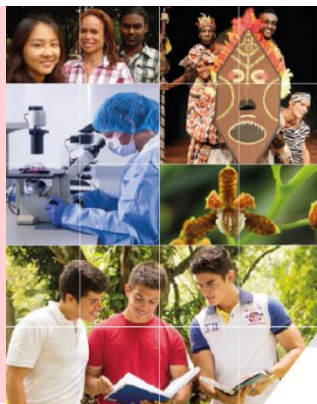




PROYECTO DE TRABAJO DE GRADO

MONITOREO DE SALINIDAD MEDIANTE INSTRUMENTACIÓN DE BAJO COSTO Y HERRAMIENTA GEOMÁTICAS

VANESSA HERNÁNDEZ BEDOYA
JOSE MIGUEL VERA SAAVEDRA

**Universidad
del Valle**

Programa Académico Ingeniería Topográfica

2022



Facultad de Ingeniería
ÁREA DE GEOMÁTICA

Una visión espacial...

Tesis

MONITOREO DE LA SALINIDAD MEDIANTE INSTRUMENTACIÓN DE BAJO
COSTO Y HERRAMIENTAS GEOMÁTICAS

Vanessa Hernández Bedoya
Jose Miguel Vera Saavedra

Documento presentado a
Pregrado de Ingeniería Topográfica
como requisito para optar por el título de
Ingenieros Topográficos

Director: PhD. Jhon Jairo Barona

Codirector Ing. Carlos Fernando Quiroga
 M.Sc. Robin Alexis Olaya

Universidad del Valle
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil y Geomática
Programa Académico de Ingeniería Topográfica
Santiago de Cali - Valle del Cauca
Febrero 2022

Resumen

El proyecto monitoreo de la salinidad mediante instrumentación de bajo costo con herramientas geomáticas, tiene como objetivo suministrar información espacial para el Monitoreo de salinidad en la bahía de Buenaventura. Para ello se diseñó e implementó un dispositivo de captura de datos: salinidad, temperatura, posición, altura y tiempo integrado a un Geovisor para el despliegue de la información en línea.

El reto asumido por los autores fue que a partir de los conocimientos adquiridos en el programa de ingeniería topográfica, especialmente en asignaturas como tecnologías geomáticas, GNSS y SIG en web y móviles se logró concebir un desarrollo tecnológico geomático, en el marco de un proyecto interno del laboratorio de geoposicionamiento, instrumentación y metrología geomática GOP y el grupo de investigación en percepción remota GIPER, de la Universidad del Valle.

En el desarrollo del instrumento se hizo una revisión de los dispositivos electrónicos de fácil integración, disponibles en el mercado, explorando algunos elementos de electrónica y metrología, para obtener mediante la experimentación, los conocimientos complementarios y la destreza necesaria para el desarrollo del instrumento.

El dispositivo, obtiene mediante sensores electrónicos las medidas, localización y datos, a modo de herramienta para el sensado de variables ambientales en tiempo real, posteriormente los envía por un canal inalámbrico por medio de comunicación LoRa que es una banda de señal libre y de baja potencia, para ser subidos posteriormente a un servidor que gestiona la base de datos y el Geovisor en el cual se procesan los datos para desplegarlos como información útil disponible para consulta en tiempo real.

Como resultado, además del dispositivo, se desarrolló una plataforma geomática de captura y visualización de los datos concernientes a la salinidad por medio de Software libre.

Como parte de la discusión se proponen dos métodos de interpolación de datos, que puedan describir el comportamiento de la variable de salinidad en el medio de

propagación marino, con el fin de generar mapas de salinidad a partir de monitoreo en estaciones puntuales.

Mediante experimentos de funcionalidad a diferentes condiciones y concentraciones salinas con el sensor de salinidad se siguieron dos metodologías de calibración y respuesta temporal, hasta obtener resultados concluyentes sobre la estabilidad y precisión del dispositivo, el producto final es un sistema muy sencillo y de bajo costo, oscilando alrededor de los \$155 dólares (Febrero 2022).

Palabras clave— Monitoreo, Visor Web Geográfico, Salinidad, Temperatura, Sensor.

Agradecimientos

A mi madre Ruth Clarena que ya no está con nosotros, pero que me dio las mejores bases para afrontar la vida, al igual que mi hermanita Kelly Daniela, QEPD, y a mi hermana mayor Angie Johanna que es mi motor para seguir adelante.

A toda mi familia, la familia Vera, por su incondicional apoyo durante toda mi vida, desde la mamita Maria Santos, pasando por mi tío y tías, primos y primas.

A mi compañera Vanessa Hernandez por su paciencia, apoyo y comprensión, Natalia Lemos por su presión constante y exigirnos a dar más, al igual que a mis compañeros con lo que pudimos formar un grupo único de trabajo y amistad.

Jose Miguel Vera Saavedra

Agradezco primero a Dios, a mis padres Dora y Alberto que siempre confiaron en mi, a mi Hermano David por que siempre me apoya incondicionalmente y a mi tia Patricia por que sin ella este logro no hubiese sido posible.

A toda mi familia, por su incondicional apoyo durante toda mi vida, desde mis abuelos, pasando por mi tío y tías, primos y primas.

A mis amigos Jose Miguel Vera y Natalia Lemos por que desde el inicio de este recorrido siempre han estado para ahí impulsando cada paso de este camino. También agradezco, a mis compañeros con los que formamos un grupo único de estudio y amistad.

Vanessa Hernández Bedoya

Finalmente, agradecemos al director del proyecto el PhD. Jhon Jairo Barona, los codirectores el Ing. Robin Olaya, Ing. Carlos Quiroga y a todas las personas que de algún

modo guiaron el desarrollo de este trabajo, por brindarnos el apoyo y conocimientos necesarios para poder hacer realidad este proyecto.

Jose Miguel Vera & Vanessa Hernández B.

Tabla de contenido

	Pag.
Resumen	I
Agradecimientos	III
TABLA DE CONTENIDO	V
Lista de figuras	VIII
Lista de tablas	X
1. Introducción.....	1
1.1 Problemática	2
1.2 Objetivo General.....	3
1.2.1 Objetivos Específicos	3
1.3 Justificación	4
2. Marco Conceptual	5
3. Marco Teórico	10
3.1 Definición del Modelo de Representación de la Distribución de Salinidad .	10
3.1.1 Polígonos de Thiessen	10
3.1.2 Triangulación de Delaunay	11
3.1.3 Interpolación Ponderada a Distancia Inversa (IDW)	11
3.1.4 Kriging	12
3.2 Definición del Modelo de Salinidad en Función de la Conductividad y Temperatura	12
4. Marco Referencial	14
5. Metodología	18
5.1 Localización	18
5.2 Flujograma metodológico	19
5.3 Posibles modelos de distribución espacial	19
5.4 Definición de los requerimientos	20
5.5 Diseño e implementación del instrumento.....	21

5.5.1	Diseño del instrumento	21
5.5.2	Definición de componentes	22
5.5.3	Implementación del dispositivo	24
5.5.3.1	Programación del instrumento	25
5.5.4	Pruebas de los sensores.....	27
5.5.5	Diseño e implementación del sistema inalámbrico.....	29
5.5.6	Caracterización del sensor de conductividad.....	30
5.6	Construcción del visor web geográfico.....	30
5.6.1	Definición de conexiones inalámbrica	30
5.6.2	Biblioteca Leaflet	31
5.6.3	Diseño	31
5.6.4	Programación del sistema de visualización	31
5.7	Pruebas del sistema de sensado.....	32
5.7.1	Experimentos estáticos	32
5.7.1.1	Prueba del sistema LoRa para determinación parámetros de operación.....	32
5.7.1.2	Pruebas para determinar tiempo de respuesta del sensor de conductividad	33
5.7.1.3	Prueba para calcular la respuesta del sensor de conductividad a diferentes concentraciones de sal disueltas.....	33
5.7.1.4	Prueba para determinar la relación entre la respuesta del sensor y la cantidad de sal disuelta	33
5.7.2	Experimento dinámico	34
6.	Pruebas y resultados	35
6.1	Proyección de modelos de distribución espacial de la salinidad	35
6.2	Pruebas del funcionamiento del instrumento	37
6.3	Pruebas de calibración del sensor de conductividad y caracterización del dispositivo	38
6.3.1	Cálculo de la salinidad a partir de los datos obtenidos por los sensores.....	47
6.4	Diseño final del dispositivo de sensado	50
6.5	Sistema de monitoreo.....	53
6.5.1	Definición de tiempos de observación	53
6.5.2	Visor web.....	53
6.5.2.1	Publicación	58
6.6	Pruebas del sistema.....	58
6.7	Discusión	59
7.	Conclusiones y trabajo futuro	62
7.1	Conclusiones	62

7.2	Trabajo futuro	63
8.	Anexos.....	65
8.1	Anexo 1: Experimentos del sensor.	65
8.2	Anexo 2: Detalles de costo del sistema de monitoreo.....	65
8.3	Anexo 3: Diseño 3D del sensor.	65
8.4	Anexo 4: Código fuente.....	65
8.5	Anexo 5: Diagramas electrónicos	65
9.	Referencias	66

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA	Pag.
5.1 Localización.	18
5.2 Flujograma metodológico.....	19
5.3 Diagrama del instrumento.....	22
5.4 Integración de componentes.....	25
5.5 Algoritmo de captura y envío.....	26
5.6 Algoritmo de recepción y almacenamiento.....	27
5.7 Protocolo de toma de datos.....	28
5.8 Protocolo en el puerto COM.....	29
5.9 Algoritmo de visualización.....	32
6.1 Interpolación por TIN.....	35
6.2 Interpolación por Polígonos de Thiessen.....	36
6.3 interpolación por IDW.....	36
6.4 Interpolación por Kriging.....	37
6.5 Recepción de los datos por el puerto COM.....	38
6.6 Experimentos preliminares-Conductividad vs Tiempo.....	39
6.7 Experimentos preliminares-Temperatura vs Tiempo.....	41
6.8 Experimento de respuesta del sensor.....	42
6.9 Experimento de 0 g a 39 g de sal disuelta en 1 litro de agua por separado.	43
6.10 Datos filtrados por el promedio móvil con n=10.....	44
6.11 Datos con el agua en movimiento.....	46

6.12	Datos estables con el agua en movimiento	47
6.13	Variabilidad de los datos	48
6.14	Gramos de sal disueltos (g) vs Voltaje (V)	50
6.15	Sistemas principales	51
6.16	Diseño final Sistema de monitoreo.....	51
6.17	Modelo del diseño de la cubierta	52
6.18	Vista interna por corte transversal	52
6.19	Encabezado del visor web	54
6.20	Geovisor	54
6.21	Datos históricos y gráficas de la variación de la salinidad y la temperatura en el tiempo	55
6.22	Preguntas frecuentes en el visor web	55
6.23	Modelos de visualización	56
6.24	Visor web adaptado-parte 1.....	57
6.25	Visor web adaptado-parte 2.....	57
6.26	Visor web adaptad-parte 3	58

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA	Pag.
3.1 Coeficientes a_i, b_i y c_i para el cálculo de la salinidad en función del tiempo.	13
5.1 Definición de requerimientos	20
5.2 Definición de componentes	23
6.1 Gramos de sal disuelta en cada experimento	39
6.2 Características de la bomba sumergible	45
6.3 Moda para cada gramo de sal disuelto	49

1. Introducción

La salinidad es cloruro de sodio disuelto en un cuerpo de agua, está en los mares varía dependiendo de la intensidad de la evaporación o con el aporte de los ríos cuando desembocan en el mar, aumentando o disminuyendo en relación con la cantidad de agua, por lo tanto, la salinidad tiene gran importancia a nivel ambiental, porque es uno de los factores determinantes para conocer los organismos que hay en una masa de agua.

Por otro lado, los manglares son zonas de baja elevación de salinidad por la interacción del agua dulce de los ríos y el agua de mar, en un estuario entre mas cerca esta al punto de desembocadura es baja y a medida en que se aleja es mayor, determinando la distribución de la fauna y flora, los principales procesos físico para la comprensión del ecosistema y la preservación son la salinidad, temperatura y nivel del mar.

En la costa Pacífica Colombiana generalmente tiene baja concentración de salinidad por el alto volumen de agua dulce descargada por los ríos del litoral, las selvas de la costa, los manglares y el estancamiento de masas de nubes por la presencia de la cordillera, generando las condiciones para que el municipio de Buenaventura tenga un alto porcentaje de humedad. En este municipio desarrollan programas de restauración de manglares afectados y monitorean las condiciones actuales de estos, estos programas son liderados principalmente por la corporación autónoma regional.

En el proyecto monitoreo de la salinidad mediante instrumentación de bajo costo con herramientas geomáticas, se elaboró una metodología para desarrollar un instrumento de monitoreo georreferenciado de salinidad y temperatura por medio de sensores, proponiendo modelos de interpolación y planteando un modelo óptimo para la visualización de la información por medio de un aplicativo web geográfico donde se evidencia los datos obtenidos por el dispositivo.

1.1 Problemática

La salinidad determina la densidad del agua de mar y gobierna los procesos biológicos, químicos y físicos que definen los tipos y localizaciones de plantas y animales en los ecosistemas estuarios y costeros [Vidal and Murillo, 2017]. Esta variable tiene como característica principal que en medios marinos presenta poca variabilidad espacial; sin embargo, los estuarios tienen variaciones notables y al presentar variaciones extremas ponen en riesgo los diferentes ecosistemas que están en la zona. Los estuarios son esenciales como área de crianza de una gran variedad de peces marinos, además, son ricos en nutrientes debido a los depósitos de sedimentos y los organismos vivos. Estas características permiten que se presente una variedad de hábitats [Vidal and Murillo, 2017].

La condición de la calidad del agua ha sido tradicionalmente evaluada utilizando una serie de indicadores que se relacionan directamente con el estrés de un ecosistema o como un indicador de él. Según [Sun et al., 2019], los estuarios además que proporcionan refugio y protección al ecosistema de fenómenos meteorológicos, también, ayudan en gran medida a disminuir el carbono en la atmosfera. Una de las amenazas principales de los estuarios es el cambio de la calidad del agua y un factor de este cambio se da cuando la salinidad del agua llega a cierto nivel y los estuarios no pueden sobrevivir, por lo tanto, es importante el desarrollo de tecnologías de monitoreo de salinidad.

El cambio de salinidad en la capa superficial del mar en la zona costera del Pacífico colombiano está influenciado por las precipitaciones y por el cambio de intensidad de los aportes de las desembocaduras de los ríos, cuya mezcla con el agua de mar se observa en la superficie donde las oscilaciones son iguales [IDEAM, 1990].

Según el Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras “José Benito Vives de Andréis” (INVEMAR) de los proyectos Red de vigilancia de la calidad de las aguas marinas y costeras de Colombia (REDCAM), junto al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), midieron in situ en las estaciones de la bahía de Buenaventura la salinidad usando equipos portátiles, donde recolectaron muestra de agua utilizando medición de conductividad electrométrica con un electrodo acoplado a una sonda [INVEMAR, 2018].

[Guevara, 2017] realizó cuatro muestreos de salinidad in situ en los meses de abril, junio, septiembre y noviembre del año 2015, en cuatro estaciones ubicadas, dos en la parte interna y dos en la parte externa en las costas norte y sur de la bahía de Buenaventura, basándose en la metodología de [Cogua Romero, 2011] que hizo cinco muestra in situ en la Bahía de Cartagena, Colombia, en los meses de febrero, abril, junio, julio y octubre del 2006 en cinco estaciones, utilizando un multímetro portátil marca Thermo Scientific de alto costo; y [Nebra et al., 2016] muestreo estacionalmente nueve estaciones durante el verano de 2007 hasta la primavera del 2008 en el estuario del Río Ebro, España, con una sonda multiparámetro YSI 556 con un costo aproximado de treinta millones de pesos.

De acuerdo con los autores mencionados anteriormente, que ejecutaron mediciones y captura de datos in situ, con intervalos de tiempo mensuales o anuales y equipos de alto costo y difícil acceso, se recopilaron los aspectos mencionados y surgió la siguiente pregunta ¿Cómo implementar un monitoreo constante de la salinidad superficial de la bahía de Buenaventura y adquirir la información mediante equipos y servicios de bajo costo y fácil acceso?.

1.2 Objetivo General

Suministrar información espacial para el monitoreo de salinidad en la bahía de Buenaventura mediante equipos de bajo costo y fácil acceso de la información.

1.2.1 Objetivos Específicos

- Desarrollar un instrumento de monitoreo georreferenciado de salinidad y temperatura con conectividad a un visor web.
- Elaborar un aplicativo web geográfico para la visualización de la información adquirida por el dispositivo.
- Plantear un modelo de visualización de la salinidad a partir de medidas en diferentes puntos de la zona de estudio.

1.3 Justificación

La salinidad de los océanos no varía significativamente, por su parte la de los ecosistemas estuarinos en las bahías tiene una variación drástica en cada marea del día. Es el caso de la bahía de Buenaventura, que está influenciado por el cambio del caudal en las desembocaduras de los ríos y las precipitaciones en la zona, donde se combina con el agua de mar, esto hace que las oscilaciones de la salinidad en el transcurso del día varié. Esta variable fisicoquímica se caracteriza por su cambio durante las mareas, ya sea en la bahía exterior o interior. Sin embargo, actualmente en Colombia no existe un monitoreo constante de esta variable.

Esa problemática se presenta debido a que en el país no se cuenta con los equipos necesarios para un monitoreo constante, puesto que estos hacen necesario la toma de los datos de manera presencial, generando altos gastos a las entidades que llevan a cabo las expediciones para la captura de información.

Los datos que recolectan las diferentes entidades en Colombia son publicados cada 6 meses, puesto que realizan expediciones tomando muestras que deben procesar para entregar el producto final en la web, o en su defecto se debe realizar una solicitud formal por los mismos, esto hace que sea dispendioso y demorado para las personas y grupos de investigación que los requieran. Adicionalmente, poder evidenciar los cambios de la salinidad y temperatura en la bahía de Buenaventura permite tomar decisiones de rápido impacto para el bienestar de los ecosistemas presentes en la zona y de las comunidades que dependen de la pesca en el lugar.

Con lo anterior las entidades gubernamentales y no gubernamentales como la CVC, INVEMAR, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, además de entidades internacionales como la NASA y la NOAA podrán acceder de manera fácil, vía internet a los datos recopilados por el dispositivo ya que se podrá evidenciar en un visor web.

2. Marco Conceptual

En las aguas de los océanos la más notable característica es el alto contenido de sales disueltas en ellas, esta solución es más conocida como salinidad. Desde una perspectiva biológica y por su influencia sobre la presión osmótica, el equilibrio iónico es de gran importancia para los organismos vivos en sus aspectos fisiológicos, así mismo, lo es desde un plano físico puesto que influye en la circulación vertical y horizontal en la dinámica de las aguas oceánicas. Así, la salinidad es el contenido de sal disuelta en un cuerpo de agua, aunque el término también es válido para referirse al contenido salino en suelos. Esta característica está definida por el contenido de cloruro de sodio (NaCl) tanto en suelos como en el agua [ECURED, 2013].

La salinidad superficial es un parámetro clave para estimar la influencia del clima en los océanos, ya que es determinante para estimar la densidad del agua del océano y, por lo tanto, determina la reaparición de convección de las masas de agua [COPÉRNICO, 2010].

