



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Politécnica Superior de Gandia

Diseño, desarrollo y verificación de un sensor para  
cuantificar el flujo de agua

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Evaluación y Seguimiento Ambiental de  
Ecosistemas Marinos y Costeros

AUTOR/A: Silva Alvarado, Vinie Lee

Tutor/a: Lloret Mauri, Jaime

Cotutor/a: Parra Boronat, Lorena

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024

## **AGRADECIMIENTOS**

Quisiera expresar mi más sincero agradecimiento a las personas que han sido fundamentales en el desarrollo de este trabajo.

En primer lugar, me dirijo a Lorena Parra, mi cotutora, a quien debo una profunda gratitud por todo lo que me ha enseñado. Sus consejos y su dedicación han sido invaluable para mi crecimiento académico y profesional. He aprendido enormemente de sus sugerencias y de su enfoque en la mejora continua.

Agradezco también a Jaime Lloret, mi tutor, por permitirme colaborar con él y su grupo de investigación. Trabajar bajo su orientación ha sido una experiencia enriquecedora que me ha proporcionado valiosos conocimientos y habilidades.

Finalmente, quisiera expresar mi profundo agradecimiento a mi familia por su apoyo moral incondicional durante todo el proceso. Su comprensión y aliento han sido mi mayor fortaleza. A mis amistades, les agradezco por su orientación y recomendaciones, que me han permitido ver distintos puntos de vista en trabajo y mejorar continuamente.

A todos ustedes, mi más sincero agradecimiento.

## ÍNDICE

Resumen .....	7
Abstract.....	8
Resum.....	9
1. Introducción.....	10
1.1. Precedentes en la Universidad Politécnica de Valencia (UPV).....	12
1.2. Objetivos.....	13
1.3. Justificación .....	13
1.4. Propuesta.....	14
1.5. Estructura .....	14
2. Estado del arte .....	16
2.1. Precedentes del proyecto .....	16
2.2. Metodologías actuales.....	18
2.2.1. Sensores deprimógenos .....	18
2.2.2. Caudalímetro de turbina .....	18
2.2.3. Caudalímetro ultrasónico.....	19
2.2.4. Caudalímetro electromagnético.....	19
2.3. Aplicaciones.....	20
3. Desarrollo de la Propuesta.....	23
3.1. Principio de medición del flujo.....	23
3.2. Materiales.....	23
3.2.1. Arduino Mega 2560 Rev3 .....	23
3.2.2. LEDs.....	24
3.2.3. LDRs.....	24
3.2.4. Protoboards.....	24
3.2.5. Cables .....	24
3.2.6. Resistencias de 220 $\Omega$ .....	24
3.2.7. Resistencias de 22 K $\Omega$ .....	24
3.2.8. Carcasa.....	25
3.3. Contratiempos del diseño.....	25
3.3.1. Metodología de Desarrollo .....	25
3.3.2. Funcionamiento de los LEDs .....	25
3.3.3. Tiempo y Requisitos de las Impresiones 3D .....	25
3.3.4. Frecuencia de Lectura y Procesamiento de Datos .....	26
3.4. Diseño del sensor .....	26

3.4.1.	Configuración Inicial.....	26
3.4.2.	Disposición a lo largo de la Tubería.....	26
3.4.3.	Ventajas Técnicas.....	28
3.5.	Configuración del sensor.....	28
3.6.	Condiciones de pruebas.....	30
3.6.1.	Flujo laminar.....	30
3.6.2.	Pruebas.....	31
3.6.3.	Orígenes de la turbidez.....	31
3.6.4.	Trazador.....	32
3.6.5.	Velocidad del sistema.....	32
4.	Resultados.....	36
4.1.	Obtención de datos.....	36
4.2.	Procesamiento de datos.....	36
4.2.1.	Mediciones en agua potable.....	36
4.2.2.	Mediciones en agua con clorofila.....	44
4.3.	Procesamiento de máximos locales.....	50
4.4.	Resultados de calibración con agua potable.....	52
4.5.	Resultados de calibración con agua con clorofila.....	58
4.6.	Prueba del modelo en fluido simulado de escorrentía.....	63
4.6.1.	Lecturas ampliadas de escorrentía.....	67
4.6.2.	Resultados de la prueba.....	70
5.	Conclusiones.....	72
5.1.	Comparativo sensor desarrollado y sensores comerciales.....	72
5.2.	Propuestas de mejora.....	74
5.3.	Aportaciones personales.....	74
5.4.	Futuras investigaciones.....	74
6.	Referencias.....	76
7.	Anexos.....	78
7.1.	Anexo I. Relación del trabajo con los ODS de la Agenda 20230.....	78

