase JS SDK v7.20.0 and later, measurementId is optional
var firebaseConfig = {
  apiKey: "AIzaSyAj1ZkR7ipXBVPNDmhwkwtqsVCs2biqEJQ",
  authDomain: "estacion-meteorologica-ua.firebaseio.com",
  databaseURL: "https://estacion-meteorologica-ua.firebaseio.com",
  projectId: "estacion-meteorologica-ua",
  storageBucket: "estacion-meteorologica-ua.appspot.com",
  messagingSenderId: "892410951679",
  appId: "1:892410951679:web:a9371934cd8c0442ad59ca",
  measurementId: "G-RBMV4KEV4R"
};
// Initialize Firebase
firebase.initializeApp(firebaseConfig);
firebase.analytics();
</script>

```

- **Navegación por el menú de la página WEB**

Después de haber desarrollado la página WEB, se debe guiar al usuario por la navegación del menú, de la siguiente forma:



Al ingresar a la página WEB, se encuentra con la sección de conocimiento del riesgo, donde se observan datos de interés.



Luego al presionar la opción Medidas Hidroclimatológicas, aparece la sección que contiene los valores actuales de las variables.

VARIABLES HIDROCLIMATOLÓGICAS

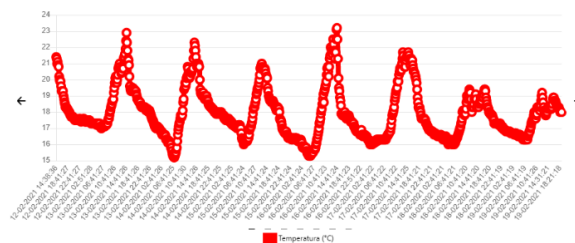
18°C 96.1%

Nivel	Caudal	Precipitación	Velocidad del viento	Dirección del viento	Presión atmosférica
262cm	3,26m3/s	0.00mm	0.000m/s	NE	828.8hPa

Graficas Bases de datos

Al presionar el botón de Graficas, se dirige a una sección donde está representado gráficamente el comportamiento de las variables. Por otro lado, al presionar el botón Base de datos, se dirige a una sección que contiene las diferentes tablas que pueden ser exportadas en archivo Excel dando clic en el icono de Excel.

Comportamiento de la temperatura



Medidas HidroClimatológicas



Registro	Fecha	Temperatura (°C)	Humedad del aire (%)	Velocidad del viento (m/s)	Dirección del viento (°)	Precipitación (mm)	Nivel (cm)	Caudal (m³/s)	Presión (hPa)
1	12-02-2021 14:26:36	21.4	80.4	0.011	0.011	0.00	79	3.26	826.1
2	12-02-2021 14:48:35	21.3	79.3	0.000	0.000	0.00	79	3.26	826
3	12-02-2021 14:58:35	21	85.2	0.000	0.000	0.00	80	3.26	825.9
4	12-02-2021 15:11:27	21.1	81	0.000	0.000	0.00	77	3.26	825.8

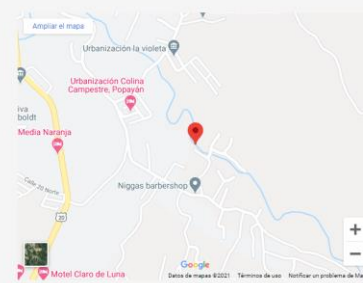
Luego, se da clic en la opción del menú Proyecto, y aparecerá información sobre los objetivos, ubicación del prototipo y galería de fotos.

OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un prototipo de detección y catalogación de fenómenos meteorológicos a partir del monitoreo de variables hidroclimáticas en la subcuenca "Río Molino" del municipio de Popayán.

Objetivos específicos

- Desarrollar el sistema de medición de variables hidroclimáticas (i.e. nivel, caudal, precipitación, temperatura, humedad relativa, presión atmosférica, velocidad y dirección del viento), con una frecuencia de muestreo que se ajuste a los requerimientos del estudio
- Implementar la arquitectura de comunicación basada en el concepto de IoT, para la transmisión de datos que serán visualizados mediante los aplicativos web y móvil, con una frecuencia de transmisión que se ajuste a los requerimientos técnicos del estudio
- Desarrollar un mecanismo de detección, registro y clasificación del tipo de fenómeno meteorológico y del nivel de alerta
- Evaluar el desempeño del sistema a partir de la validación del mecanismo de detección, registro y clasificación, y el cumplimiento en la generación y difusión de las alertas: de acuerdo a parámetros establecidos por institutos competentes



GALERÍA DE FOTOS



Por último, al dar clic en la opción de Desarrolladores y Contáctenos, conllevan a secciones que contienen información de los autores de la investigación, además, de poder ser contactados con los desarrolladores mediante un formulario.



AUTORES DE LA INVESTIGACIÓN



Victor M. Quinayas
Estudiante
Ingeniería electrónica
Facultad de ingeniería
Autonoma del Cauca
+57 311-761-7262



Juan M. Espinosa
Estudiante
Ingeniería electrónica
Facultad de ingeniería
Autonoma del Cauca
+57 310-535-1813



Julio A. Mesquera
Director
Docente-Investigador
Facultad Ingeniería
Autonoma del Cauca
+57 300-652-3318



Julian A. Caicedo
Codirector
Docente-Investigador
Facultad Ingeniería
Autonoma del Cauca
+57 300-493-0101



CONTÁCTENOS

Enviar