La salinidad práctica, de símbolo S , de una muestra de agua de mar, se define en términos de la razón K de la conductividad eléctrica de una muestra de agua de mar a 15°C y a la presión de una atmósfera normal, para una solución de cloruro de potasio (KCl), en que la fracción de masa de KCl es 0.0324356, a la misma temperatura y presión. El valor de K exactamente igual a uno corresponde, por definición, a una salinidad práctica igual a 35

([INOCAR, 2001]).

La conductividad de agua de mar depende del número de iones disueltos por volumen (salinidad) y la movilidad de los iones (temperatura y presión). Sus unidades son mS/cm (mili-Siemens por centímetro). La conductividad es directamente proporcional al incremento de la salinidad en 0.01 mS/cm, temperatura en 0.01°C y profundidad de 20 m. En la mayoría de aplicaciones oceanográficas el cambio de conductividad es dominado por la temperatura [INOCAR, 2001].

La salinidad es muy importante en los manglares dado a que son lugares de baja elevación donde interactúa el agua dulce con las aguas de mar. Esta interacción está dominada por una serie de factores que ayudan a determinar la distribución de especies de fauna y flora. Para la comprensión del ecosistema y la preservación del medio ambiente es importante conocer los procesos físicos en los que predomina la salinidad [Llicán, 2015].

Los ecosistemas integran las relaciones que mantienen entre sí los seres vivos, así como las relaciones de estos con el ambiente físico en el que habitan, los cuales interactúan entre sí generando flujos de materia y energía. Mantener el equilibrio de los ecosistemas es esencial para preservar el medio ambiente y nuestro planeta. Existen unos factores bióticos que son los que poseen vida, como animales, plantas, hongos o bacterias, y unos factores abióticos, son la materia (nutrientes y elementos químicos), además, los factores físicos como la temperatura, salinidad, humedad y las lluvias [INVEMAR, 2018].

Los ecosistemas acuáticos son donde los animales y las plantas viven o interactúan dentro del agua. Estos incluyen las aguas de los océanos y las aguas continentales dulces o saladas [Penélope, 2011].

Los hábitats en manglares proveen gran variedad de componentes de biodiversidad que son importantes para la función y calidad ambiental de los ecosistemas estuarinos tropicales. La función ecológica dominante de los manglares es el mantenimiento de hábitats costeros, marinos, la provisión de alimento y refugio para una gran variedad de organismos a diferentes niveles tróficos. Además, los manglares juegan un papel importante manteniendo la calidad del agua y la estabilidad de la línea de costa, controlando la distribución de nutrientes y sedimentos en aguas estuarinas [CVC, 2015].

Estos lugares forestados son donde las mareas modulan el intercambio de agua, nutrientes, sedimentos y organismos entre ecosistemas costeros inter-mareales tropicales. También los ríos y sus cuencas bajas vinculan la descarga de sedimentos y nutrientes desde el continente, controlando la productividad y biogeoquímica de estuarios tropicales, acoplándose con ecosistemas vecinos. Las múltiples funciones de los manglares inducen una productividad primaria y producción secundaria

extremadamente alta en costas tropicales [IDEAM, 1990].

Los manglares se dividen en cinco grupos básicos de ambientes costeros, dependiendo de una combinación de energías geológicas, incluyendo la influencia de la precipitación pluvial, descarga de ríos, amplitud de mareas, turbidez y fuerza del oleaje, dichos manglares son: manglar de cuenca, ribereño, de borde, enano y manglar de islotes o hamacas. Estos manglares se encuentran en litorales con influencia de sedimentos terrígenos tales como deltas fluviales, lagunas deltaicas, costeras y estuarios [Yáñez et al., 2001].

Por otra parte, es cada vez más común el monitoreo de variables ambientales a partir de dispositivos electrónicos asociados a sistemas de telecomunicaciones y sistemas de información geográfica y todo apunta al desarrollo de líneas tecnológicas como la de IoT (por sigla en inglés Internet of Things, internet de las cosas) y WSN (por sus siglas en inglés Wireless Sensor Network). Este tipo de dispositivos permite el monitoreo de diversas variables ambientales de forma remota y asociada a la componente espacial, facilitando el entendimiento de procesos naturales de manera menos invasiva y más eficiente.

En este sentido desarrollos o sistemas microcontrolados como el Arduino, que es un proyecto de Open Hardware y Software de la comunidad internacional, en donde diseñan y producen tarjetas de desarrollo que permiten controlar y sensar variables del mundo real a partir de dispositivos análogos y digitales, enfocados en facilitar el uso y programación de sistemas en proyectos multidisciplinarios.

Estos dispositivos permiten la conectividad con tecnologías de Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS), siendo una constelación de satélites con cobertura global y autónoma que permiten la navegación por medio de los mismos, para el posicionamiento geoespacial en cuatro dimensiones, que son: la longitud, latitud, altitud y el tiempo de cualquier punto dado sobre el planeta tierra.

El posicionamiento de este punto con respecto al tiempo se brinda en Tiempo Universal Coordinado (por sus siglas en inglés UTC) que es el principal estándar mundial de medición de esta variable. Este indicador se regula con el Tiempo Medio de Greenwich (por sus siglas en inglés GMT) que tiene de referencia el día solar, así se

le añade o disminuye un segundo cuando es necesario, siempre a finales de junio y diciembre. Lo anterior es necesario puesto que la rotación de la tierra es constante pero no estable por lo tanto tiene un retraso con base en el tiempo astronómico.

Para brindar mayor entendimiento, las otras tres dimensiones que determinan la posición en el globo terráqueo y para ello usan coordenadas geográficas que son un sistema de referencia global de coordenadas angulares, partiendo desde el centro de la tierra donde la latitud (Norte y Sur), longitud (Este y Oeste), Datum, meridiano principal y unidad angular sirven para determinar cualquier lugar en la superficie terrestre.

Por otra parte, el sensor de salinidad mide la concentración de sal en una solución y consiste en un electrodo de salinidad y un amplificador el cual determina la salinidad en base a la conductividad eléctrica, midiendo cómo fluye la cantidad de corriente a través del agua que se ha disuelto, conduciendo mejor la electricidad en agua salada que en agua sin sal disuelta, la salinidad se calcula entonces a partir del valor de conductividad medida.

La salinidad es la medida de todas las sales disueltas en el agua o solución, se expresa a menudo como (ppt). La salinidad media del océano es de 35 ppm y la salinidad de agua de río es de 0,5 ppm o menos. Un sensor de salinidad es un sensor digital que proporciona valores que pueden estar previamente calibrados y este se puede conectar a las interfaces.

Siendo un gran avance la posibilidad de poder guardar los datos que llegan por medio de conexiones inalámbricas, es necesario poder contar con un ordenador o dispositivo informático que está al servicio de otros dispositivos o usuarios llamados clientes quienes suministran la información a estos. Un servidor es capaz de atender las peticiones de un cliente retornándolas con suma congruencia a partir de una página web u otro tipo.

La información que se suministra en el servidor es guardada en una base de datos que es una serie de datos almacenados y organizados de manera sistemática, permitiendo utilizar y ubicar los datos de manera fácil, rápida y segura. Además, puede ser compatible con diferentes softwares para dar uso de los datos brindado información que se pueda visualizar en diferentes plataformas.

Estas plataformas o visualizadores son un Sistema de Información Geográfica (SIG), que es un conjunto que mezcla hardware, software y datos geográficos y los muestra en una representación gráfica. Los SIG están diseñados para capturar, almacenar, manipular, analizar y desplegar la información de todas las formas posibles de manera lógica y coordinada [MinEducación, 2012].

3. Marco Teórico

3.1 Definición del Modelo de Representación de la Distribución de Salinidad

Se adelantó en este proyecto la exploración del modelo de interpolación más adecuado para la definición del modelo de distribución de la salinidad a partir de medidas discretas, determinadas por puntos de medición, a profundidades determinadas, para esto se presenta una revisión inicial de algunos modelos a considerar.

3.1.1 Polígonos de Thiessen

Este modelo representa una manera fácil y eficaz para representar de manera clara la distribución de una variable espacialmente. Estos polígonos son utilizados como método de interpolación simple ya que se construyen geométricamente en un plano bidimensional. Utilizando las mediatrices como aristas de unión entre los polígonos quienes van creando un ambiente alrededor de los puntos de control o estaciones. La regla general de este método establece que los lados generados por los polígonos, deben ser equidistantes a los puntos vecinos y tratan de hallar la menor distancia entre ellos. Cada polígono se encuentra a la misma distancia del otro [Pizarro et al., 2003], dicho modelo se describe en la Ecuación 3.1.

$$Th = \frac{\sum_{i=1}^n Si \cdot Pi}{\sum_{i=1}^n Si} \quad (3.1)$$

Donde Th es el valor medio del área de estudio, Si la superficie del área de influencia y Pi es el valor de la variable en la estación.

3.1.2 Triangulación de Delaunay

Es una red de triángulos que cumple la condición de que la circunferencia circunscrita de cada triángulo de la red no debe contener ningún vértice de otro triángulo. Este modelo maximiza los ángulos interiores de los triángulos de la triangulación. Eso es muy práctico porque al usar la triangulación como modelo tridimensional los errores de redondeo son mínimos. Por eso, en general se usan triangulaciones de Delaunay en aplicaciones gráficas.

La triangulación Delaunay muestra resultados óptimos desde el punto de vista de la interpolación, puesto que la equiangularidad entre los triángulos es bastante precisa para las cuadrículas de métodos en elementos finitos.

"Dado un conjunto de puntos S distintos distribuidos arbitrariamente $\{N_j : (x_j, y_j), j = 1..N\}$ en R^2 . Una Triangulación Delaunay $\mathcal{E}$ de S , es el dual geométrico de la teselación P construida en S . Cada mosaico P_j contiene todos los puntos del plano más cercano al punto generador de mosaico N_j que a otros puntos generadores N_k "

[Correc and Chapuis, 1987].

El modelo descrito por los autores se presenta en la Ecuación 3.2

$$P_j = \{N(x, y) \in R^2; \forall k \neq j \quad d(N, N_j) \leq d(N, N_k)\} \quad (3.2)$$

3.1.3 Interpolación Ponderada a Distancia Inversa (IDW)

En la Ecuación 3.3 se explica el modelo y el método de cómo se puede aproximar el valor de un punto que no se encuentra en la muestra por medio de una ponderación de los valores acotados a una distancia determinada. Es uno de los procedimientos más sencillos y fácil de aplicar teniendo en cuenta las deficiencias que presenta en las

aplicaciones prácticas [Yang, 2010].

$$F(r) = \sum_{i=1}^m w_i z(r_i) = \frac{\sum_{i=1}^m \frac{z(r_i)}{|r-r_i|^p}}{\sum_{i=1}^m \frac{1}{|r-r_i|^p}} \quad (3.3)$$

Donde p es un parámetro normalizado, z cantidad de puntos discretos, r número de regiones en un espacio d-dimensional.

3.1.4 Kriging

Basándose en que la superficie es una relación aleatoria con covariancia espacial el Kriging usa datos suministrados suponiendo que sean estáticos para poder estimar un semivariograma definido. Dichos semivariograma pueden utilizarse proporcionando una nueva selección de funciones teóricas donde los parámetros de estas funciones se ajustan para obtener el mejor resultado del semivariograma. La interpolación se edifica en base a condiciones estadísticas de imparcialidad y mínima varianza. [Yang, 2010] Así, la función de Kriging universal se puede escribir como se evidencia en la Ecuación 3.4.

$$F(r) = T(r) + \sum_{j=1}^N \lambda_j C(r - r_j) \quad (3.4)$$

Donde $T(r)$ representa el componente aleatorio, λ representa los coeficientes monomial en un sistema de ecuaciones, C es la covarianza espacial y r el número de regiones.

3.2 Definición del Modelo de Salinidad en Función de la Conductividad y Temperatura

Para obtener el valor de salinidad se estudió el modelo matemático expuesto en la Ecuación 3.5 por [Morcelle del Valle and Deorsola, 2015] que permite calcular la salinidad en función de la conductividad eléctrica (σ) y la temperatura (T). Determinado por 12 coeficientes discriminados para valores mayores y menores de

50000 μ S/cm (Micro siemens por centimetro), unidad que se encuentra en el sistema internacional de medida.

$$Sa(\sigma, T) = (a_0 + a_1T + a_2T^2 + a_3T^3)\sigma + (b_0 + b_1T + b_2T^2 + b_3T^3)\sigma^2 + (c_0 + c_1T + c_2T^2 + c_3T^3)\sigma \quad (3.5)$$

Donde, los coeficientes son expuestos en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1: Coeficientes a_i, b_i y c_i para el cálculo de la salinidad en función del tiempo.

		0	1	2	3
$\sigma < 50000 \mu\text{S/cm}$	a	9.935	-3.116	6.493	-6.678
	b	5.945	-1.110	-2.291	3.244
	c	-2.346	-1.387	9.141	-1.589
$\sigma > 50000 \mu\text{S/cm}$	a	1.224	-3.374	5.166	-3.353
	b	-2.44	1.404	3.273	3.405
	c	5.245	-3.613	1.055	-1.214

4. Marco Referencial

El efecto del aumento del nivel del mar (Sea Level Rise y su sigla en ingles SLR), sobre la intrusión de agua de mar (Sea Water Intrusion y su sigla en ingles SWI) e inundación de la superficie de la tierra (sigla en ingles LSI) en acuíferos, según [Ketabchi et al., 2016] utiliza ambos enfoques para predecir el SWI. Se debe tener en cuenta que numerosos parámetros que incluyen las tasas de entrada, los contrastes de K , el espesor de las capas, la dispersión y la geometría de los acuíferos podrían tener un impacto en el SWI en los acuíferos en capas, al hacer un análisis de sensibilidad para explorar el efecto de los parámetros, la importancia de la fuga en la cantidad de intrusión para el problema del SLR y probando la capacidad de modelo de interfaz aguda cuando la fuga tiene un papel en la intrusión. En la interfaz el agua dulce y el agua salada se consideraron inmiscibles, y acoplaron los flujos de ambas aguas en función de la continuidad del flujo y la presión en la interfaz. En este caso, el agua salada llena la parte insaturada del acuífero conduciendo al incremento de la transitividad. El otro lado, debido al flujo constante de agua dulce, aumenta la altura de esta, pero el exceso de agua dulce se desplaza a la parte superior insaturada del acuífero y el nivel freático aumenta. En el estudio hicieron una investigación sobre el aumento del nivel del mar en un acuífero estratificado, el aumento instantáneo y gradual del nivel del mar, sobre la intrusión de agua de mar lo simulan mediante el uso de modelos dispersos y de interfaz aguada.

El desarrollo de un sensor de salinidad según [Sun et al., 2019] se basó en fibra Bragg (FBG), para la detección de salinidad y garantizar la resistencia del sensor se recubrieron las FBG con polimida (PI), este material es resistente a altas y bajas temperaturas y es muy estable química y mecánicamente. El sensor consta de dos FBGs en una sola fibra, uno con el recubrimiento (FBG1) y el otro sin él (FBG2). El FBG1 se usa para controlar la salinidad y el otro la temperatura. Para utilizar el sensor es necesario ponerlo en un capsula protegiendo el sensor de daños causados por el exterior, esta capsula está compuesta de una varilla de vidrio, malla de acero inoxidable y poliimida. Después de la construcción del sensor se conecta a un demodulador para obtener los datos en tiempo real y le realizan pruebas de viabilidad en soluciones salinas. Para ello utilizaron seis vasos con diferentes concentraciones de salinidad en una incubadora con

temperatura controlada, se procedió a poner el sensor en cada solución salina en el orden de la concentración de salinidad de baja a alta por 24 horas y los datos fueron registrados cada 30 minutos. Luego hicieron pruebas de viabilidad con grava de un acuífero, en estas pruebas los vasos contienen grava lavada que se salaron con diferentes salinidades, estas fueron puestas en la incubadora, finalmente en las muestras se puso el sensor y al mismo tiempo la salinidad, la temperatura se midieron con un salinómetro eléctrico, teniendo los valores del salinómetro eléctrico como reales y los medidos por el sensor se comparan con estos. Finalmente, verificando los resultados concluyen que tiene buena repetividad de la prueba FBG1 en la toma de salinidad, y las respuestas de temperatura del FBG2 en aire y solución salina son consistentes, las curvas de calibración de temperatura coinciden.

Por otro lado, se encuentra el proyecto que realizan [Balbin et al., 2017], donde hicieron un sensor de salinidad y temperatura para el monitoreo de manglares, con un sistema para abrir compuertas de reservorios automáticamente. El desarrollo del sensor se basó en el concepto de transductor que usa el método de inducción, este sensor de bajo costo está compuesto de dos bobinas en forma de toroide y solenoide, la primera bobina es alimentada por 4.6 voltios y genera un campo magnético en medio, que es detectado por la segunda bobina, el valor de la corriente está relacionado directamente con la conductividad del agua, la idea es suministrar una señal sinusoidal con frecuencias conocidas. Para el monitoreo de salinidad se usa una frecuencia de 450 KHz, ya que esta es la frecuencia mínima dada por un experimento, además cuanto más baja es la frecuencia menor es el costo. La configuración del sensor se conectó al microcontrolador Arduino para el procesamiento de datos, se transmitirá a través de Zigbee. Otro módulo Zigbee se utilizó como receptor conectándolo a la estación de trabajo en este caso un computador portátil, que permitía el registro y almacenamiento de los datos. El cálculo para el nivel de salinidad realizó una regresión polinomial. Finalmente, para el análisis de los datos concluyeron que el sensor creado no tiene una diferencia significativa con los datos tomados con el refractómetro comercial, es decir que las lecturas de salinidad están correlacionadas para ambos sensores. El coeficiente de correlación calculado por regresión lineal prueba que la temperatura tiene un efecto significativo en el nivel de la salinidad del agua, cuanto más alta es la temperatura, más bajo es el nivel de salinidad y viceversa.

Para evaluar la salinización en la costa occidental de Corea del Sur [Park et al.,

2005] realizaron una encuesta hidrogeoquímica entre los años del 2000 y 2001, esta consiste en una análisis de iones disueltos en agua y los procesos de interacción agua-sólido de las aguas subterráneas y superficiales. Además, ejecutaron un muestro de la zona de estudio determinado por el tipo de época, ya sea seca o húmeda. Para el estudio hidroquímico realizaron 356 pozos a 10 km de la costa donde utilizaron muestras tomadas en el lugar para determinar el pH y la salinidad del agua, estas muestras las realizaron con equipos portátiles y con ayuda de envases de polietileno las transportaron al laboratorio. Los autores realizaron un mapeo con las muestras obtenidas donde dibujaron curvas de probabilidad acumulativa de concentraciones de Cl y NO₂ de las variables en estudio agrupándolas en 4 tipos, evidenciando el aumento de partículas disueltas y determinando los diversos procesos que influyen en la mezcla de agua de mar y aguas subterráneas en la costa.

Existen diversas formas para el monitoreo de variables fisicoquímicas en el mar, es tal el caso de [Cortese et al., 2015] quienes realizaron un monitoreo de agua de mar mediante equipos inalámbricos utilizando diez boyas a la deriva que contenían sensores de temperatura, salinidad, conductividad y pH, un sistema de comunicación, receptor GNSS para seguir la ruta de las boyas y un sistema de baterías y dos boyas amarradas que servían de repetidores de la señal de radio, utilizando estas ondas para la comunicación y transporte de los datos al servidor en tierra. Además, con un sistema doble de comunicación (GSM/GPRS y RF) resolvieron los limitantes de distancia puesto que la prioridad de la conexión era mediante red celular, pero en el caso de que esta no fuera posible porque la boya supera la distancia para que se establezca la conexión se activaba un paquete de radio RF que se conecta directamente a la estación en tierra o mediante las boyas repetidoras.