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Distribución de los LEDs y LDRs a lo largo de la tubería .....	27
<b>Figura 2.</b> Vista frontal .....	27
<b>Figura 3.</b> Circuito eléctrico del nodo propuesto .....	29
<b>Figura 4.</b> Sistema propuesto de medición experimental.....	31
<b>Figura 5.</b> Recta de regresión del comportamiento de la velocidad en el sistema.....	34
<b>Figura 6.</b> Diseño estructural 3D de la carcasa del sensor. ....	35
<b>Figura 7.</b> Toma de lecturas en el sistema propuesto, agua con clorofila.....	35
<b>Figura 8.</b> Lecturas en el tiempo de muestreo, LED blanco, agua potable.....	37
<b>Figura 9.</b> Lecturas en el tiempo de muestreo, LED rojo, agua potable. ....	38
<b>Figura 10.</b> Lecturas en el tiempo de muestreo, LED amarillo, agua potable. ....	38
<b>Figura 11.</b> Lecturas en el tiempo de muestreo, LED verde, agua potable.....	39
<b>Figura 12.</b> Lecturas en el tiempo de muestreo, LED azul, agua potable.....	39
<b>Figura 13.</b> Ampliación de lecturas desde 75000 ms a 100000 ms, LED blanco.....	40
<b>Figura 14.</b> Ampliación de lecturas desde 75000 ms a 100000 ms, LED rojo.....	41
<b>Figura 15.</b> Ampliación de lecturas desde 75000 ms a 100000 ms, LED amarillo. ....	42
<b>Figura 16.</b> Ampliación de lecturas desde 75000 ms a 100000 ms, LED verde.....	43
<b>Figura 17.</b> Ampliación de lecturas desde 75000 ms a 100000 ms, LED azul.....	43
<b>Figura 18.</b> Lecturas en el tiempo de muestreo, LED blanco, agua con clorofila. ....	44
<b>Figura 19.</b> Lecturas en el tiempo de muestreo, LED rojo, agua con clorofila.....	45
<b>Figura 20.</b> Lecturas en el tiempo de muestreo, LED amarillo, agua con clorofila.....	45
<b>Figura 21.</b> Lecturas en el tiempo de muestreo, LED verde, agua con clorofila. ....	46
<b>Figura 22.</b> Lecturas en el tiempo de muestreo, LED azul, agua con clorofila. ....	46
<b>Figura 23.</b> Ampliación de lecturas desde 130000 ms a 175000 ms, LED blanco.....	47
<b>Figura 24.</b> Ampliación de lecturas desde 130000 ms a 175000 ms, LED rojo.....	48
<b>Figura 25.</b> Ampliación de lecturas desde 130000 ms a 175000 ms, LED amarillo. ....	48
<b>Figura 26.</b> Ampliación de lecturas desde 130000 ms a 175000 ms, LED verde.....	49
<b>Figura 27.</b> Ampliación de lecturas desde 130000 ms a 175000 ms, LED azul.....	50
<b>Figura 28.</b> Velocidad predicha vs real, blanco, agua potable.....	53
<b>Figura 29.</b> Velocidad predicha vs real, rojo, agua potable. ....	53
<b>Figura 30.</b> Velocidad predicha vs real, amarillo, agua potable. ....	54
<b>Figura 31.</b> Velocidad predicha vs real, verde, agua potable.....	54
<b>Figura 32.</b> Velocidad predicha vs real, azul, agua potable.....	55

<b>Figura 33.</b> Velocidad predicha vs velocidad real, agua potable.....	57
<b>Figura 34.</b> Velocidad predicha vs real, blanco, agua con clorofila.....	59
<b>Figura 35.</b> Velocidad predicha vs real, rojo, agua con clorofila.....	59
<b>Figura 36.</b> Velocidad predicha vs real, amarillo, agua con clorofila.....	60
<b>Figura 37.</b> Velocidad predicha vs real, verde, agua con clorofila.....	60
<b>Figura 38.</b> Velocidad predicha vs real, azul, agua con clorofila.....	61
<b>Figura 39.</b> Velocidad predicha vs velocidad real, agua con clorofila.....	62
<b>Figura 40.</b> Sistema de simulación de escorrentía.....	63
<b>Figura 41.</b> Lecturas en el tiempo de muestreo, LED blanco, escorrentía.....	64
<b>Figura 42.</b> Lecturas en el tiempo de muestreo, LED rojo, escorrentía.....	64
<b>Figura 43.</b> Lecturas en el tiempo de muestreo, LED amarillo, escorrentía.....	65
<b>Figura 44.</b> Lecturas en el tiempo de muestreo, LED verde, escorrentía.....	66
<b>Figura 45.</b> Lecturas en el tiempo de muestreo, LED azul, escorrentía.....	66
<b>Figura 46.</b> Ampliación de lecturas desde 245000 ms a 385000 ms, LED blanco.....	67
<b>Figura 47.</b> Ampliación de lecturas desde 245000 ms a 385000 ms, LED rojo.....	68
<b>Figura 48.</b> Ampliación de lecturas desde 245000 ms a 385000 ms, LED amarillo.....	68
<b>Figura 49.</b> Ampliación de lecturas desde 245000 ms a 385000 ms, LED verde.....	69
<b>Figura 50.</b> Ampliación de lecturas desde 245000 ms a 385000 ms, LED azul.....	70
<b>Figura 51.</b> Velocidad predicha vs velocidad real, escorrentía.....	71
<b>Figura 52.</b> Distribución de los sensores para cálculo tridimensional de la velocidad...	73