Por otra parte, [Laun and Pittman, 2018] diseña y fabrica una boya para el monitoreo oceánico persistente donde realiza diferentes pruebas que determinan el uso de PVC para la construcción de la boya, la impermeabilidad de la boya, el sistema basado en ARDUINO y el almacenamiento de energía solar por medio de sensores de línea base para realizar pruebas en un ambiente controlado (laboratorio). Dicha boya adquiere datos analógicos o digitales de los sensores incorporados donde se analizan y formatean los paquetes de datos que posteriormente se transmiten de manera periódica determinando los intervalos de tiempo previamente. Lo anterior es posible por la adaptabilidad del ARDUINO que utiliza múltiples bibliotecas de códigos

abiertos para recibir datos en serie del sensor.

Tambien, [Morcelle del Valle and Deorsola, 2015] desarrollan un modelo matemático que permite calcular la salinidad en función de la conductividad y la temperatura. Enfatizan en que la determinación del modelo no tiene en cuenta el contenido de solidos disueltos (TDS) ya que estas partículas, aunque estén cargadas positivamente o negativamente no conducen la corriente eléctrica, además el modelo a determinar tiene como objetivo poder ser utilizado de manera práctica en campo, por lo tanto, debe ser un modelo simple y poco complejo. El modelo es elaborado en base a datos proporcionado por la firma italiana CARLO EBRA, quienes exponen datos de conductividad a diferentes temperaturas y múltiples tipos de concentraciones de NaCl. Inicialmente los autores desarrollaron un modelo teniendo la temperatura constante dando como resultado una aproximación al modelo final. El modelo final es una ecuación polinómica cúbica sin términos independientes, contemplando la variación de 12 coeficientes con la temperatura, dichos coeficientes se calcularon utilizando aproximaciones de polinomios cúbicos. Los autores expresan que para valores de conductividad menores a $50000 \mu\text{S}/\text{cm}$ se debe utilizar diferentes valores que para datos de conductividad mayores a $50000 \mu\text{S}/\text{cm}$. Error máximo del modelo es de 4.5 % para temperaturas entre 0° y 30°C .

5. Metodología

5.1 Localización

La zona de estudio de este proyecto es el municipio de Buenaventura, ubicada al sur del departamento del Valle del Cauca, las coordenadas de localización son $3^{\circ} 52' 38''$ N $77^{\circ} 01' 36''$ W, al Norte limita con el departamento del Choco, al sur el departamento del Cauca, al Este con los municipios Calima, Dagua, Cali y Jamundí y al oeste con el océano Pacífico. El desarrollo del proyecto se llevará a cabo en el estuario de este municipio (Figura 5.1).



Figura 5.1: Localización.

5.2 Flujograma metodológico

A continuación, en la Figura 5.3 se evidencia el diagrama metodológico que se empleara para resolver este proyecto.

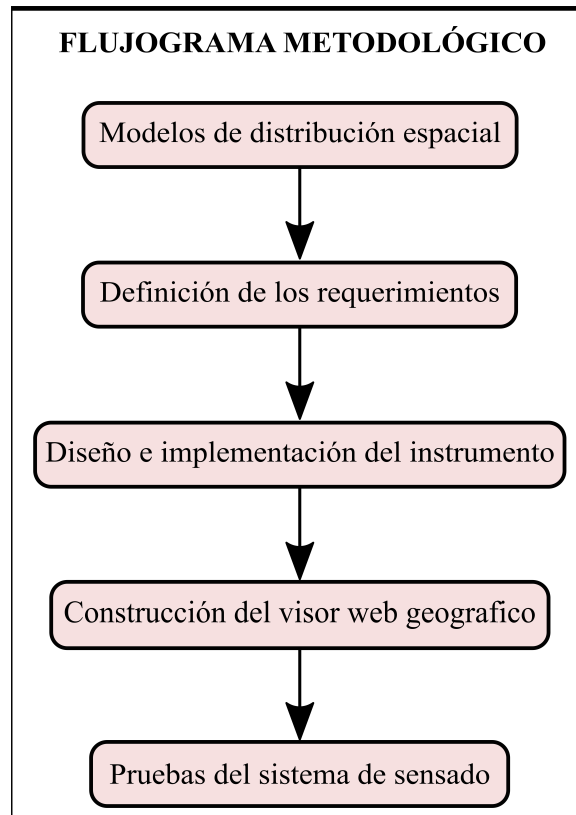


Figura 5.2: Flujograma metodológico.

5.3 Posibles modelos de distribución espacial

Se realizó la evaluación de diferentes métodos de distribución espacial que permiten una representación óptima de la variable de ambiental, los modelos estudiados son polígonos de Thiessen, triangulación de Delaunay, Interpolación Ponderada a Distancia Inversa (IDW) y Kriging.

5.4 Definición de los requerimientos

Se describe los requisitos necesarios para elaborar el dispositivo como se describe en la Tabla 5.1, en el cual analizan las necesidades, se define los elementos y funciones a tener en cuenta para el desarrollo y elaboración del dispositivo de sensado.

DEFINICIÓN DE LOS REQUERIMIENTOS			
Requerimientos		Especificaciones Técnicas	Características Mínimas
R1	Salinidad	La salinidad en el mar según la investigación realizada varia entre 20g/L a 50g/L.	Modulo o sensor que permita medir la salinidad de 20g/L a 40g/L.
R2	Temperatura	La temperatura en el mar según la literatura consultada varia entre los -2°C a 35°C.	Sensor o modulo con el que se pueda conocer la temperatura en el mar en un rango de 0°C a 32°C.
R3	Posición	Debido a que el dispositivo se encuentra en el mar y este mantiene en constante movimiento la posición adecuada debe ser de 4 m de precisión.	Modulo GPS que permita la localización con una precisión mínima de 4m.
R4	Comunicaciones	Como el dispositivo se va a ubicar en el mar debe enviar los datos recopilados de manera inalámbrica. También se debe tener en cuenta que la distancia a estudiar en la bahía es máximo 5 Km.	Sistema de comunicaciones inalámbrico que permita el envío de la información de 3 Km a 5 Km de la base receptora.
R5	Energía	Dado a que el dispositivo debe tomar información varias veces al día, este debe estar encendido continuamente.	Sistema de energía que permita una autonomía de 24 horas antes de una recarga de energía por medio de un panel solar.
R6	Base de datos	Creación y actualización de una base de datos con información geográfica para su visualización.	Sistema de gestión de base de datos que permite almacenar y actualizar información geográfica..
R7	Pagina web y Servidor	Elaboración de una página web que permita alojarse en un servidor.	Elaboración de una pagina web alojada en un servidor gratuito con comunicación y manipulación de bases de datos geográficas.

Tabla 5.1: Definición de requerimientos

5.5 Diseño e implementación del instrumento

En esta sección se explicara todo lo relacionado con el instrumento de sensado, que componentes tiene, cuál es su diseño y cómo se integran entre si.

5.5.1 Diseño del instrumento

En el diseño del sistema de monitoreo contiene tres dispositivos que se enseñan en la Figura (5.3), estos son:

- Dispositivo de Captura de Datos: Este dispositivo se encarga de la medición de las variables ambientales salinidad y temperatura, esta compuesto por 4 Subsistemas; el subsistema de sensado, el subsistema de microprocesamiento, el subsistema de comunicaciones y el subsistema de energía.
- Dispositivo de Recepción de Datos: En la recepción de los datos cuenta con tres subsistemas, el subsistema de microprocesamiento, subsistema de almacenamiento y el subsistema de comunicaciones.
- Visualización de la Información: Para la visualización se tienen dos subsistemas que son el subsistema de almacenamiento y el subsistema de visualización.

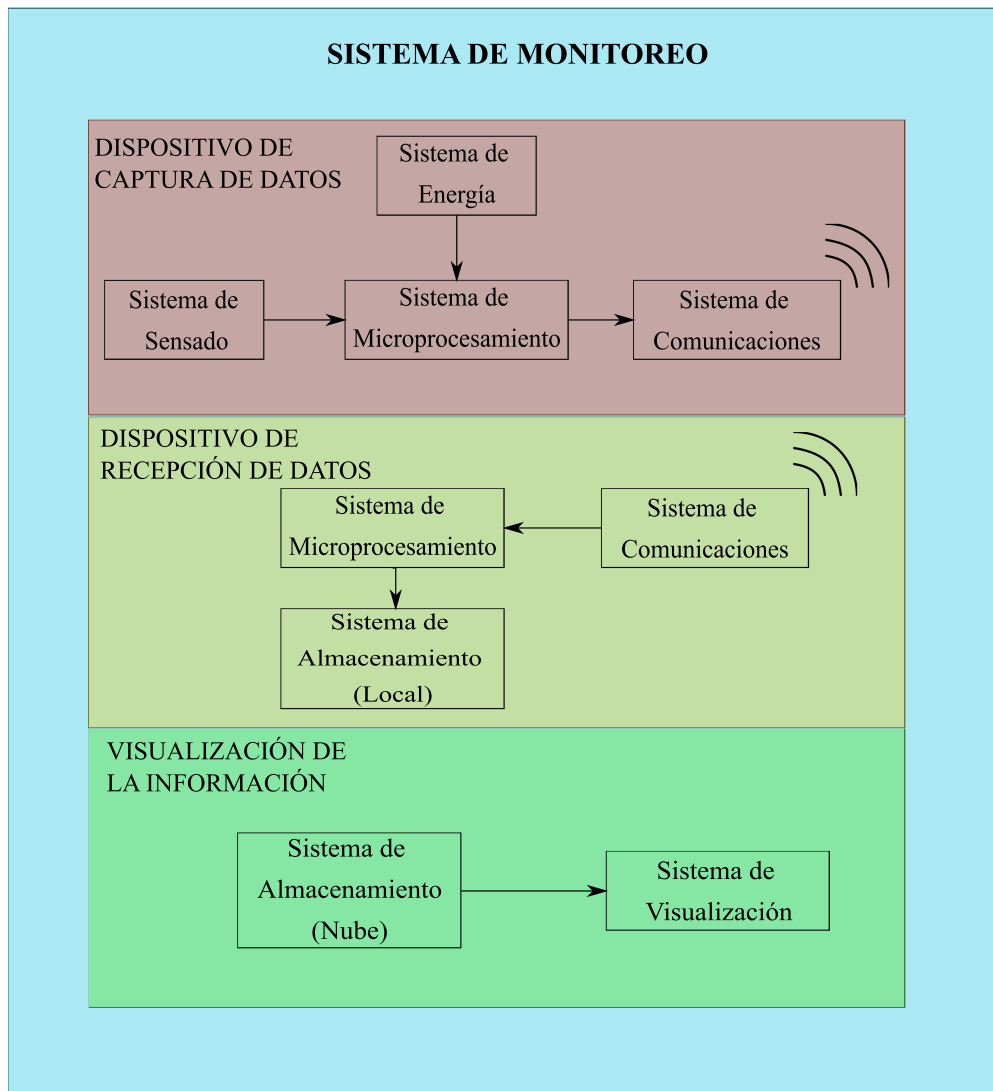


Figura 5.3: Diagrama del instrumento.

5.5.2 Definición de componentes

Teniendo en cuenta la disponibilidad, el costo y las características necesarias de los componentes para este proyecto, en la Tabla 5.2 se definieron cada uno de ellos.

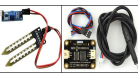
COMPONENTES DEL DISPOSITIVO		
Aduino UNO		Es una placa basada en el microcontrolador ATmega328P. Tiene 14 pines de entrada/salida digital (de los cuales 6 pueden ser usando con PWM), 6 entradas analógicas, un cristal de 16MHz, conexión USB, conector jack de alimentación, terminales para conexión ICSP y un botón de reinicio. Tiene toda la electrónica necesaria para que el microcontrolador opere, simplemente hay que conectarlo a la energía por el puerto USB o con un transformador AC-DC [Arduino, 2022]. Es necesario para procesar los la info de los requerimientos.
Sensor de Temperatura DS18B20		El termómetro digital DS18B20 proporciona lecturas de temperatura de 9 a 12 bits (configurables) que indica la temperatura del dispositivo. La información se envía a través de una interfaz de 1 cable, de modo que solo un cable (y tierra) necesita estar conectado desde un microprocesador central a un DS18B20. Para poder leer, escribir y realizar conversiones de temperatura se puede derivar de la línea de datos en sí, sin necesidad de una fuente de alimentación externa [Naylamp, 2022b]. Cumple con el requerimiento 2 de la Tabla 6.1.
Sensor de conductividad FC-28 / TDS		El sensor de humedad del suelo FC-28 y TDS es un instrumento simple para medir la humedad. El sensor es bastante sencillo de usar. Las dos almohadillas expuestas del sensor TDS, funcionan como sondas para el sensor, actuando juntas como una resistencia variable y el acondicionador de señal del sensor FC-28 recibe y lo pasa al arduino. Cuanta más agua haya en la superficie, mejor será la conductividad entre las almohadillas y dará como resultado una menor resistencia. Para que el sensor de humedad FC28 funcione, todo lo que necesita es conectar los pines VCC y GND a su dispositivo basado en microcontrolador y recibirá una señal que dependerá de la cantidad de agua en el suelo [Naylamp, 2022a]. Cumple con el requerimiento 1 de la Tabla 6.1.
Sensor GPS G28UFTTL		El módulo G28UFTT utiliza un chip de posicionamiento, que es capaz de recibir señales de satélite en 56 canales de bajo consumo de energía. Es de alta sensibilidad ya que puede estar en la ciudad, en un cañón elevado, por debajo de la señal débil y en cualquier lugar dentro del automóvil puesto que puede ser rápido y de un posicionamiento preciso. La fabricación del módulo puede ser ampliamente utilizada en la supervisión de vehículos, estaciones de autobuses, navegación de automóviles, navegación de barcos, navegación de portátiles y otros productos [Inalambricas, 2021]. Cumple con el requerimiento 3 de la Tabla 6.1.
LORA Ra-02		El LoRa es tecnología inalámbrica, esta usa un tipo de modulación de radiofrecuencia patentada por Semtech. Esta tecnología es empleada para comunicaciones militares y espaciales. Algunas de las ventajas de los transceptores LoRa son: - Buena tolerancia a interferencias. - Alta sensibilidad para recibir datos. - Bajo consumo de energía. - Largo alcance (10 a 20 km). - Conexiones punto a punto. LoRa es una tecnología ideal para conexiones a grandes distancias y para redes de IoT en las que se necesiten sensores que no dispongan de corriente de red. LoRaWAN es el protocolo de red que usa LoRa, en redes de amplias áreas, LPWAN (Low Power Wide Area Network) es empleado para comunicar y administrar estos dispositivos, este protocolo se compone de gateway (antenas) y nodos (dispositivos) [Sensors, 2022]. Cumple con el requerimiento 4 de la Tabla 6.1.
Cargador UPS		El cargador UPS con salida ajustable es un módulo cargador de baterías Litio 18650. Con conector micro USB [Electrónica, 2022]. Cumple con el requerimiento 5 de la Tabla 6.1.
Panel Solar		Un panel solar es un módulo que utiliza la energía proveniente del sol para transformarla en energía eléctrica. Estos dispositivos están compuestos por celdas solares hechas de silicio cristalino, el cual tiene la propiedad de convertir la luz del sol en electricidad [Definición, 2022]. Cumple con el requerimiento 5 de la Tabla 6.1.
Baterías de Iones de Litio recargables		Es una batería recargable de iones de litio, también denominada batería Li-Ion (la abreviatura es Litio y Iones), de modelo 18650 que denota las dimensiones de la batería, el primer número se refiere al diámetro de la batería que es de 18mm y el número 65 indica la longitud que tiene la batería que es 65mm. Este tipo de baterías tiene una forma cilíndrica parecida a las pilas AA, pero con tamaño más grande, mayor capacidad y durabilidad. Esta batería tiene gran eficiencia y calidad, puede proporcionar un voltaje nominal de 3.7V DC y capacidad de almacenamiento de 2200mAh. La batería 18650 tiene un encapsulado metálico para mayor seguridad y elemento activo de iones de litio [Electronics, 2022]. Cumple con el requerimiento 5 de la Tabla 6.1.

Tabla 5.2: Definición de componentes

5.5.3 Implementación del dispositivo

En la Figura 5.4 se evidencia cada uno de los componentes que contiene los dispositivos que conforman el sistema de monitoreo.

- Dispositivo de Captura de Datos: En este dispositivo se encuentra 4 sistemas:
 - El sistema de sensado se conforma por un sensor de temperatura, sensor de conductividad y un gps.
 - El sistema de microprocesado contiene un arduino uno.
 - Sistema de energía se compone por un panel solar, un cargador ups y dos baterías de litio recargables.
 - Sistema de comunicaciones contiene un transceptor LoRa con tecnología inalámbrica el cual es el encargado de enviar los datos cumpliendo la función de un nodo.
- Dispositivo de Recepción de Datos: Este dispositivo contiene 3 sistemas:
 - Sistema de comunicaciones contiene un transceptor LoRa con tecnología inalámbrica el cual es el encargado de recibir los datos cumpliendo la función de gateway.
 - Sistema de microprocesamiento se compone de un arduino uno
 - Sistema de almacenamiento contiene una computadora que recopila la información.
- Visualización de la Información: Para la visualización se compone de 2 sistemas.
 - Sistema de almacenamiento esta conformado por la base de datos que se encuentra cargada en un servidor.
 - Sistema de visualización en este se encuentra el visor web donde se puede consultar la información de forma remota.