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Fluidos de experimentación.....	31
<b>Tabla 2.</b> Tabla de tabulación de velocidad del sistema .....	32
<b>Tabla 3.</b> Tabla de velocidades y propagación de errores.....	33
<b>Tabla 4.</b> Velocidad predicha vs real en las distintas longitudes de onda, agua potable. 52	
<b>Tabla 5.</b> Datos obtenida de tiempo y velocidad predicha, agua potable.....	56
<b>Tabla 6.</b> Errores absolutos y relativos medios en diferentes LEDs, agua potable.....	57
<b>Tabla 7.</b> Velocidad predicha vs real en las distintas longitudes de onda, agua con clorofila.....	58
<b>Tabla 8.</b> Datos obtenidos de tiempo y velocidad predicha, agua con clorofila. ....	61
<b>Tabla 9.</b> Errores absolutos y relativos medios en diferentes LEDs, agua con clorofila. 62	
<b>Tabla 10.</b> Datos obtenidos de tiempo y velocidad predicha, escorrentía.....	70
<b>Tabla 11.</b> Datos de velocidades predichas coincidentes, escorrentía. ....	71
<b>Tabla 12.</b> Precio del sensor propuesto. ....	73
<b>Tabla 13.</b> Grado de relación del trabajo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible ...	78

## RESUMEN

El océano alberga procesos complejos, algunos de los cuales solo se pueden resolver de manera aproximada. Los más destacados son los llevados a cabo por las corrientes marinas, que tienen un impacto directo en los organismos marinos y su hábitat, así como en el clima de la tierra. Un problema particularmente alarmante es la regresión de las playas, la cual puede ser causada principalmente por el cambio climático y otros factores, como el desarrollo de infraestructuras. La medición precisa de la velocidad de flujo es esencial para estudiar la dispersión de contaminantes, la dinámica de nutrientes y la migración de organismos marinos planctónicos; por lo tanto, este trabajo se ha centrado en diseñar, desarrollar y verificar un sensor para cuantificar el flujo de agua basándose en la detección de cambios en la absorción y dispersión de la luz utilizando diodos emisores de luz (LEDs) y resistencias dependientes de la luz (LDRs) . Los resultados han demostrado que el algoritmo de procesamiento de datos pese a ser sencillo presenta gran precisión, además, los datos obtenidos son fáciles de interpretar. En las pruebas realizadas, el LED azul mostró los menores errores en agua potable con un Error Relativo Medio del 7,59%, mientras que el LED amarillo resultó ser el más preciso en agua con clorofila teniendo un Error Relativo Medio del 6,80%; para ambos casos el LED verde presento menor precisión con un ERM de 9,58 % y 11,83% respectivamente. En la experimentación de simulación de escorrentía se obtuvo que en los 170 segundos de muestreo 2 LEDs (azul y blanco) brindan como resultado aproximado la misma velocidad de 7,05 cm/s y 6,99cm/s respectivamente, a los 190 segundos de muestreo los tres LEDs (azul, verde y blanco) brindan las velocidades 6,89cm/s, 6,99 cm/s y 7,05cm/s respectivamente, siendo muy semejantes entre si. Además, la recta de regresion de las velocidades predichas explica un 84,34% de la variabilidad de los datos. Con lo obtenido se evidencia que el sensor y el algoritmo propuesto explican la tendencia general del comportamiento de la velocidad en los sistemas estudiados. Al considerar el costo de este sensor en comparación con los comerciales como los ADCPs o el Vector de Nortek, se destacan grandes ventajas en monitoreos continuos ya que representa menos del 0,5% del costo de un sensor comercial. Esto ayudaría a desempeñar un papel fundamental en la gestión sostenible y la toma de decisiones informadas en los ecosistemas marinos

**Palabras clave:** Corrientes marinas, velocidad de flujo, dirección de flujo, ecosistemas marinos, sensor óptico.

## ABSTRACT

The ocean hosts complex processes, some of which can only be approximately resolved. The most prominent among these are those driven by ocean currents, which have a direct impact on marine organisms and their habitats, as well as on the Earth's climate. A particularly alarming issue is beach erosion, which can primarily be caused by climate change and other factors such as infrastructure development. Accurate measurement of flow velocity is essential for studying pollutant dispersion, nutrient dynamics, and the migration of planktonic marine organisms. Therefore, this work focused on designing, developing, and validating a sensor to quantify water flow based on detecting changes in light absorption and scattering using Light Emitting Diodes (LEDs) and Light-Dependent Resistors (LDRs). The results demonstrated that, despite its simplicity, the data processing algorithm offers high accuracy, and the obtained data are easy to interpret. In the tests performed, the blue LED exhibited the lowest errors in potable water with a Mean Relative Error of 7,59%, while the yellow LED proved to be the most accurate in chlorophyll-containing water, with a Mean Relative Error of 6,80%. In both cases, the green LED showed lower accuracy, with a Mean Relative Error of 9,58% and 11,83%, respectively. During the runoff simulation experiment, over 170 seconds of sampling, two LEDs (blue and white) provided similar velocities of 7,05 cm/s and 6,99 cm/s, respectively. After 190 seconds of sampling, the three LEDs (blue, green, and white) yielded velocities of 6,89 cm/s, 6,99 cm/s, and 7,05 cm/s, respectively, showing very similar results. Moreover, the regression line of the predicted velocities explained 84,34% of the data variability. The findings suggest that the proposed sensor and algorithm accurately capture the general trend of flow velocity behavior in the studied systems. When considering the cost of this sensor compared to commercial options like ADCPs or the Nortek Vector, significant advantages are evident for continuous monitoring, as it represents less than 0,5% of the cost of a commercial sensor. This would play a fundamental role in sustainable management and informed decision-making in marine ecosystems.

**Keywords:** Ocean currents, flow velocity, flow direction, marine ecosystems, optical sensor.

## RESUM

L'oceà acull processos complexos, alguns dels quals només es poden resoldre de manera aproximada. Els més destacats són els duts a terme pels corrents marins, que tenen un impacte directe als organismes marins i el seu hàbitat, així com al clima de la terra. Un problema particularment alarmant és la regressió de les platges, que pot ser causada principalment pel canvi climàtic i altres factors, com el desenvolupament d'infraestructures. El mesurament precís de la velocitat de flux és essencial per estudiar la dispersió de contaminants, la dinàmica de nutrients i la migració d'organismes marins planctònics; per tant, aquest treball s'ha centrat a dissenyar, desenvolupar i verificar un sensor per quantificar el flux d'aigua basant-se en la detecció de canvis en l'absorció i la dispersió de la llum utilitzant LEDs (díodes emissors de llum) i LDRs (resistència dependent de la llum). Els resultats han demostrat que l'algorisme de processament de dades malgrat ser senzill presenta una gran precisió, a més, les dades obtingudes són fàcils d'interpretar. A les proves realitzades, el LED blau va mostrar els menors errors en aigua potable amb un Error Relatiu Mitjà del 7,59%, mentre que el LED groc va resultar ser el més precís en aigua amb clorofil·la tenint un Error Relatiu Mitjà del 6,80% ; per a ambdós casos el LED verd va presentar menor precisió amb un ERM de 9,58% i 11,83% respectivament. En l'experimentació de simulació de vessament es va obtenir que en els 170 segons de mostreig 2 LEDs (blau i blanc) brinden com a resultat aproximat la mateixa velocitat de 7,05 cm/s i 6,99cm/s respectivament, als 190 segons de mostreig els tres LEDs (blau, verd i blanc) brinden les velocitats 6,89cm/s, 6,99 cm/s i 7,05cm/s respectivament, sent molt semblants entre si. A més, la recta de regressió de les velocitats predites explica un 84,34% de la variabilitat de les dades. Amb allò obtingut s'evidencia que el sensor i l'algorisme proposat expliquen la tendència general del comportament de la velocitat en els sistemes estudiats. En considerar el cost d'aquest sensor en comparació amb els comercials com els ADCP o el Vector de Nortek, es destaquen grans avantatges en monitoratges continus, ja que representa menys del 0,5% del cost d'un sensor comercial. Això ajudaria a exercir un paper fonamental en la gestió sostenible i la presa de decisions informades als ecosistemes marins

Paraules clau: Corrents marins, velocitat de flux, direcció de flux, ecosistemes marins, sensor òptic.

## 1. INTRODUCCIÓN

Teniendo en cuenta la inaccesibilidad y la vastedad de las áreas que se deben supervisar, la monitorización de las actividades humanas en los océanos ha sido un desafío considerable. Estos océanos, que constituyen más del 70% de la superficie de la Tierra, son esenciales para la vida de miles de millones de personas, ya que proporcionan alimentos y facilitan el transporte de mercancías a nivel mundial. Además, la infraestructura marina relacionada con la energía eólica, el petróleo y el gas es de vital importancia para el suministro de energía a nivel mundial [1], [2].