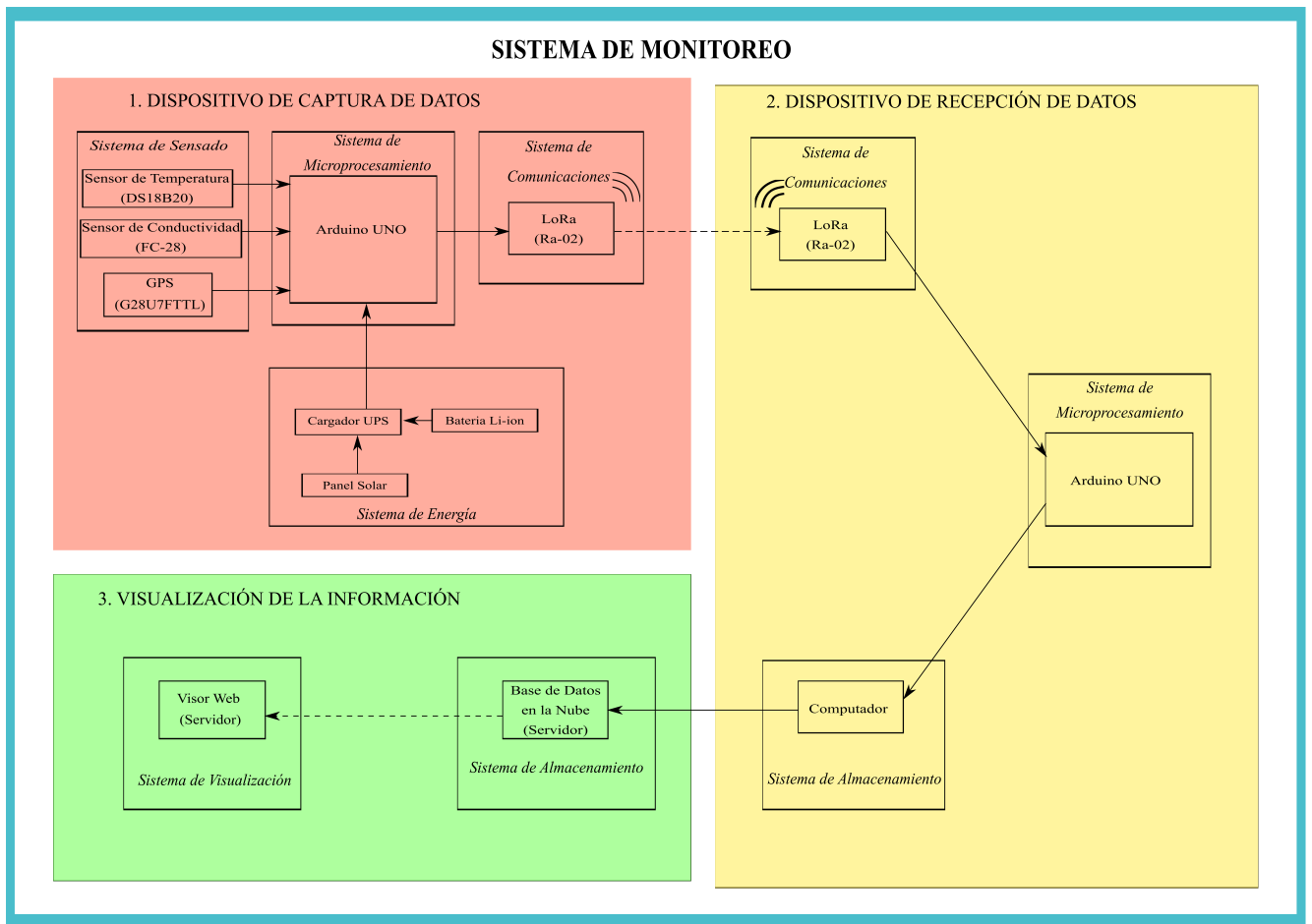


Figura 5.4: Integración de componentes

5.5.3.1 Programación del instrumento

La programación para la captura de la información instalada en el dispositivo emisor se hizo en base a las 2 funciones principales de Arduino. En el void setup se establecieron las comunicaciones, además de las configuraciones iniciales del GPS y el LoRa, también se determinó la velocidad de comunicación establecido en 9600 baudios. Posteriormente, en la función void loop se determina el bucle infinito que se va a ejecutar en la tarjeta, donde se determina el orden de apertura e inicialización de los sensores, como el orden y envío de la información por medio de la tecnología LoRa como se puede ver en la Figura 5.5.

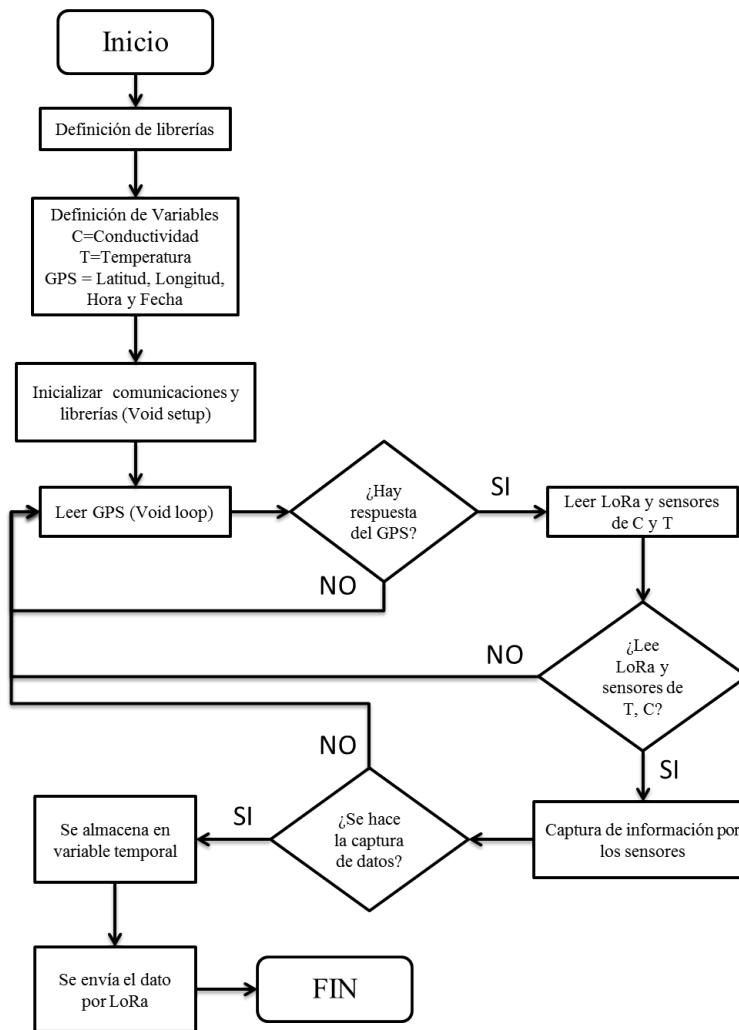


Figura 5.5: Algoritmo de captura y envío

Para la programación de la recepción y almacenamiento del dato se utilizó el lenguaje de programación python, donde se construyó un ciclo que permite la captura, transformación, almacenamiento y actualización de la información en la base de datos y que es enviada por el dispositivo emisor. En la Figura 5.6 se puede observar el algoritmo empleado para lo descrito anteriormente.

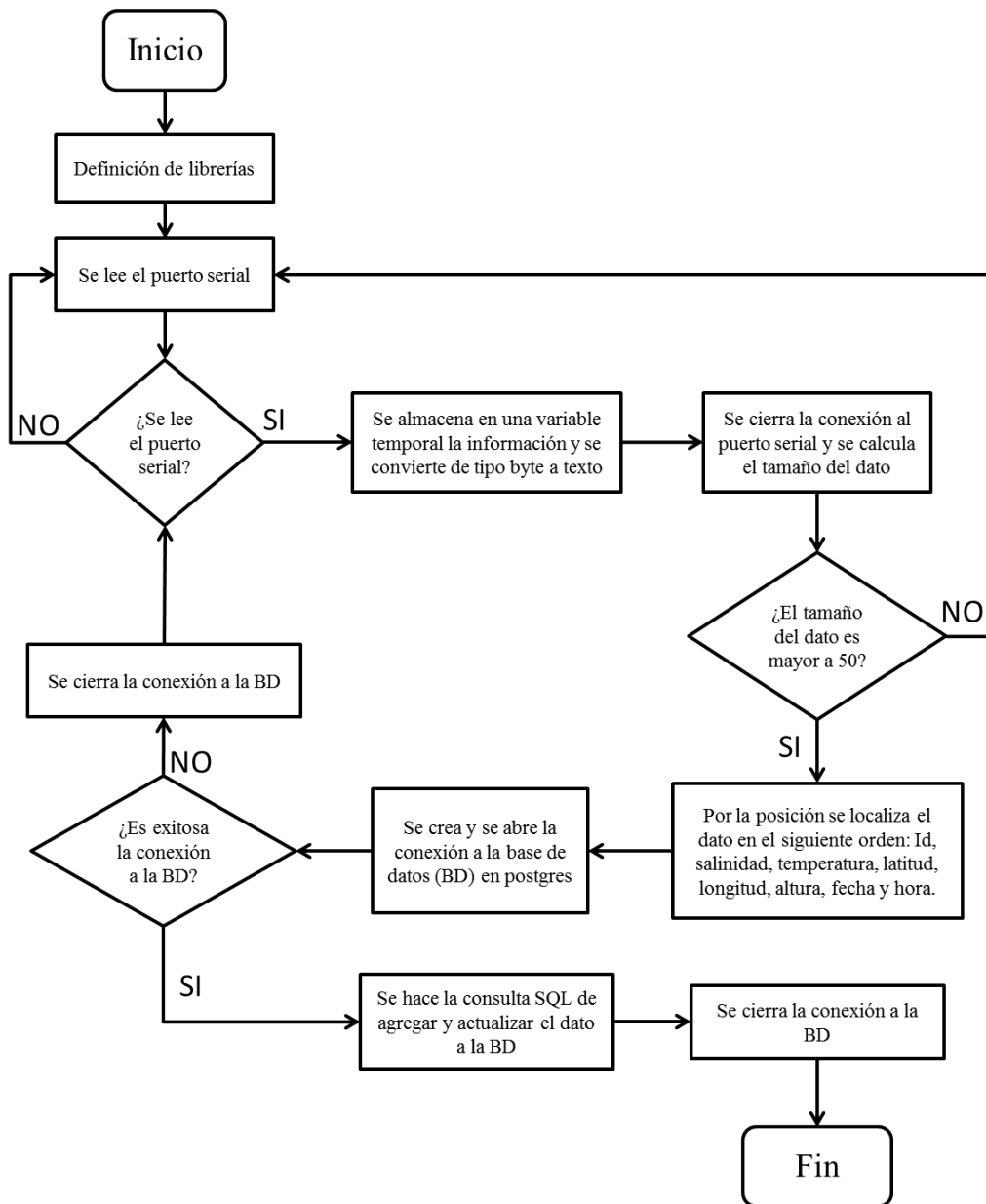


Figura 5.6: Algoritmo de recepción y almacenamiento

5.5.4 Pruebas de los sensores

Para verificar la conexión de los sensores con el microcontrolador, se estableció la toma de los datos con la siguiente nomenclatura.

- Sensor de Posicionamiento GPS.
 - Año (yyyy)
 - Mes (MM)
 - Día (dd)
 - Hora (hh)
 - Minuto (mm)
 - Segundo (ss)
 - Latitud (Lat)
 - Longitud (Lon)
 - Altitud (Alt)
- Sensor de Temperatura.
 - Temperatura en °C (T)
- Sensor de Conductividad
 - Conductividad en Diferencia de Voltaje (C)

Con lo anterior, se determinó la estructura de la captura de la información de los sensores y se muestra en la Figura 5.7.

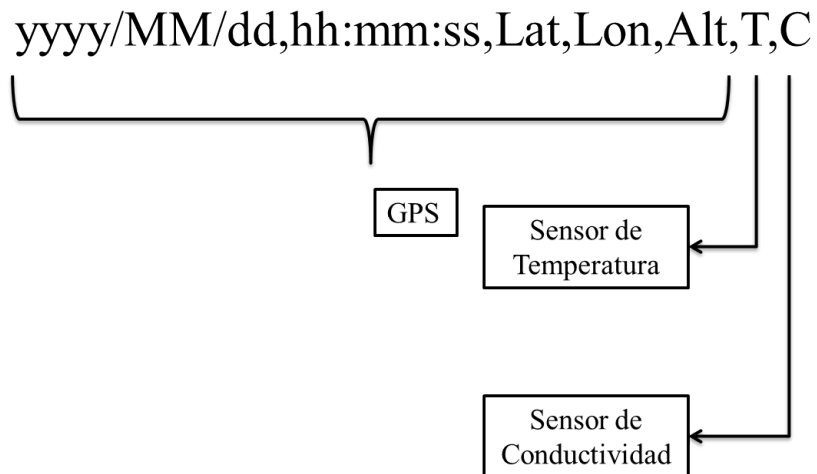
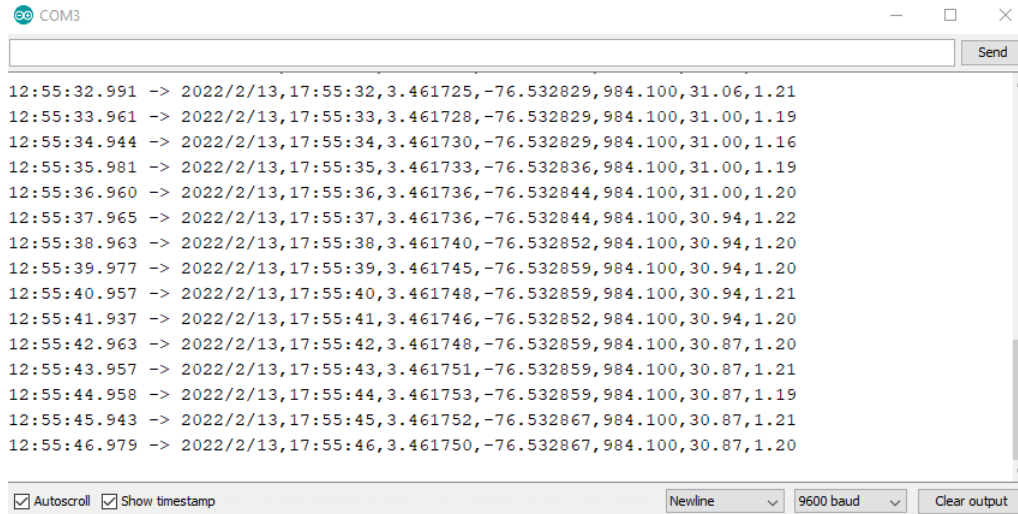


Figura 5.7: Protocolo de toma de datos

A continuación, se observa el protocolo de toma de datos en el puerto COM del Software de Arduino, como se muestra en la Figura 5.8.



```
12:55:32.991 -> 2022/2/13,17:55:32,3.461725,-76.532829,984.100,31.06,1.21
12:55:33.961 -> 2022/2/13,17:55:33,3.461728,-76.532829,984.100,31.00,1.19
12:55:34.944 -> 2022/2/13,17:55:34,3.461730,-76.532829,984.100,31.00,1.16
12:55:35.981 -> 2022/2/13,17:55:35,3.461733,-76.532836,984.100,31.00,1.19
12:55:36.960 -> 2022/2/13,17:55:36,3.461736,-76.532844,984.100,31.00,1.20
12:55:37.965 -> 2022/2/13,17:55:37,3.461736,-76.532844,984.100,30.94,1.22
12:55:38.963 -> 2022/2/13,17:55:38,3.461740,-76.532852,984.100,30.94,1.20
12:55:39.977 -> 2022/2/13,17:55:39,3.461745,-76.532859,984.100,30.94,1.20
12:55:40.957 -> 2022/2/13,17:55:40,3.461748,-76.532859,984.100,30.94,1.21
12:55:41.937 -> 2022/2/13,17:55:41,3.461746,-76.532852,984.100,30.94,1.20
12:55:42.963 -> 2022/2/13,17:55:42,3.461748,-76.532859,984.100,30.87,1.20
12:55:43.957 -> 2022/2/13,17:55:43,3.461751,-76.532859,984.100,30.87,1.21
12:55:44.958 -> 2022/2/13,17:55:44,3.461753,-76.532859,984.100,30.87,1.19
12:55:45.943 -> 2022/2/13,17:55:45,3.461752,-76.532867,984.100,30.87,1.21
12:55:46.979 -> 2022/2/13,17:55:46,3.461750,-76.532867,984.100,30.87,1.20
```

Figura 5.8: Protocolo en el puerto COM

5.5.5 Diseño e implementación del sistema inalámbrico

Se determinan el protocolo de red para el envío y captura de la información mediante un transceptor LORA, es tecnología inalámbrica que emplea una modulación por radiofrecuencia, esta tecnología tiene alta tolerancia a las interferencias, bajo consumo de batería (4.2 mA), cuentan con el módem de largo alcance LoRaTM que proporciona una comunicación de espectro extendido de gama ultra larga y con un rango de frecuencia entre los 420 - 450 MHz.

El transceptor LoRa tiene un protocolo denominado LoRaWAN, se usa para redes de baja potencia y áreas amplias, este protocolo se compone de gateway y nodos los cuales se describirán a continuación [Sensors, 2022].

- Gateway (antena): Es el que recibe y envía información a los nodos.
- Nodo (dispositivo): Son los dispositivos finales que envían y reciben información al gateway.

Para el caso de este desarrollo del sistema de monitoreo el dispositivo de captura de datos es el nodo y el dispositivo de recepción de datos funciona como gateway.

5.5.6 Caracterización del sensor de conductividad

Se realizaron diferentes pruebas para determinar la sensibilidad y precisión del sensor de conductividad en términos de salinidad se debe tener en cuenta que la unidad de medida a emplearse es gramo por litro (g/L).

5.6 Construcción del visor web geográfico

Inicialmente se definieron los requerimientos del visor web, donde se diseñaron los bosquejos finales del producto, tal como se quería transmitir al usuario, las conexiones entre las diferentes plataforma a utilizar y los lenguajes de programación a implementar.

5.6.1 Definición de conexiones inalámbrica

Se determinó que los datos suministrados por el dispositivo se almacenarían a una base de datos ubicados en el software PostgreSQL, siendo esta una herramienta de código abierto que permite la administración de bases de datos y el manejo de información espacial.

Este almacenamiento es posible ya que desde el lenguaje de programación Python por medio de la plataforma Anaconda se adquieren los datos y el uso de la librería psycopg2 se pueden realizar consultas SQL desde Python, almacenando dichas consultas en una base de datos alojada en PostgreSQL, cumpliendo con el requerimiento R6 de la Tabla 5.1.

Posteriormente se define que la base de datos se conecta con Geoserver, este es un servidor de código abierto que permite compartir y editar datos espaciales, tales como los suministrados por el sensor. Desde el servidor Geoserver es posible llamar la base de datos como un Web Map Service (WMS) en el que se podrá visualizar desde cualquier mapa en la web.

Otro aspecto a tener en cuenta sería el alojamiento del visor web, es decir, definir el servidor gratuito donde se tiene alojada y se guardan los cambios realizados durante todo el proceso. Por tal motivo se decidió alojar en el servidor Heroku, este es usado para alojar proyectos utilizando el sistema de control de versiones .Git, además dichas actualizaciones de versiones se pueden hacer de manera local para subirlas a la red, cumpliendo con el requerimiento R7 (Tabla 5.1).

5.6.2 Biblioteca Leaflet

La construcción del visor web fue posible desde el plugin qgis2web instalándolo en el sistema de información geográfica de software libre QGIS, donde se definieron los mapas bases en el visor y la capa WMS de la Corporación Autónoma de Regional del Valle del Cauca. Lo anterior es posible con el uso de la biblioteca JavaScript de código abierto Leaflet, que es utilizada para la creación de aplicaciones de mapeo web y móvil. De esta manera se exporta desde QGIS los archivos que contienen todo lo necesario para la visualización del mapa web.

5.6.3 Diseño

Para la construcción final del visor se definió un aspecto a tener en cuenta. Lo principal en el diseño del visor web debe ser Responsive, esto hace referencia a que se adapta a cualquier pantalla de un PC, celular, Tablet o de televisor, esto con el fin de no limitar el uso del visor y de que fuese más rápida la creación de la aplicación móvil. Por tal razón se utilizó la librería Bootstrap3 permitiendo que el desarrollo web sea receptivo en proyectos móviles y en la web, además es de código abierto y está alojado en GitHub.

5.6.4 Programación del sistema de visualización

En la Figura 5.9 se muestra el algoritmo empleado para la visualización en el visor web, donde fue necesario construir la conexión a la base de datos por medio del lenguaje de programación PHP, además por el mismo medio se realiza la consulta SQL a la base de datos la cual, arroja un dato JSON, el que contiene información espacial para poder

ser representado en el mapa. Finalmente, utilizando los lenguajes de programación JavaScript y HTML se configura y se adiciona el dato al visor web.

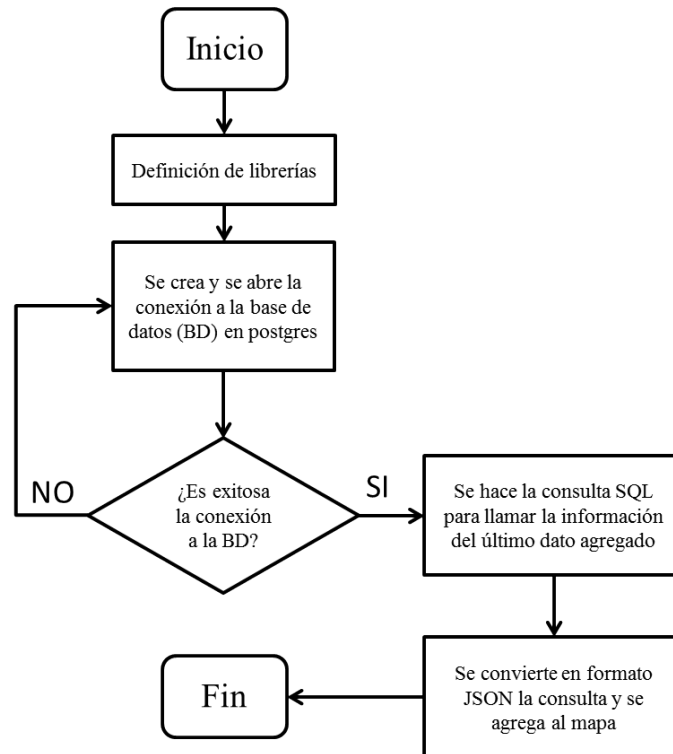


Figura 5.9: Algoritmo de visualización

5.7 Pruebas del sistema de sensado

A continuación se describen los experimentos definidos para el instrumentos teniendo en cuenta la incorporación del sistema de comunicación LoRa.

5.7.1 Experimentos estáticos

5.7.1.1 Prueba del sistema LoRa para determinación parámetros de operación

En el experimento 1 se estableció una distancia de 1200m entre el dispositivo y el receptor. Se define que el periodo de captura y envío del dato fuera de 1 minuto, además se observa el tiempo entre la captura y el almacenamiento del dato en la base de datos

alojada en el servidor web y su posterior visualización.

5.7.1.2 Pruebas para determinar tiempo de respuesta del sensor de conductividad

En el experimento 2 se establecieron distintas concentraciones de sal disueltas, entre 0 a 40 gramos, en 1 litro de agua, para así parametrizar la información suministrada por el sensor. En este experimento se colocó el sensor de conductividad en cada solución con el fin de poder determinar el tiempo de estabilización del dato. El tiempo de captura del sensor es de cada minuto y la duración de captura de la información fue mayor a dos horas.

5.7.1.3 Prueba para calcular la respuesta del sensor de conductividad a diferentes concentraciones de sal disueltas.

El experimento 3 constó en determinar la respuesta del sensor en el tiempo cuando se le suministrara diferentes cantidades de sal a la solución donde se encuentra. La cantidad total de sal disuelta en la solución no excedía los 40 gramos y el tiempo de entre las adiciones a la solución se debe determinar a partir del experimento anterior.

5.7.1.4 Prueba para determinar la relación entre la respuesta del sensor y la cantidad de sal disuelta

El experimento 4 consistió en poder encontrar una relación matemática entre la diferencia de voltaje que arroja el sensor de conductividad y la cantidad de sal disuelta. Para esto se decide capturar información por un tiempo prolongado y mayor a 2 horas, ya que con los anteriores experimentos se determinaría los tiempos de estabilización y la respuesta del sensor a cambios repentinos en la concentración. A partir de la información capturada por el sensor se pudo modelar dicha relación entre ambas variables.

5.7.2 Experimento dinámico

Este experimento consta de la instalación del dispositivo en un vehículo tipo motocicleta que permita la movilidad en una zona determinada manteniendo una distancia mínima de 100 metros con el receptor. Se define que el periodo de captura del dato por el dispositivo sea de 10 segundos para que se evidencie el cambio de posición y su posterior captura en el envío de la información por parte del receptor, además, muestra como eso afecta en los tiempos de captura y almacenamiento por el receptor y su posterior visualización en el visor web.

6. Pruebas y resultados

6.1 Proyección de modelos de distribución espacial de la salinidad

A partir de datos simulados se logró construir representaciones gráficas de la distribución espacial de la salinidad mediante diferentes métodos de interpolación. A continuación se muestra en las figuras (6.1, 6.2 , 6.3 y 6.4) que corresponden a los métodos: Triangulación de Delaunay la cual es una red irregular de triángulos (TIN) por su siglas en inglés, Polígonos de Thiessen, Interpolación Ponderada a Distancia Inversa (IDW) y Kriging.

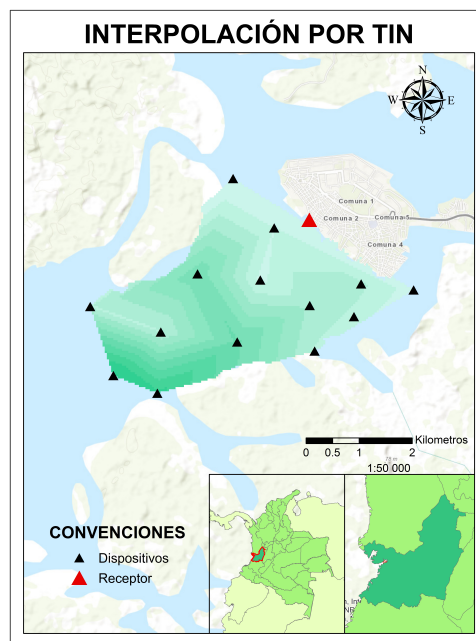


Figura 6.1: Interpolación por TIN

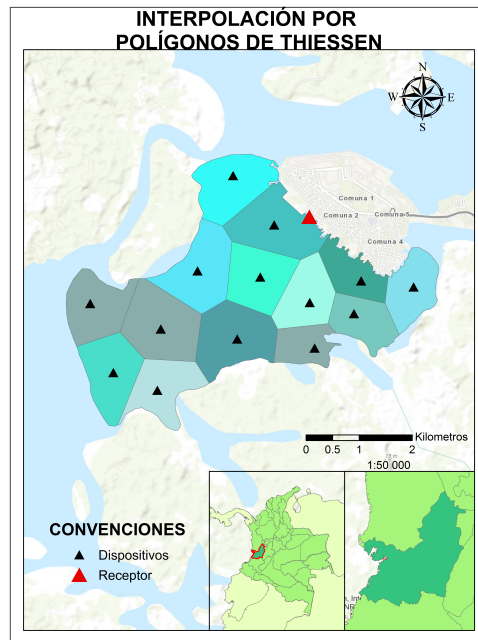


Figura 6.2: Interpolación por Polígonos de Thiessen

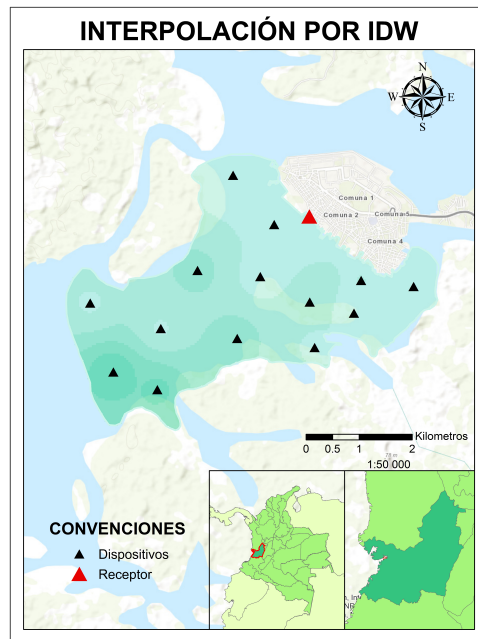


Figura 6.3: interpolación por IDW

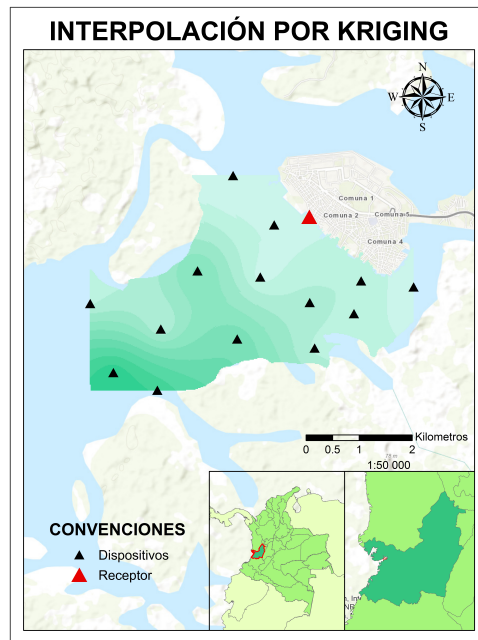


Figura 6.4: Interpolación por Kriging

6.2 Pruebas del funcionamiento del instrumento

A partir de la conexión y programación del microcontrolador emisor y receptor se realizó las pruebas de funcionamiento del sistema. Para ello se ejecutó el envío de la información suministrada por el sensor de conductividad, temperatura y GPS por medio de la tecnología LoRa para la recepción por medio de la misma tecnología en el dispositivo receptor como se muestra en la Figura 6.5

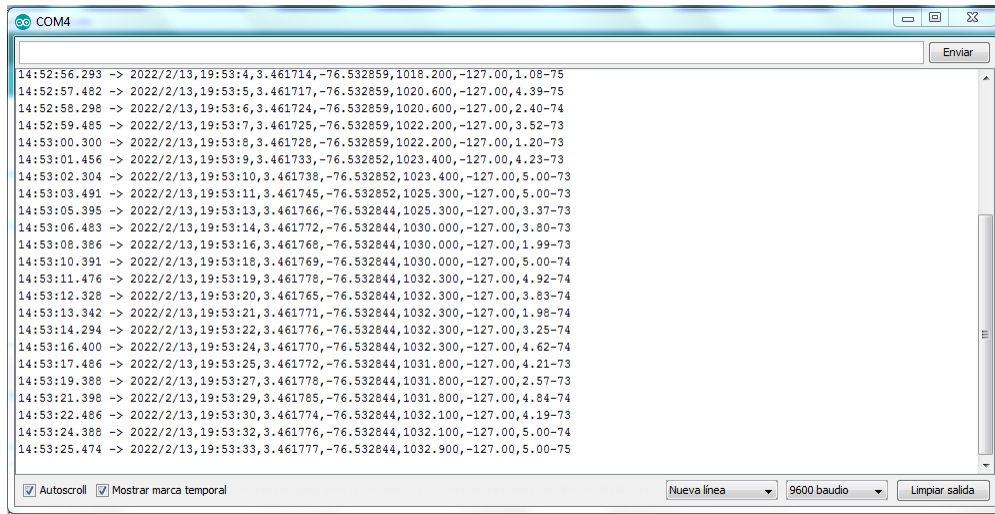


Figura 6.5: Recepción de los datos por el puerto COM

En la anterior imagen se puede apreciar que entre la captura, envío y recepción del dato entre el dispositivo emisor y el receptor hay una diferencia apreciable de 8 segundos entre la hora mostrada por la marca temporal que adquiere el tiempo por medio de la computadora donde se encuentra conectado el dispositivo receptor y la hora mostrada por el sensor GPS teniendo en cuenta que esta hora es en Tiempo Universal Coordinado (UTC).

6.3 Pruebas de calibración del sensor de conductividad y caracterización del dispositivo

Para conocer el tiempo de respuesta del sensor de conductividad se determinó elaborar un experimento que contaba con la captura de datos por un tiempo prolongado de 2 a 6 horas, también se tomo información de la temperatura, para conocer la influencia de esta en el dato de conductividad. Se diseñó un procedimiento para prueba de laboratorio, donde en un recipiente de vidrio se vertió un litro de agua hervida y se dejó reposar a temperatura ambiente, después gradualmente se agregó sal marina como se puede apreciar en el Anexo 1 (Exp 1). En la Tabla 6.1 se observa la cantidad de sal usada en cada experimento. El sensado se iniciaba cuando los electrodos del sensor de conductividad estaban dentro de la solución.

Tabla 6.1: Gramos de sal disuelta en cada experimento

Experimento	Cantidad de sal disuelta (g/L)
1	2.5
2	16
3	38
4	16
5	24

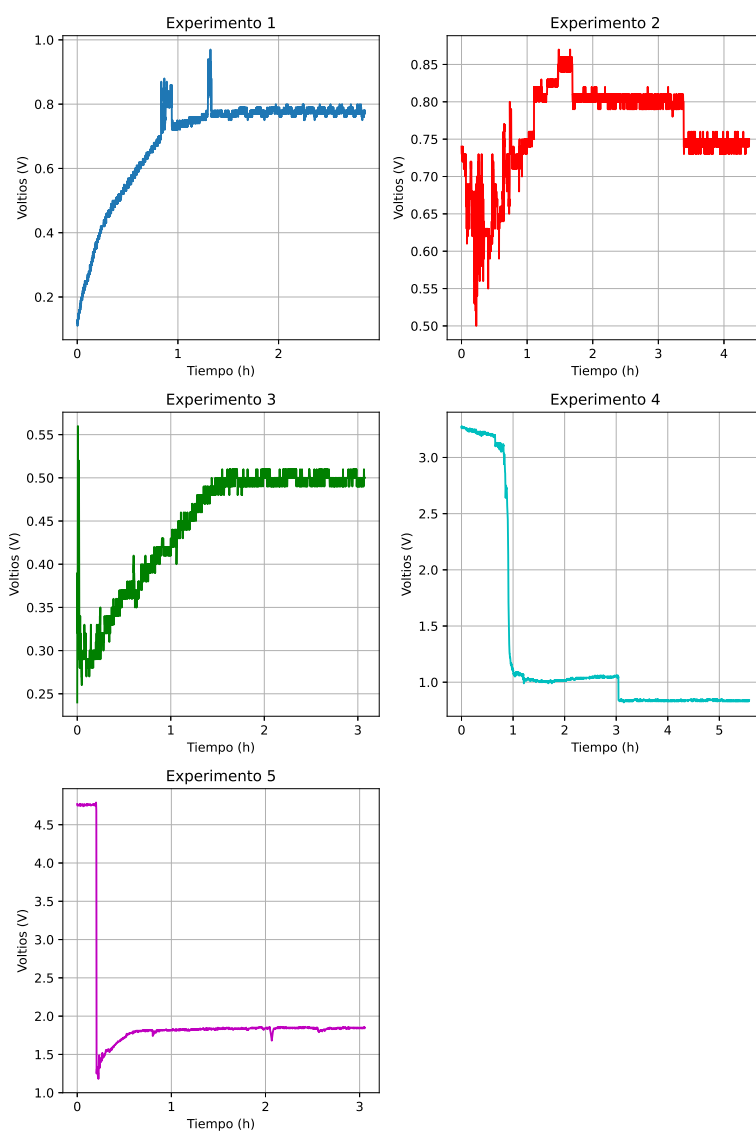


Figura 6.6: Experimentos preliminares-Conductividad vs Tiempo

Como se pueden ver en la Figura 6.6 después de la primera hora de toma de datos el sensor encuentra una leve estabilidad que se prolonga en el tiempo a excepción del experimento 2, 4 y 5. Este hecho se le atribuye a que el sensor dejó de tomar datos por una interrupción en la captura de la información asociada a un error en el almacenamiento del dato, el cual se resuelve reiniciando la captura de los datos desde el ordenador.

En la Figura 6.7 se muestra la temperatura en función del tiempo durante 5 experimentos de prueba, estos experimentos se han diseñado para determinar que la respuesta del sensor es instantánea y sensible a los cambios en estas se observa el decaimiento o la subida de la variable en el transcurso del tiempo en donde el incremento o pérdida de la temperatura en la solución radica directamente en la hora del experimento y las condiciones climáticas presentes.

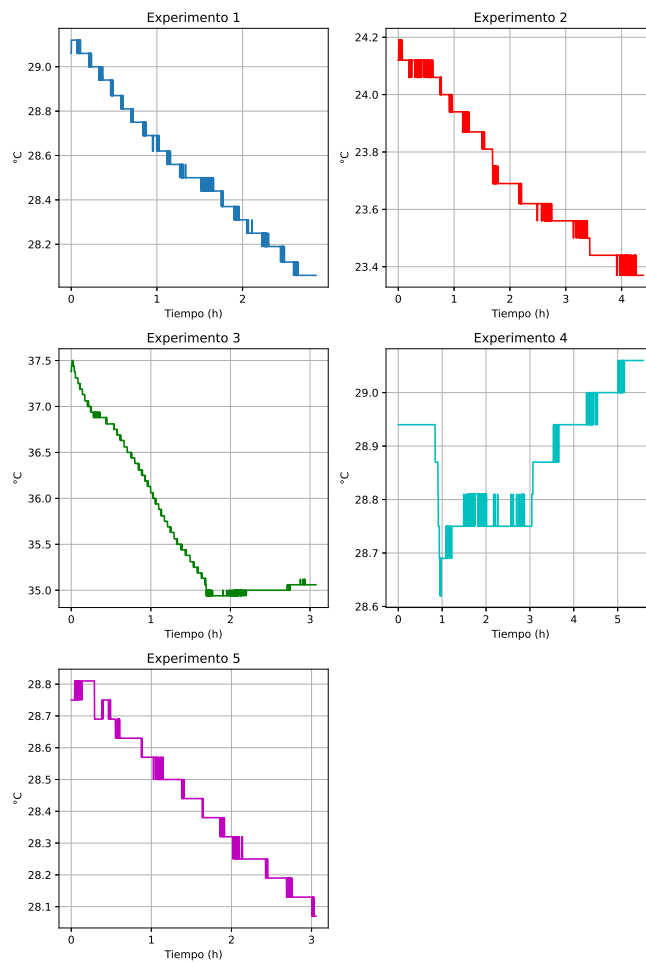


Figura 6.7: Experimentos preliminares-Temperatura vs Tiempo

A partir de los datos obtenidos en los experimentos anteriores se planteo realizar uno siguiendo los datos obtenidos del anterior. Se decidió que en un litro de agua hervida se fuera agregando 1 g de sal cada 2 horas, esto para conocer la respuesta del sensor cuando se le agrega y se mezcla (Anexo 1-Exp 2). Se detalla que después de la vertida de la sal se espera un minutos, posteriormente se mezcla durante 3 minutos y se deja reposar durante 1 hora y 56 minutos.