El océano presenta procesos que, en general, solo se pueden resolver de forma incompleta o aproximada; otros, en cambio, están bien estudiados históricamente y tienen una solución analítica; para algunos problemas más difíciles se recurre a métodos de aproximación o a los numéricos, que son la base de los modelos computacionales que se usan en investigación.

La circulación oceánica está influenciada por las corrientes marinas que se caracterizan por su dirección y velocidad. Estas corrientes pueden ser movimientos horizontales o verticales de grandes masas de agua en el mar, aunque no son tan visibles en la superficie como las olas y las mareas. Existen diferentes tipos de corrientes marinas, algunas de las cuales son fenómenos estacionales y afectan áreas pequeñas, mientras que otras son permanentes y abarcan vastas extensiones oceánicas. Las corrientes marinas se originan principalmente por dos razones, el viento y las diferencias de densidad. El viento ejerce una fuerza sobre la superficie del mar, generando movimientos que se propagan hacia las capas más profundas e influye en sus propiedades físicas. Sin embargo, la dirección de la corriente no siempre coincide con la del viento debido a dos factores como el rozamiento que reduce la velocidad con la profundidad y la fuerza de Coriolis. En las aguas superficiales, el viento desempeña un papel fundamental, la circulación oceánica superficial se origina en sistemas de vientos estables que generan corrientes de arrastre. Además, grandes masas de agua fría y densa se hunden en latitudes altas y se desplazan hacia latitudes más bajas, afectando las aguas superficiales. En las latitudes bajas y tropicales, la fuerte radiación térmica disminuye la densidad del agua superficial y provoca corrientes hacia latitudes más altas. Estos procesos, junto con la influencia de los vientos permanentes, modifican las trayectorias de las corrientes superficiales.

Existen diversas metodologías y dispositivos para calcular la velocidad de las corrientes marinas con transductores, dispositivos electromecánicos especializados, son

fundamentales en la conversión de energía acústica en energía eléctrica, y recíprocamente. En el ámbito acústico, estos componentes son vitales para la evaluación precisa de la dinámica fluida marina. Uno de los más conocidos es el efecto Doppler en la que el correntómetro emite un haz de sonido y recibe el eco con una frecuencia distinta a la emitida como consecuencia del movimiento de las partículas. La diferencia de frecuencia es proporcional a la velocidad de las partículas y a su vez del medio que lo transporta. Sin embargo, estudiar la velocidad de flujo marino con este correntómetro Doppler presenta un inconveniente principal y se debe a su elevado coste.

Otros pueden ser los correntímetros electromagnéticos cuyo funcionamiento se basa en la ley de inducción electromagnética de Faraday. En este contexto, el agua que fluye a través del campo magnético generado por el dispositivo actúa como el conductor, a medida que este conductor se desplaza a través del campo magnético, se genera una tensión en el mismo, esta tensión inducida tiene una relación proporcional con la velocidad del agua, lo que facilita la medición precisa de la velocidad de la corriente, esta metodología requiere amplios conocimientos de electrónica y del comportamiento de campos electromagnéticos.

Otra metodología de la estimación de la velocidad hidrodinámica se efectúa mediante la técnica del tiempo de tránsito acústico entre dos transductores (tiempo de vuelo). La emisión de una onda acústica desde un traductor, la subsiguiente medición del lapso temporal hasta su detección por el segundo transductor y viceversa, teniendo en cuenta que la distancia entre ambos es un valor conocido acorde al diseño del equipo y calculando la diferencia de tiempos ya que uno de ellos será mayor que el otro se calcula la velocidad, al ser un método acústico el coste de fabricación y mantenimiento es elevado.

La velocidad de flujo es de suma importancia, entre los procesos más destacados están los llevados a cabo por las corrientes que se encargan de la mezcla de aguas, el transporte de calor, nutrientes, sedimentos, contaminantes y organismos plantónicos; esto tiene un impacto directo en los organismos marinos y su hábitat, así como en el clima de la tierra [3]. Como resultado, se observa que la intensidad de las corrientes influye significativamente en la estructura de los ecosistemas, ya que los cambios en ella por factores naturales o antrópicos inciden directamente en la calidad de las aguas [4], además de su riqueza biológica.

Uno de los problemas más alarmantes es la regresión de playas como consecuencia del cambio climático (temporales), infraestructura (puertos), entre otros,

que afectan el flujo de corrientes, como es el caso de la costa Valenciana cuya regresión exige la intervención constante en las playas con obras de defensa y aportes de sedimentos para disminuir la velocidad de erosión [5].