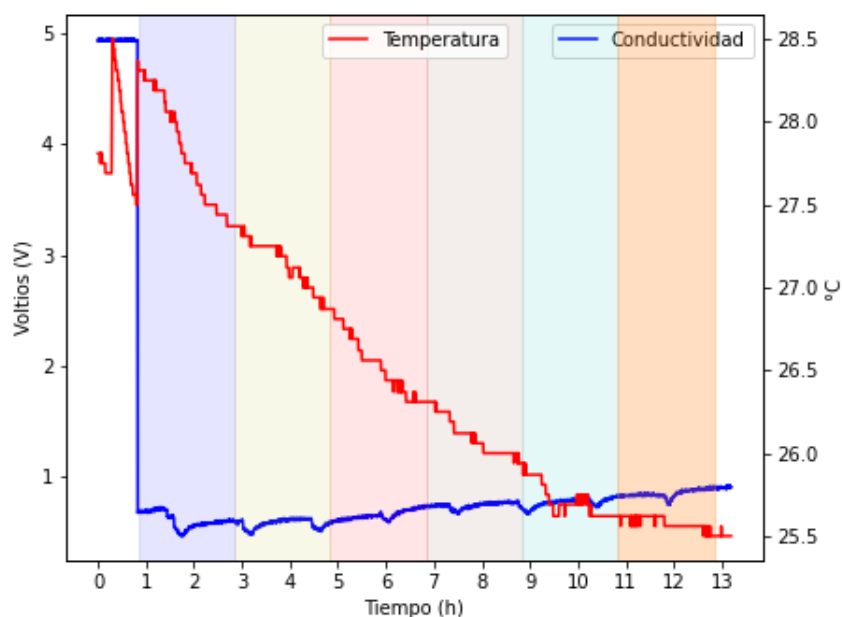


Figura 6.8: Experimento de respuesta del sensor

En la Figura 6.8 se puede ver como la respuesta del sensor de conductividad no representa un cambio aparente cuando se le agrega más sal, cada franja de la gráfica muestra un periodo de dos horas donde el sensor recopiló datos cada 30 s. Igualmente se observa que la temperatura de la solución no se afecta cuando se le agrega y se mezcla la sal ya que continua descendiendo de manera progresiva esto se le atribuye a la temperatura ambiente. Con la información recopilada se decidió construir un experimento que toma datos por un tiempo determinado y con una cantidad específica de sal disuelta en un litro de agua, así se podrían recopilar datos desde 0 g/L hasta 39 g/L, ya que cada solución fue independiente (Anexo 1 - Exp 3). El paso a paso que se utilizó para el experimento fue el siguiente:

1. En un recipiente de vidrio verter el litro de agua previamente hervida
2. Introducir y mezclar el gramaje de sal correspondiente hasta que se disuelva totalmente
3. Esperar hasta que la temperatura de la solución disminuya entre 20 y 30°C, lo qué tomaba aproximadamente 2 horas.

4. Introducir los sensores
5. Encender e iniciar el programa
6. Tomar datos por 2 horas o más
7. Detener el programa, apagar y desconectar los sensores
8. Desechar la solución

Lo anterior se repitió en cada uno de los gramajes de sal (0 g a 39 g) disueltos en un litro de agua. Con lo anterior en la Figura 6.9 se muestran los resultados para cada toma.

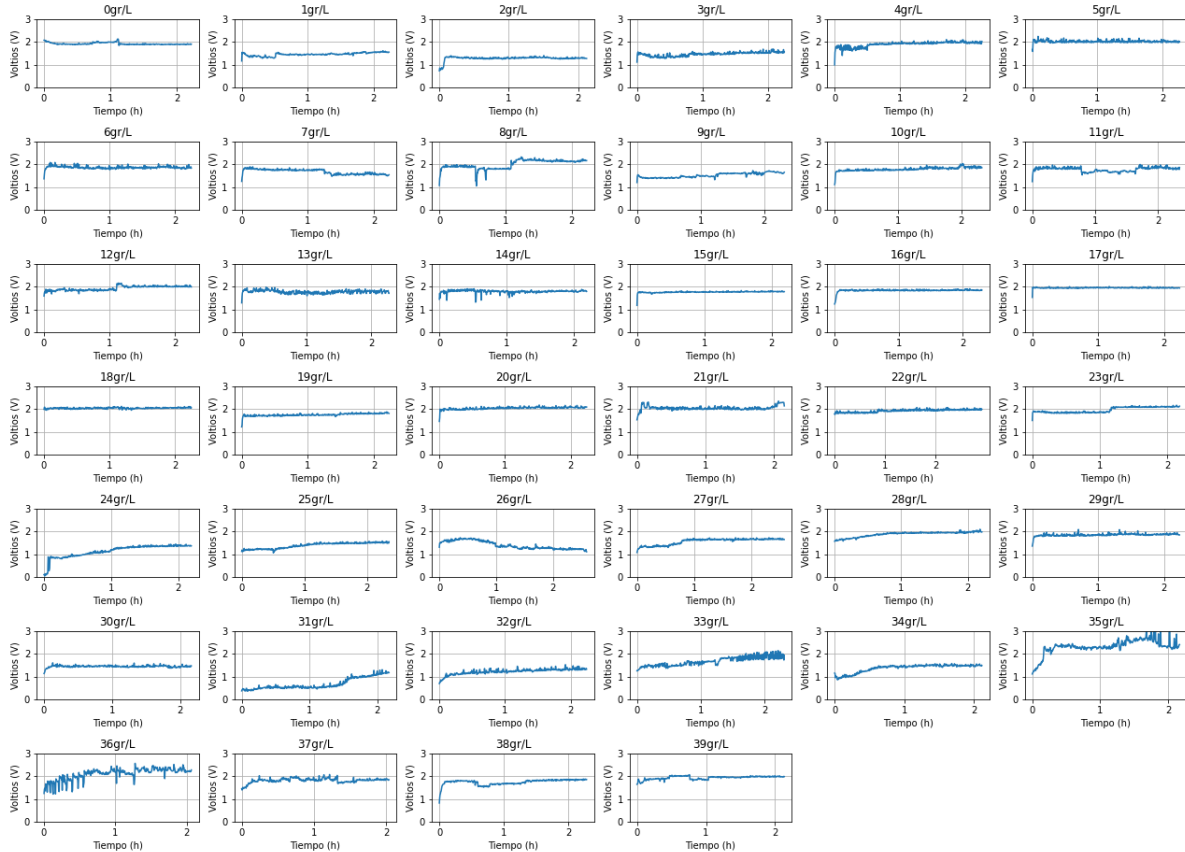


Figura 6.9: Experimento de 0 g a 39 g de sal disuelta en 1 litro de agua por separado.

Para poder comprender y suavizar las gráficas, se decidió aplicar un filtro promedio

móvil simple (Ecuación 6.1) con $n=10$, esto con el fin de eliminar el ruido de los datos obtenidos anteriormente.

$$\bar{P}_{SM} = \frac{P_M + P_{M-1} + \dots + P_{M-(n-1)}}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} P_{M-i} \quad (6.1)$$

En la gráfica 6.10 se puede observar los datos suavizados.

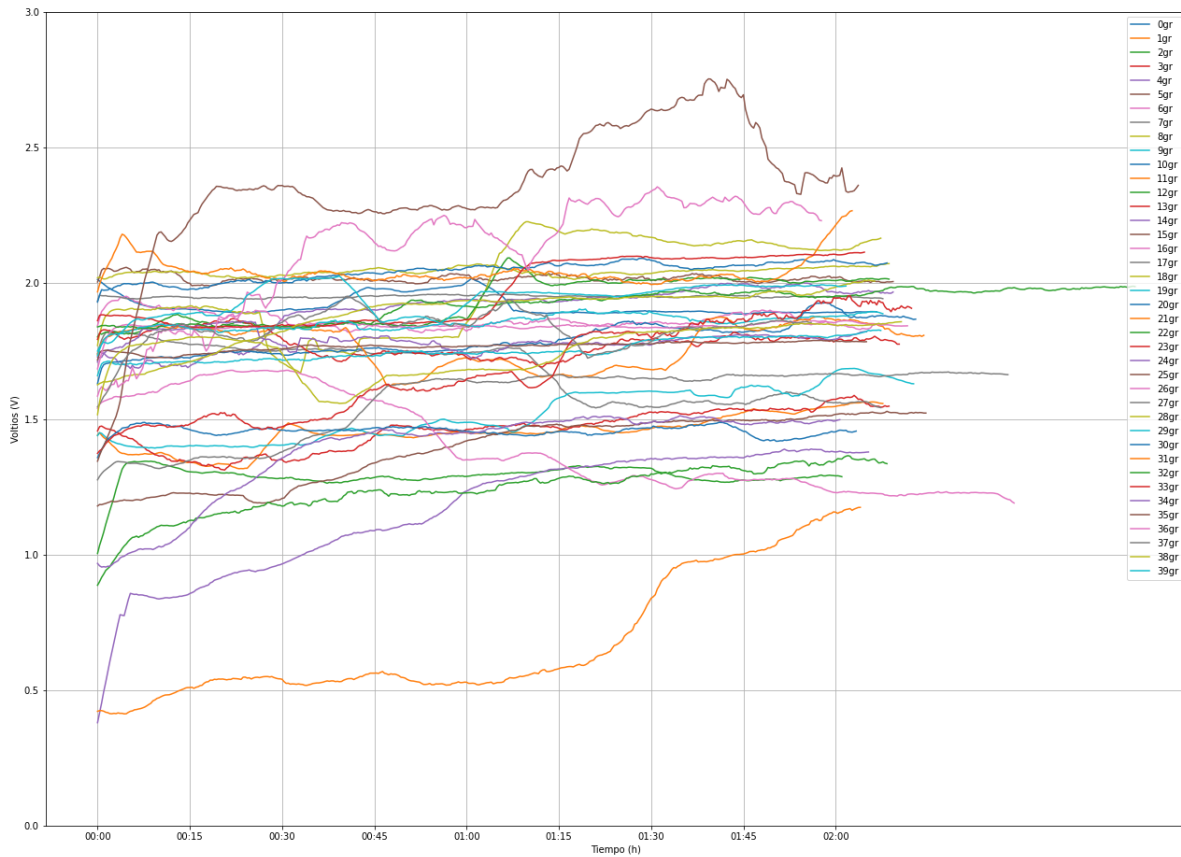


Figura 6.10: Datos filtrados por el promedio móvil con $n=10$.

Los resultados mostraron que no había correspondencia entre la cantidad de gramos de sal disueltos y la respuesta del sensor, ya que el dato que se evidencia en la parte superior de la gráfica de color marrón, corresponde a 35 g de sal disuelto y el que está en la parte inferior de color naranja corresponde a 31 g de sal.

Siguiendo con lo anterior, se decidió recrear el movimiento del océano haciendo mover la solución durante la captura de la información, esto con el fin de que las partículas de sal disuelta en el agua no vayan al fondo con el tiempo, ya que se consideró que este factor era relevante dentro de la respuesta del sensor, pues no se estaba controlando en el experimento anterior y se puede apreciar en el (Anexo 1 - Exp 4).

El experimento contó con el mismo paso a paso del anterior, solo que se incluyó una bomba eléctrica de agua JEBO JP-900 sumergible. Las características se muestran en la Tabla 6.2.

Tabla 6.2: Características de la bomba sumergible

JEBO JP-900		2-3/4" de largo 2" de ancho 3" de altura hasta la parte superior del conector de tubería Sumergible: Sí 4 pies de ventosa Cable de alimentación con conexión a tierra de 6' 2 adaptadores: 1/2" DI - 5/16" DI 145 GPH Elevación máxima de 45" Flujo de agua ajustable: Sí Especificaciones eléctricas: CA 120 V - 60 Hz - 0,14 A
--------------------	---	--

Además de las consideraciones anteriores se decidió realizar el experimento con los gramajes de 18 a 38 g y con intervalos de 2 gramos y el tiempo de captura de la información fue menor a 7 horas por cada gramaje de sal.

En la gráfica 6.11 se muestran los datos después de la eliminación de los datos atípicos en la diferencia de voltaje.

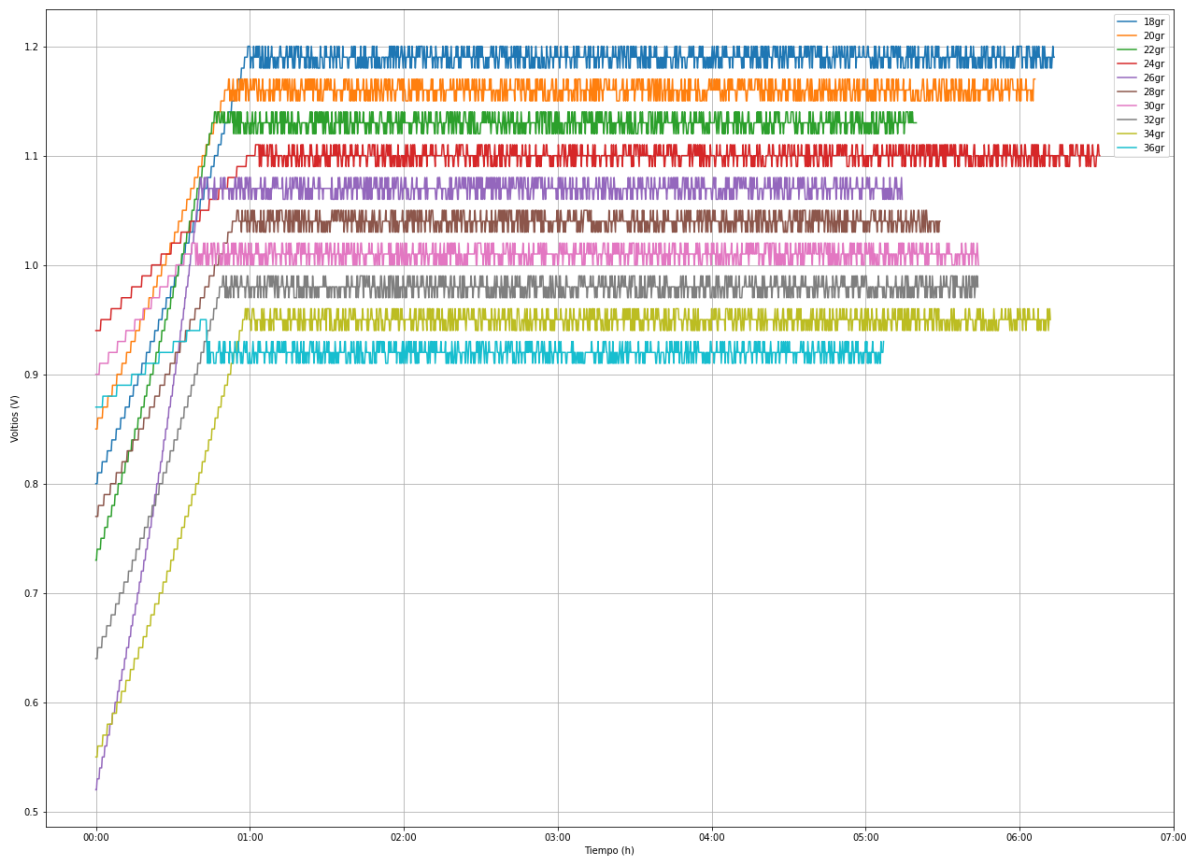


Figura 6.11: Datos con el agua en movimiento

Como se ve en la figura anterior, cuando el agua está en movimiento el sensor tiene una respuesta mucho más estable, además se logra apreciar que desde el encendido de los sensores y la inicialización del programa el valor del dato capturado se va incrementando en el tiempo hasta que se estabiliza. Se estimó el que tiempo máximo para la estabilización del sensor fue de 1 hora y 4 minutos, que corresponde a un incremento en el tiempo de respuesta del sensor determinado en el experimento 1. Los datos anteriores se verificaron 3 veces para cada gramo de sal.

Adicionalmente se trató de nutrir la información obtenida en el experimento tomando datos de diferentes gramos de sal que no fueron tenidos en cuenta, pero al graficar los no se veía una diferencia apreciable entre un gramaje y otro.

A continuación, en la Figura 6.12, se muestran los datos que se obtuvieron por el

sensor sin su tiempo de respuesta, es decir, desde que se estabilizara el dato.

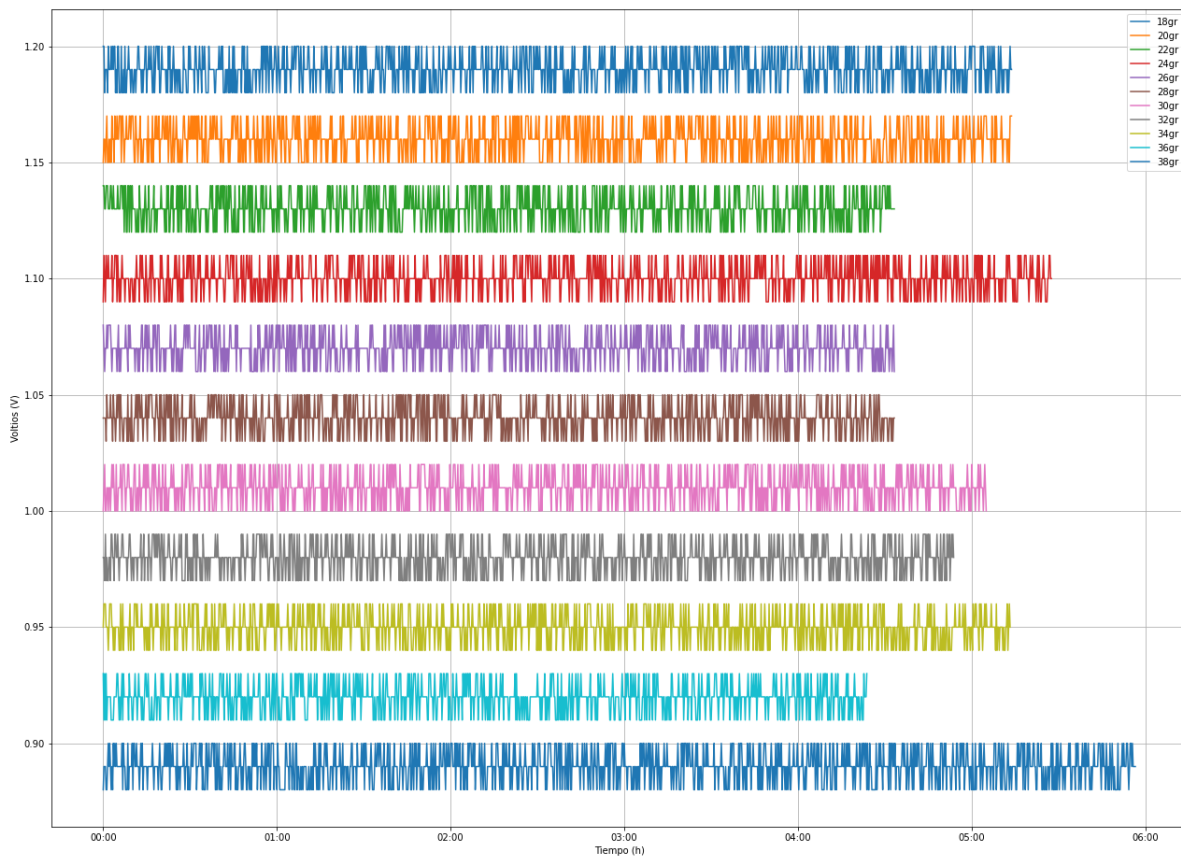


Figura 6.12: Datos estables con el agua en movimiento

6.3.1 Cálculo de la salinidad a partir de los datos obtenidos por los sensores

Teniendo en cuenta los resultados del último experimento se decide revisar la variabilidad de los datos para cada gramo de sal que se tomó, se partió del hecho que estos datos pasaron por un promedio móvil, expuesto en el apartado 6.1 y en la Ecuación 6.1, y la eliminación de los datos atípicos captados por el sensor. La gráfica 6.13 corresponde a los datos posteriores después del filtro paso bajo que se aplicó.