### **1.1. Precedentes en la Universidad Politécnica de Valencia (UPV)**

Existen pocos trabajos relacionados con el tema de este proyecto que han publicado estudiantes e investigadores de la UPV. A continuación, se mencionarán algunos de los más relacionados

En 1994, Larreategui Fadrique [6], revisó la tecnología, estados del arte, conocimientos sobre los cálculos y medición de caudales en tuberías pequeñas y medianas en su artículo "Estado del arte en la medición de magnitudes hidráulicas (I): medición de caudales en conducciones cerradas, en diámetros pequeños y medianos", dando un panorama de las distintas metodologías.

En 2018, Parra-Boronat [7], desarrollaron un sensor de turbidez económico para piscifactorías, capaz de distinguir diferentes tipos de turbidez mediante el uso de LEDs y detectores de luz, en el proyecto "Design and development of low cost smart turbidity sensor for water quality monitoring in fish farms".

En 2021, Brentan y su equipo [8] abordaron la optimización de la colocación de sensores en redes de distribución de agua, balanceando costo y calidad, en el artículo "Water quality sensor placement: a multi-objective and multi-criteria approach".

En 2022, Rocher et al. [9], describió un sistema inalámbrico para monitorear alcantarillas pluviales y detectar bloqueos o derrames ilegales, utilizando sensores de nivel de agua, turbidez, conductividad y presencia de aceite, en su trabajo "Use of wireless sensor network system based on water level, rain, conductivity, oil and turbidity sensors to monitor the storm sewerage".

En 2024, Parra et al. [10], desarrollaron un sensor óptico de bajo costo para cuantificar y clasificar la turbidez del agua, combinando aprendizaje automático y sensores RGB. Este sensor, descrito en "Combination of Machine Learning and RGB Sensors to Quantify and Classify Water Turbidity", logró una precisión del 91,23% en la clasificación y un  $R^2$  de 0,979 en la cuantificación, mejorando las soluciones actuales en ambos aspectos.

## 1.2. Objetivos

El objetivo general de este trabajo es: Diseñar, desarrollar y verificar un sensor para cuantificar el flujo de agua. Para lograr este objetivo se plantean los siguientes objetivos específicos.

- Desarrollar un sensor de bajo costo que sea accesible de implementar en monitoreos a gran escala
- Garantizar mediciones precisas de la velocidad del flujo de agua, con un procesamiento de datos sencillo y eficiente.
- Minimizar en contacto directo entre el sensor y el entorno de medición.
- Diseñar la estructura de distribución de los LEDs (diodos emisores de luz) y LDRs (resistencias dependientes de la luz).
- Calibrar en condiciones controladas el sensor y diseñar del algoritmo de procesamiento
- Evaluar la precisión del sensor y capacidad de respuesta en diferentes condiciones de turbidez.

## 1.3. Justificación

La medición de la velocidad del flujo de agua de mar es crucial en la oceanografía y la ecología marina, además, de las zonas costeras. Esto busca comprender los patrones de circulación y transporte de masas de agua; este estudio en áreas litorales y en las profundidades oceánicas proporcionan información valiosa sobre una variedad de fenómenos y procesos que ocurren en el océano. La velocidad del flujo de agua puede influir en una serie de factores importantes ayudando a estudiar una variedad de fenómenos marinos que pueden afectar la distribución de nutrientes, clorofila, oxígeno en el agua, población de especies planctónicas; lo que a su vez puede tener un impacto en la vida marina. Un ejemplo de ello es estudiar la pérdida de fanerógamas marinas como la *Posidonia oceanica*, su difícil germinación y desarrollo en el sedimento como consecuencia de la influencia de corrientes y la complejidad del fondo [11]. Otro de los temas importantes de resaltar es ayuda al estudio del comportamiento de la regresión de las playas, como sucede en las costas Valencianas, que es un problema ambiental que puede ser causado por una variedad de factores. Las principales causas se deben al aumento del nivel del mar y la erosión costera a causa de infraestructura; donde se incluyen puertos, espigones, bahías, instalaciones recreativas, entre otros. Al desarrollarse

cerca de las zonas costeras interrumpen el transporte de sedimentos [12]. Estos temas de importancia se detallarán más adelante.

Por ello, se requieren herramientas, métodos innovadores y económicos que permitan obtener datos precisos de la velocidad de corrientes marinas, este dispositivo a su vez debe ser accesibles para las investigaciones realizadas ya que datos precisos son indispensables para desempeñar un papel fundamental en la gestión sostenible y la toma de decisiones informadas en los ecosistemas marinos y costeros.