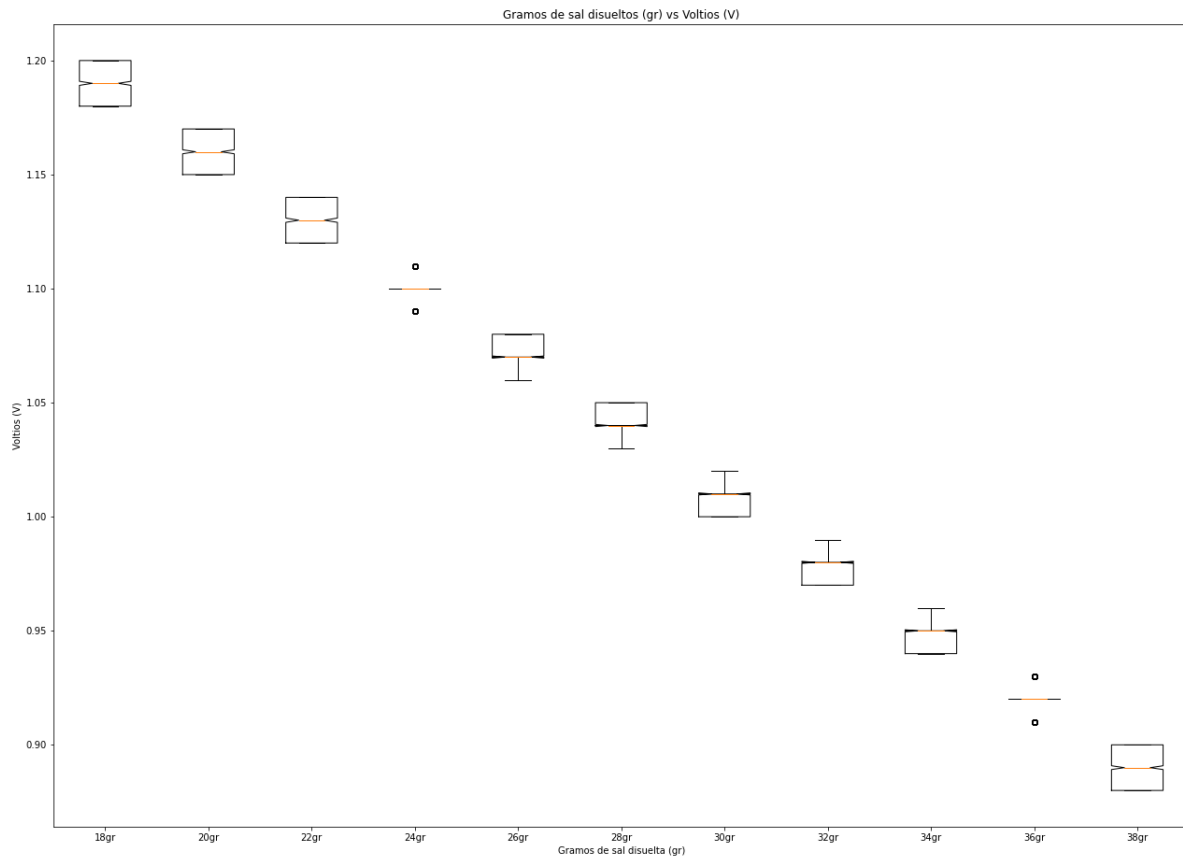


Figura 6.13: Variabilidad de los datos

Posteriormente se calculó la moda para cada gramo de sal (Tabla 6.3) y así tener un valor correspondiente en la respuesta de voltaje del sensor, lo anterior con el fin de poder calcular la ecuación que nos relacione la cantidad de sal disuelta en un litro de agua en función de la respuesta del sensor.

Tabla 6.3: Moda para cada gramo de sal disuelto

Gramos de sal disuelta (g)	Moda (Mo)
18	1.19
20	1.16
22	1.13
24	1.10
26	1.07
28	1.04
30	1.01
32	0.98
34	0.95
36	0.92
38	0.89

Además se graficaron los pares ordenados en la Tabla 6.3 y se puede ver en la Figura 6.14 donde se obtuvo el calculo de la Ecuación 6.2 que relaciona el voltaje del sensor en función de los gramos de sal disueltos en la solución.

$$V = -0.015S + 1.46 \quad (6.2)$$

Donde V es voltaje y S son los gramos de sal disueltos en la solución.

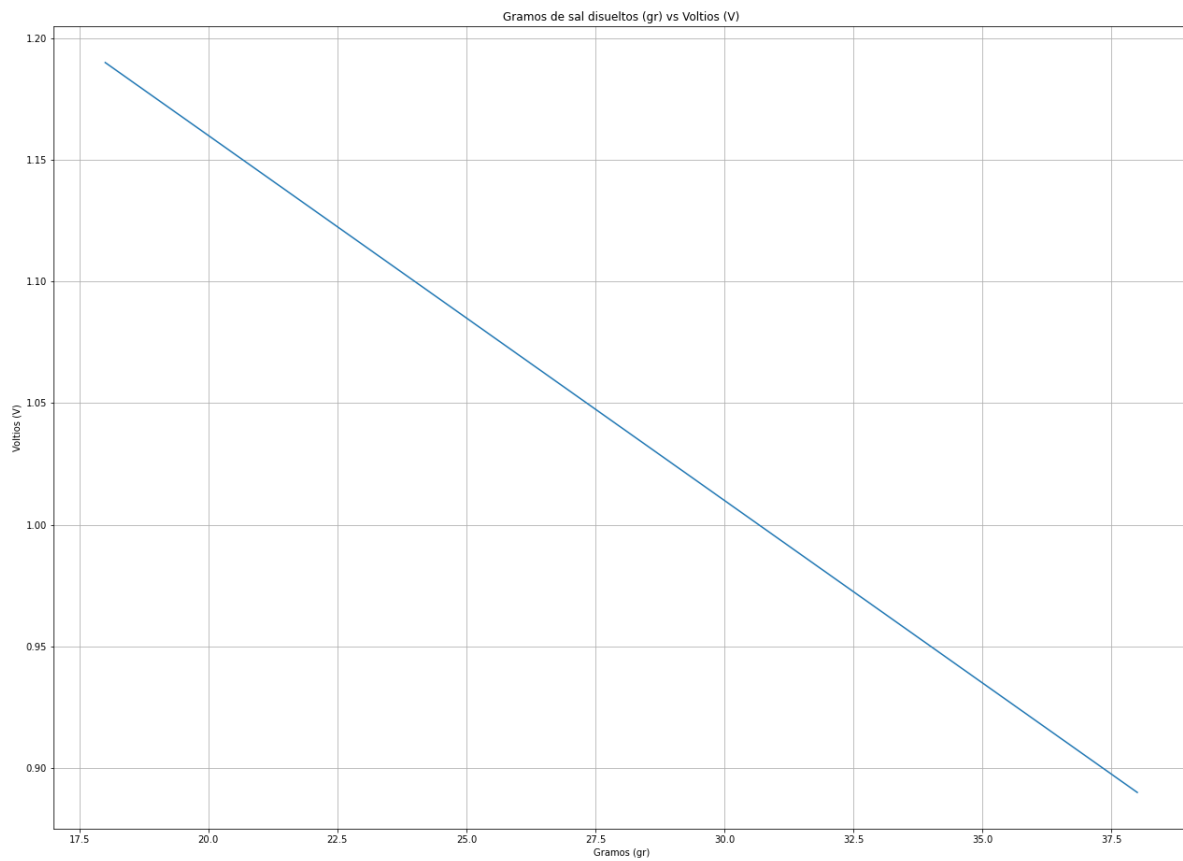


Figura 6.14: Gramos de sal disueltos (g) vs Voltaje (V)

6.4 Diseño final del dispositivo de sensado

El instrumento de sensado se distribuye en tres sistemas principales que conforman el diseño final como se observa en la Figura 6.15 , estos sistemas son:

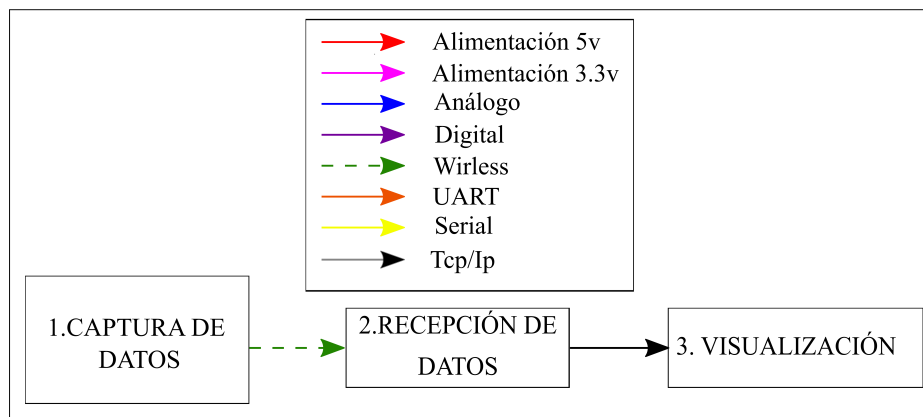


Figura 6.15: Sistemas principales

1. Captura de datos
2. Recepción de datos
3. Visualización

A su vez estos sistemas se subdividen en diferentes componentes como se observa en la Figura 6.16, conformando todo el sistema de sensado en su parte interna.

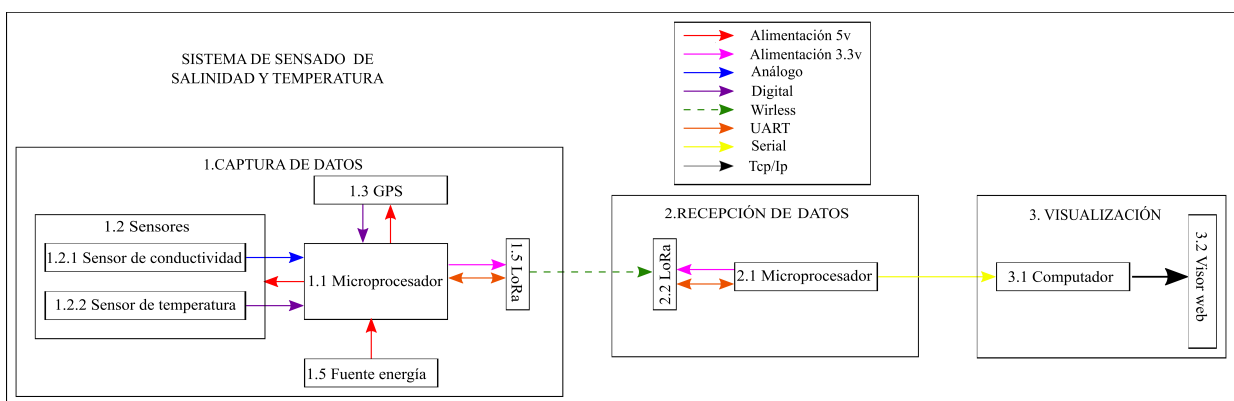


Figura 6.16: Diseño final Sistema de monitoreo

Finalmente se realizó el diseño final de revestimiento del sensor en forma de boya, para su funcionamiento como se evidencia en la Figura 6.17.

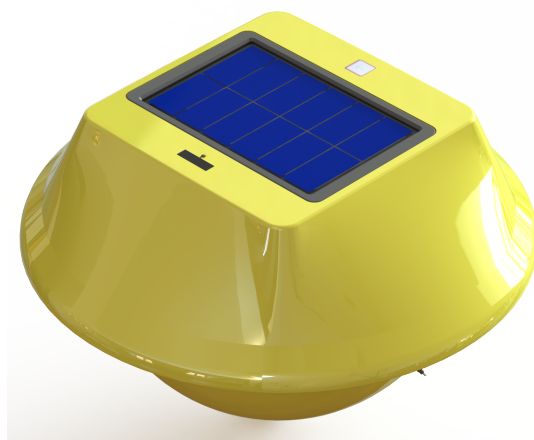


Figura 6.17: Modelo del diseño de la cubierta

También se observa en la Figura 6.18 una vista interna del mismo por medio de un corte transversal, en la cual se evidencia la posición de cada uno de los componente dentro de la cubierta. El diseño con todas sus vistas del diseño 3d se encuentra en el Anexo 3.

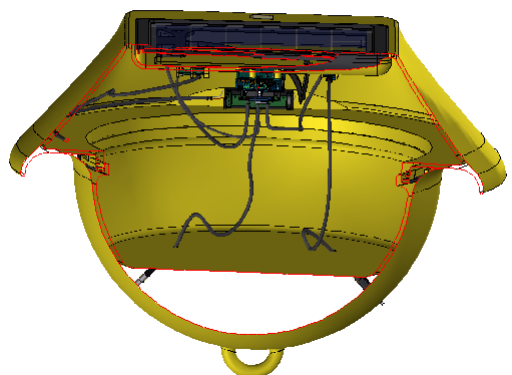


Figura 6.18: Vista interna por corte transversal

Por otro lado, el sensor de salinidad y temperatura tuvo un costo aproximado de \$155 dolares a febrero del 2022 (detalle de los valores Anexo 2), por lo que se puede afirmar que es un instrumento de bajo costo.

6.5 Sistema de monitoreo

6.5.1 Definición de tiempos de observación

Los tiempos de observación definido es de cada 4 horas, dado que los cambios de salinidad en los estuarios están ligados al cambio en las mareas y estas cambian cada 6 horas aproximadamente según la literatura consultada. Por lo tanto, para que el sensor se estabilice en un rango de 60 a 70 minutos y para no saturarse de información, pero tampoco para que se encuentre falencia de ella. Se definió este tiempo de 4 horas respaldado por los experimentos y la investigación previa.

6.5.2 Visor web

Se realizó la programación de las herramientas necesarias para poder visualizar en tiempo real los datos aportados por el dispositivo, se construyeron los varios archivos en diferentes lenguajes de programación que permiten almacenar, actualizar y visualizar los datos capturados en campo.

Con lo anterior, se crean dos páginas; la principal que contiene en el inicio se encuentra una reseña del proyecto (Figura 6.19), el geovisor (Figura 6.20), la base de datos históricos y dos gráficas para visualizar la variación de la salinidad y la temperatura en el tiempo (Figura 6.21), así como preguntas frecuentes del proyecto (Figura 6.22) y el equipo de trabajo del proyecto. En la segunda pagina se encuentra la visualización de dos métodos de interpolación (IDW y TIN) para la representación de la distribución espacial de la salinidad (Figura 6.23), a esta pagina se accede haciendo click en "Modelos de Visualización" que se ubica en la parte superior derecha de la página principal.



Figura 6.19: Encabezado del visor web

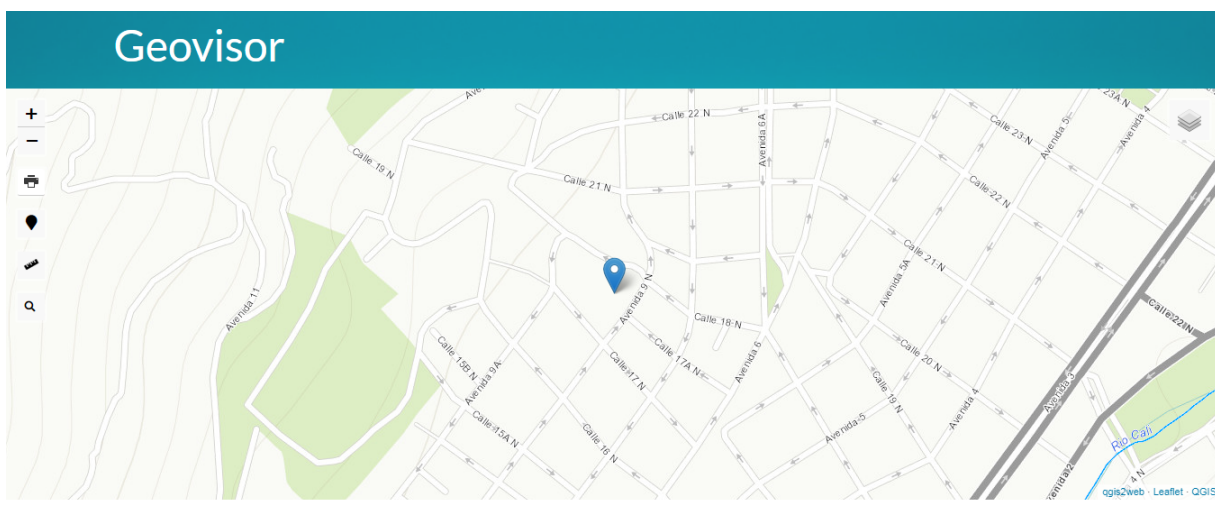


Figura 6.20: Geovisor

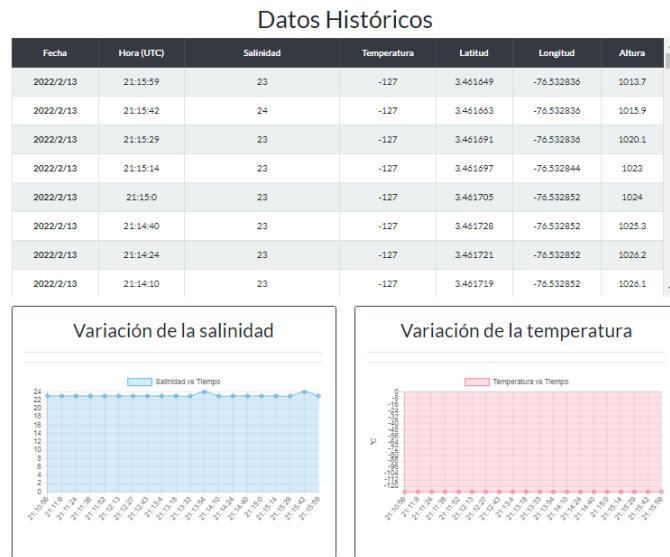


Figura 6.21: Datos históricos y gráficas de la variación de la salinidad y la temperatura en el tiempo

Bajo Costo

Se utilizan equipos y sensores de bajo costo y fácil acceso

Responsive

Está diseñado para que se adapte en cualquier dispositivo

Wireless

La relación Instrumento-visor se hace mediante herramientas inalámbricas

Gratuito

El acceso a la información presentada en este visor es totalmente gratis

¿Por qué este producto?

Este producto es necesario para visualizar los datos adquiridos por los sensores de conductividad y temperatura ubicados en la bahía de Buenaventura, Colombia. Además, se evidencian los productos finales realizados con los datos adquiridos y su postprocesamiento.

¿Cómo se construyó el instrumento?

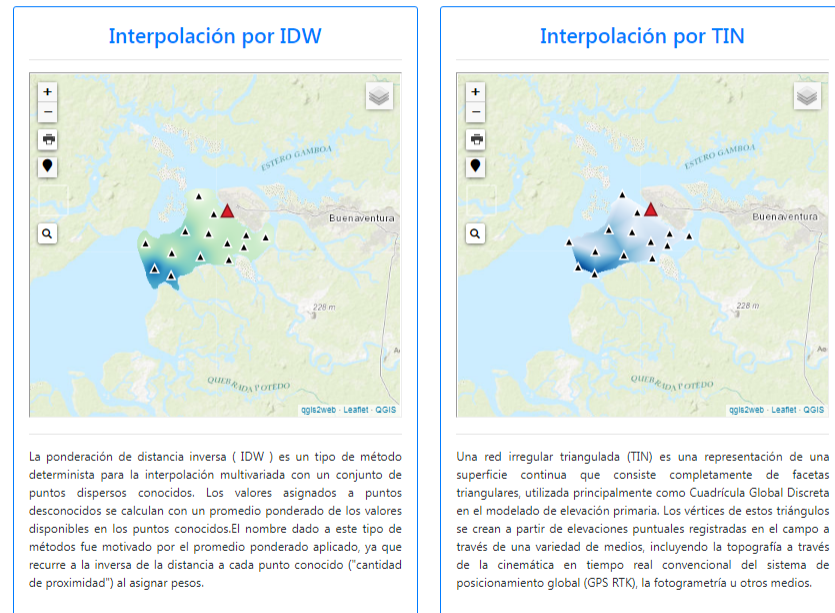
El instrumento fue creado en el laboratorio de geoposicionamiento de la Universidad del Valle, especialmente en el curso de Tecnologías Geomáticas dictada por el profesor M.I. Carlos Quiroga, que a su vez hace parte del grupo de expertos que dirigen este proyecto.