#### **1.4. Propuesta**

Este trabajo propone el desarrollo de un sensor de bajo costo que realice la medición de la velocidad hidrodinámica in situ basándose en la detección de cambios en la absorción y dispersión de la luz. Existen sistemas sensores similares para detectar velocidad en fluidos basados en los cambios de temperatura en el agua provocados por una resistencia. El sensor propuesta utiliza este principio pero se aplica a las características ópticas del agua y aprovecha que las propiedades ópticas del agua en medio real tienen una considerable variabilidad espacial y temporal.

Para ello, se plantea el uso de sensores óptico que sean capaces de realizar un seguimiento en la turbidez del agua cada pocos milisegundos con el objetivo de obtener una señal variable de dicha turbidez. A escasos centímetros, se ubicará otro sensor de las mismas características. Para la detección de la turbidez se utilizarán distintos emisores y receptores de luz. Nuestra propuesta se basa en la repetición de dichos cambios temporales de la turbidez en el segundo sensor, de manera que el tiempo que tarda en repetirse la misma señal en el segundo sensor sea directamente proporcional a la velocidad del agua.

Esta propuesta ofrecería una solución económica, rentable y eficiente para realizar mediciones en una variedad de condiciones que pueden verse afectadas por el medio marino. Además comparado con los sensores de tipo térmico, este sistema supone un gran ahorro energético al no ser necesario calentar una resistencia.

#### **1.5. Estructura**

La estructura del presente trabajo se desarrolla de la siguiente manera. En el capítulo 2 se presenta una revisión exhaustiva de diversos artículos relacionados con las metodologías y desarrollo de sensores que miden la velocidad de fluidos. Se detallan los antecedentes del proyecto, analizando las ventajas y limitaciones de los sensores o

dispositivos disponibles en la actualidad y se exploran sus aplicaciones en el monitoreo ambiental y en estudios hidrológicos.

En el capítulo 3 se describe el desarrollo de la propuesta, desde el principio de medición del flujo hasta la selección de materiales, dispositivos necesarios y la configuración del sensor de velocidad. Se abordan las dificultades encontradas durante el diseño y se discuten los beneficios técnicos y estructurales del sensor. Además, se presenta la configuración utilizada para las pruebas, incluyendo condiciones como el flujo laminar y la influencia de la turbidez del agua en las mediciones.

El capítulo 4 está dedicado a la presentación y análisis de los resultados obtenidos. En este apartado se describe el proceso de calibración y procesamiento de datos del sensor, se examinan las mediciones realizadas en distintos tipos de agua, incluyendo agua potable y agua con clorofila; esto permite evaluar la precisión del sensor en diferentes condiciones ambientales, además de ser probado en condiciones semi reales, simulando una esorrentía. Así mismo, se discuten las limitaciones del algoritmo propuesto, señalando la necesidad de futuras mejoras para reducir el ruido y aumentar la precisión, especialmente en situaciones donde la turbidez y la dispersión de la luz juegan un papel significativo.

Finalmente, en el capítulo 5 se presentan las conclusiones del trabajo. Se realiza una comparación entre el sensor desarrollado y otros sensores comerciales, destacando las ventajas del dispositivo propuesto, como su bajo costo y facilidad de uso, pero también identificando áreas de mejora como la necesidad de ajustar el algoritmo y considerar la firma espectral del agua para identificar contaminantes o componentes específicos. Además, se plantean futuras investigaciones que incluyen el uso de RGB para abarcar todo el espectro visible, desarrollar una versión subacuática del sensor y la implementación de estaciones de monitoreo que permitan estudiar en tiempo real la regresión de playas y la distribución de nutrientes en ecosistemas marinos.

## 2. ESTADO DEL ARTE

En el desarrollo de este trabajo, se han empleado diversas herramientas y conceptos para construir una base teórica sólida con el objetivo de identificar y abordar las deficiencias en el seguimiento de la velocidad del flujo en el mar, específicamente a través del seguimiento de cambios en la absorción y dispersión de la luz en el perfil transversal. Se ha realizado un examen exhaustivo del estado del arte de los diversos correntímetros, proporcionando una visión integral de los avances actuales y los desafíos que enfrentamos en este campo con la implementación metodológica en óptica que utiliza LEDs y LDRs. Esta metodología es fundamental para nuestro enfoque que ofrece una visión completa para calcular la velocidad de flujo de agua, desde la teoría hasta la práctica, y resalta las oportunidades para la mejora y la innovación en este campo.

### 2.1. Precedentes del proyecto

En este apartado, se exponen diversas técnicas y metodologías que se emplean actualmente para estudiar la velocidad de flujo en los océanos y mares. Se destaca el uso de transductores acústicos, que transmiten y reciben señales acústicas para determinar la velocidad y dirección del flujo marino; otros como correntímetros electromagnéticos del que se requiere electrónica avanzada. Ambos métodos presentan relevancia en un monitoreo continuo enfatizando la gestión sostenible de los ecosistemas marinos.