¿Cómo se contruyó el visor web y móvil?

¿Quién dirige este proyecto?

Figura 6.22: Preguntas frecuentes en el visor web

Representación de la distribución espacial de la salinidad y temperatura a partir de datos simulados e interpolados por los métodos IDW y TIN



Copyright © 2022

Figura 6.23: Modelos de visualización

Además, se tuvo en cuenta que la construcción del visor web sea responsive, esto con el fin de poder acceder desde cualquier dispositivo electrónico con acceso a internet y que fuera agradable para el usuario. A continuación, en las figuras (6.24, 6.25 y 6.26) se muestra como se adapta a una pantalla de un teléfono celular de 6.59 pulgadas y con dimensiones de 2340 x 1080 píxeles.

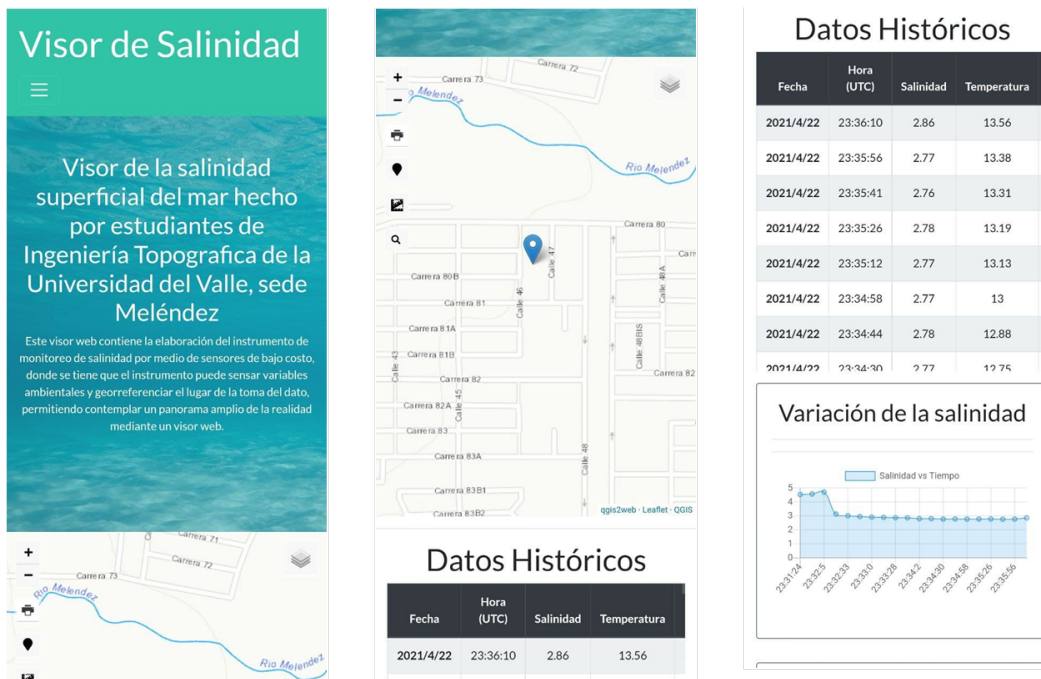


Figura 6.24: Visor web adaptado-parte 1



Figura 6.25: Visor web adaptado-parte 2

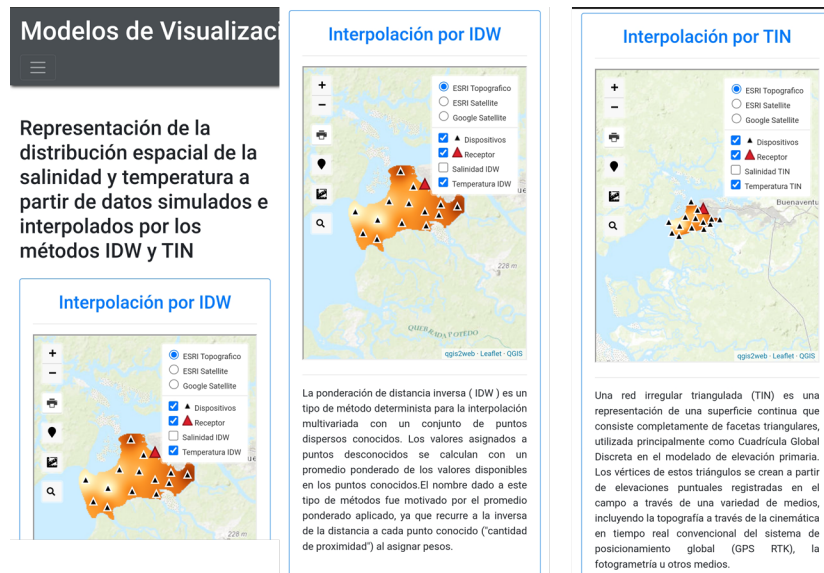


Figura 6.26: Visor web adaptad-parte 3

6.5.2.1 Publicación

Al finalizar las pruebas de funcionamiento del visor web se procede a realizar la publicación en un servidor gratuito con el fin de no generar costos adicionales al proyecto.

Se decide realizar la publicación del visor web en el dominio de Heroku ya que este permite diferentes lenguajes de programación, así como la administración de la base de datos en Heroku Postgres y la actualización de manera local del diseño del visor web. A continuación se muestra la URL donde se puede acceder al visor web.

<https://tesis-salinidad.herokuapp.com>

6.6 Pruebas del sistema

Esta prueba se llevó a cabo con el fin de verificar el funcionamiento integral del sistema de monitoreo, para ello se realizó un recorrido con el sensor alrededor del receptor de información en un radio de 1600 m. Esto para verificar el envío de información, el funcionamiento adecuado del gps al estar cambiando de posición

constantemente, el funcionamiento de los sensores y la fuente de energía.

6.7 Discusión

Para la definición del método de visualización de salinidad se evaluaron 4 tipos de modelos de interpolación, donde se encontró que los polígonos de Thiessen al realizar de manera simple y que cada polígono se encuentre a la misma distancia [Pizarro et al., 2003] influye en la representación gráfica de la distribución espacial de la salinidad, ya que no se nota un cambio progresivo entre los polígonos. Por otra parte, el modelo de Kriging al basarse en la covarianza espacial de una superficie que determina la variación de la salinidad aleatoria a partir de los datos simulados [Yang, 2010], produce una representación gráfica positiva, puesto que se puede apreciar el cambio sucesivo de variable de estudio.

La triangulación de Delunay al basarse en una circunferencia circunscrita para cada triángulo de la construcción de una red, produce que la representación gráfica de la variable ambiental a estudiar no contemple zonas adicionales en donde no se encuentren los vértices de los triángulos [Correc and Chapuis, 1987]. Esto hace que sea más usado en aplicaciones gráficas puesto que la equiangularidad entre los triángulos es bastante precisa y difiere con respecto al modelo presentado por el método de interpolación ponderado a distancia inversa (IDW). Este modelo presenta deficiencias en aplicaciones gráficas, pero al poder explicar el valor de un punto que no se encuentra en la muestra de datos por la ponderación de valores a una distancia determinada [Yang, 2010], hace que la representación gráfica de la salinidad y su distribución espacial se aprecie de manera homogénea.

La elaboración de un instrumento de bajo costo que permite un monitoreo con la medición de variables ambientales (salinidad y temperatura), la localización espacial y el envío de la información generada in situ, posibilitando la observación, procesamiento y la toma de decisiones en un corto tiempo casi en tiempo real.

El sensor en relación con las formas usadas por otros autores como, [Sun et al., 2019] en el cual crea un sistema de monitoreo pero para ello deben generar un área especial y adecuada, además usa equipos con materiales mas costosos comparados con nuestro

sensor. Por otro lado, esta [Balbin et al., 2017] que genera un método de monitoreo similar a nuestro proyecto sin embargo, los equipos usado tienen un costo alto por que son unas bobinas con un equipo que genera frecuencias sinusoidales, además ningún autor consultado genera el procesamiento y visualización de la información de manera inmediata y para la población en general.

También, están los estudios *in situ* generados por [CVC, 2015] que son entidades del estado, donde los datos de salinidad y temperatura tomada tiene un tiempo de procesamiento de entre 4 a 6 meses y estos no cuentan con localización exacta. A diferencia del sensor de salinidad y temperatura construido en el cual la información se obtiene casi en tiempo real y varios datos durante el día cada una con una asociada a una localización.

La construcción del visor web y poder alojarlo en un servidor gratuito permite el acceso de diferentes entidades gubernamentales y no gubernamentales, tanto nacionales o internacionales y personas de común, a los datos recopilados por el dispositivo y desde cualquier herramienta electrónica con acceso a internet casi que en tiempo real, que a diferencia de los datos de salinidad publicados por las entidades en Colombia, que actualmente demoran hasta 6 meses en ser compartidos [CVC, 2015].

La plataforma de captura y visualización de la información permite tomar decisiones de alto impacto de manera oportuna, accionando alertas tempranas para el bienestar de los ecosistemas presentes y en las comunidades que dependan de la pesca en la zona.

A diferencia de [Morcelle del Valle and Deorsola, 2015] quienes determinaron 12 coeficientes para calcular la salinidad a partir de la conductividad y la temperatura los resultados mostrados en el capítulo anterior, evidenciaron que se pudo calcular la salinidad en (g/L) a partir de la diferencia de voltaje con la que trabaja el sensor, que a su vez difieren en la unidad de medida que los autores anteriormente mencionados y que se puede ver en la Ecuación 3.5, pues estos lo determinan en $\mu\text{S}/\text{cm}$. Además, la variabilidad de los datos obtenidos es muy regular para cada valor disuelto, por lo tanto el nivel de confianza de todo el sistema de captura es alto.

Para finalizar, se da respuesta a la pregunta que direccionó este proyecto: *¿Cómo implementar un monitoreo constante de la salinidad superficial de la bahía de*

Buenaventura y adquirir la información mediante equipos y servicios de bajo costo y fácil acceso? Para esto se dio el cumplimiento a los objetivos planteados que consistían en desarrollar un instrumento de monitoreo georreferenciado que pudiera capturar la salinidad y la temperatura, al tiempo estuviera conectado a un visor web en donde se puede visualizar la información adquirida por el dispositivo, además de plantear los modelos de visualización de la salinidad a partir de las diferentes medidas en la zona de estudio, lo que permitió cumplir el objetivo principal de este proyecto.

7. Conclusiones y trabajo futuro

7.1 Conclusiones

Se dio cumplimiento al objetivo específico número 1 como se concluye a continuación:

- Se consiguió desarrollar un modelo que permite calcular la salinidad a partir de la diferencia de voltaje arrojada por un sensor de conductividad.
- Se logró diseñar un dispositivo que cuenta con un sensor GNSS que permite conocer la ubicación de la información capturada por los sensores de conductividad y temperatura.
- Se construyó un dispositivo de bajo costo para poder suministrar información espacial de la salinidad superficial del mar.
- La recepción y almacenamiento de la información que captura el sensor se obtuvo gracias a la implementación de los algoritmos construidos que permite la actualización de los datos.

Se dio cumplimiento al objetivo específico número 2 con las siguientes actividades:

- Se implementó un sistema de comunicación inalámbrica que permite el envío de la información capturada por el dispositivo en el mar a un receptor en tierra.
- Se desarrolló un visor web geográfico en el que se puede visualizar la información capturada por el dispositivo.
- El visor web se adapta a cualquier dispositivo electrónico ya que se construyó de forma responsive, lo cual facilita el acceso a la información suministrada por el dispositivo de sensado desde cualquier dispositivo ya sea ordenador, celular o tablet.

- Se comprobó que el tiempo entre la captura, el envío, recepción y publicación de la información es menor a 15 segundos, lo que representa que la actualización de la información es casi en tiempo real.
- Se elaboró un algoritmo en el microcontrolador arduino que permitiera el funcionamiento de los sensores en conjunto, puesto que a la información de salinidad y temperatura se le agregó la posición, por lo tanto permite conocer su ubicación y se visualiza en el visor web.

Finalmente, se dio cumplimiento al objetivo específico número 3 como se muestra a continuación:

- Se determinó que el modelo que mejor representa gráficamente la distribución espacial de la salinidad, a partir de los datos simulados de la salinidad es la interpolación ponderada a distancia inversa (IDW) puesto que predice de manera progresiva y no abrupta los cambios espaciales de la variable de estudio.
- Con el desarrollo de este proyecto se logra enfatizar en la importancia de la construcción de dispositivos georreferenciados que permitan levantar información de variables ambientales en Colombia.
- Debido a la pandemia no fue posible realizar la caracterización del sensor en el mar, sin embargo se emplearon métodos que permitieron simular el movimiento del agua en el mar.

7.2 Trabajo futuro

- Evaluar otros métodos de interpolación para determinar el que mejor represente la distribución espacial de la salinidad a partir de datos obtenidos in situ.
- Incluir la temperatura en el cálculo del modelo matemático que permita determinar la salinidad teniendo en cuenta otra variable ambiental.
- Teniendo en cuenta el microprocesador, se pueden incluir más sensores en el dispositivo de sensado que permitan obtener más información de diferentes variables ambientales.

- Replicar el dispositivo de sensado para así construir una red de monitoreo de salinidad y temperatura, o de más variables ambientales.
- Construir un aplicativo web disponible en en las diferentes plataformas que permita identificar los usuarios que visitan el visor web.
- Mejorar el rango de comunicación inalámbrica del dispositivo que permita adentrarlo al mar para así poder suministrar información espacial de las variables ambientales no solo de las costas sino también de mar adentro.
- Realizar algunas pruebas y caracterización directamente en el mar, para así mejorar su precisión.

8. Anexos

- 8.1 Anexo 1: Experimentos del sensor.
- 8.2 Anexo 2: Detalles de costo del sistema de monitoreo.
- 8.3 Anexo 3: Diseño 3D del sensor.
- 8.4 Anexo 4: Código fuente
- 8.5 Anexo 5: Diagramas electrónicos

9. Referencias

- [Arduino, 2022] Arduino (2022). Arduino uno | arduino.cl - compra tu arduino en línea.
- [Balbin et al., 2017] Balbin, J. R., Joy, M., and Reyes, S. (2017). Development and Implementation of Low Cost Salinity and Temperature Monitoring System for Mangrove Forest.
- [Cogua Romero, 2011] Cogua Romero, R. d. P. (2011). *Estudio Comparativo de Flujo de Mercurio a través de Redes Detritívoras y Planctívoras en un Estuario Tropical*. PhD thesis.
- [COPÉRNICO, 2010] COPÉRNICO (2010). Salinidad.
- [Correc and Chapuis, 1987] Correc, Y. and Chapuis, E. (1987). Fast computation of Delaunay triangulations. *Advances in Engineering Software (1978)*, 9(2):77–83.
- [Cortese et al., 2015] Cortese, A., Valle, M., Morasso, R., and Caviglia, D. D. (2015). Wireless Sensor Network System for Sea Water Quality Monitoring. (October):10–12.
- [CVC, 2015] CVC (2015). *Portafolio de Estrategias para la Mitigación y Adaptación al Cambio Climático*.
- [Definición, 2022] Definición, C. (2022). ¿qué es panel solar? » su definición y significado [2022].
- [ECURED, 2013] ECURED (2013). Salinidad.
- [Electronics, 2022] Electronics, U. (2022). Batería 18650 3.7v 2200mah - unit electronics.
- [Electrónica, 2022] Electrónica, I. (2022). Cargadores: Cargador ups para bateria de litio con salida ajustable.
- [Guevara, 2017] Guevara, M. P. (2017). *Influencia de las variables ambientales en la estructura de las comunidades bentónicas y su relación con el flujo de mercurio en la bahía de Buenaventura*. PhD thesis.

- [IDEAM, 1990] IDEAM (1990). Caracterización Climática De Variables Océano-Atmosféricas Sobre La Cuenca Del Pacífico Colombiano. In *IDEAM*, pages 13–58.
- [Inalambricas, 2021] Inalambricas, C. (2021). Módulo para posicionamiento gps/qzss - comunicacionesinalambricashoy.com.
- [INOCAR, 2001] INOCAR (2001). Propiedades del agua de mar . *Instituto Oceanográfico de Ecuador*, pages 1–5.
- [INVEMAR, 2018] INVEMAR (2018). *Diagnóstico y evaluación de la calidad de las aguas marinas y costeras del caribe y pacífico colombiano*, volume 4.
- [Ketabchi et al., 2016] Ketabchi, H., Mahmoodzadeh, D., Ataie-ashtiani, B., and Simmons, C. T. (2016). Sea-level rise impacts on seawater intrusion in coastal aquifers : Review and integration. *JOURNAL OF HYDROLOGY*, 535:235–255.
- [Laun and Pittman, 2018] Laun, L. T. A. and Pittman, E. N. S. E. (2018). Development of a Small , Low-Cost , Networked Buoy for Persistent Ocean Monitoring and Data Acquisition. *OCEANS 2018 MTS/IEEE Charleston*, pages 1–6.
- [Llicán, 2015] Llicán, C. (2015). Clasificación de las aguas por el contenido de sales disueltas. pages 1 – 11.
- [MinEducación, 2012] MinEducación (2012). ¿Qué es un SIG? - ...:Ministerio de Educación Nacional de Colombia:...
- [Morcelle del Valle and Deorsola, 2015] Morcelle del Valle, P. and Deorsola, M. (2015). Desarrollo de un Modelo Matematico que Relaciona la Salinidad con la Conductividad Electrica para Diferentes Temperaturas. *Cátedras de Teoría de Circuitos I y Electrotecnia y Electrónica*.
- [Naylamp, 2022a] Naylamp (2022a). Sensor de humedad del suelo fc-28.
- [Naylamp, 2022b] Naylamp (2022b). Tutorial sensor digital de temperatura ds18b20.
- [Nebra et al., 2016] Nebra, A., Alcaraz, C., Caiola, N., Muñoz, G., and Ibáñez, C. (2016). Benthic macrofaunal dynamics and environmental stress across a salt wedge Mediterranean estuary. 117:21–31.

- [Park et al., 2005] Park, S.-c., Yun, S.-t., Chae, G.-t., and Yoo, I.-s. (2005). Regional hydrochemical study on salinization of coastal aquifers , western coastal area of South Korea. 313:182–194.
- [Penélope, 2011] Penélope (2011). ¿Qué son los ecosistemas?
- [Pizarro et al., 2003] Pizarro, R. T., Ramirez, C. B., and Flores, J. P. (2003). Análisis comparativo de cinco métodos para la estimación de precipitaciones areales anuales en periodos extremos - PDF. *Bosque*, 24(3):31–38.
- [Sensors, 2022] Sensors, C. (2022). Tecnología lora y lorawan - catsensors.
- [Sun et al., 2019] Sun, M.-y., Jiang, H.-t., Shi, B., Zhou, G.-y., Inyang, H. I., and Feng, C.-x. (2019). Development of FBG salinity sensor coated with lamellar polyimide and experimental study on salinity measurement of gravel aquifer. *Measurement*.
- [Vidal and Murillo, 2017] Vidal, C. and Murillo, J. (2017). *Monitoreo De Factores Físico-Químicos Que Inciden En Las Floraciones De Algas Nocivas En El Mar Caribe Colombiano, Usando Imágenes Satelitales*. PhD thesis.
- [Yáñez et al., 2001] Yáñez, A., Twilley, R. R., and Domínguez, A. L. (2001). Manglares Cambio Climatico MIZC. *Madera y Bosques* 4, 4(2):1–17.
- [Yang, 2010] Yang, X. (2010). Spatial Interpolation. *Handbook of Research on Geoinformatics*, pages 129–136.