Jichao Zhao et al. [13] se centra en el diseño de un nuevo dispositivo submarino para medir la velocidad de las corrientes oceánicas. El dispositivo incluye un barco de medición, un cable, un ancla fija y un detector de velocidad de corriente oceánica. El detector utiliza un medidor de corriente de diferencia de tiempo acústico, que es estable y ampliamente utilizado. Este dispositivo permite ajustar la profundidad del detector según las necesidades reales. Lo que facilita la medición de la velocidad del flujo en diferentes profundidades.

Sairajan Sarangapani [14] presenta un nuevo perfilador de corrientes acústico Doppler (ADCP, por sus siglas en inglés de Acoustic Doppler Current Profile), que utiliza un transductor de matriz en fase de múltiples frecuencias. Este ADCP permite la medición simultánea de perfiles de corriente de alta resolución en el océano superior o aguas poco profundas y en el océano profundo hasta 1500 metros. Al correlacionar las mediciones de 38 y 300 kHz, se mejoran las mediciones de resolución de velocidad. Los resultados se presentan en función del rango y las mediciones de velocidad para los transductores de matriz a dos frecuencias diferentes.

Gytre T. [15] utiliza tres tipos de medidores de corriente ultrasónicos, un medidor de corriente Doppler y dos medidores de corriente por tiempo de vuelo, manejando diferentes volúmenes de muestreo. Se centra en la importancia de la turbulencia en las interrelaciones depredador-presa del plancton, ya que aumenta la tasa de contacto entre estos organismos relativamente inmóviles. Se realizaron mediciones directas de turbulencia en Lofoten, Noruega, donde la mezcla turbulenta es generada principalmente por la mezcla inducida por las mareas y el oleaje. Los resultados indican que ambos tipos de instrumentos pueden ser utilizados para resolver la turbulencia a pequeña escala. Sin embargo, el ruido Doppler limita el rendimiento del medidor de corriente Doppler, mientras que la longitud de la trayectoria acústica limita el rendimiento de los medidores de corriente de tiempo de viaje.

MacVicar B. J, et al. [16] realizaron dos pruebas de campo para comparar el rendimiento de un Medidor de Corriente Electromagnético (ECM) y un Velocímetro Doppler Acústico (ADV) en ríos de lecho de grava. Las mediciones se realizaron en dos sitios con diferentes velocidades e intensidades de turbulencia. Los resultados confirmaron un acuerdo general entre los ECM y ADV, aunque con limitaciones. A altas intensidades de turbulencia, el ADV mostró comportamientos anómalos. Se estimaron errores en las mediciones del ADV utilizando cuatro métodos diferentes. La conclusión clave es que la tecnología ECM más antigua proporciona estimaciones más confiables de los parámetros de flujo en alta turbulencia.

El desarrollo de sensores que permiten medir este parámetro ha sido el tema de varios trabajos presentados en instituciones académicas y de investigación de todo el mundo. Además, se han realizado esfuerzos para aplicar nuevas tecnologías para mejorar la precisión u optar por alternativas más rentables. Dado que no se evidencia investigación previa o proyectos similares utilizando LEDs y LDRs para la detección de patrones y cálculo del flujo de agua, se requiere realizar diversas evaluaciones para definir las configuraciones óptimas del sensor, esto implica llevar a cabo pruebas exhaustivas para calibrar los componentes, validar los resultados obtenidos y compararlos con metodologías convencionales. Estas actividades son fundamentales para asegurar la precisión y fiabilidad de los datos recopilados en el desarrollo del sistema propuesto. Esto contribuye a un campo de estudio que es tanto relevante como activamente investigado.

## **2.2. Metodologías actuales**

Existen diversas metodologías para estimar la velocidad hidrodinámica que varían dependiendo del entorno de medición, la precisión, aplicación, entre otros. Entre ellos tenemos:

### **2.2.1. Sensores deprimógenos**

Este sensor se basa en el principio de continuidad y el teorema de Bernoulli, teniendo en cuenta una zona de estrechamiento brusco, es decir, una reducción del área de la sección transversal de la tubería; esto permite calcular la presión diferencial.

#### ***Ventajas***

- Fáciles de diseñar y fabricar
- Costo variable

#### ***Desventajas***

- Existe interacción directa entre el fluido y el sensor
- Puede producir incrustaciones como carbonatos, influyendo en las lecturas y el flujo
- Provoca caídas de presión no recuperables en el sistema

### **2.2.2. Caudalímetro de turbina**

Se apoya de la fuerza mecánica del fluido, haciendo girar una hélice que abarca toda la sección transversal, la frecuencia de giro es proporcional a la velocidad. Uno de los productos más conocidos aplicando este principio son los tipos Woltman.

#### ***Ventajas***

- Elevada resolución y precisión.
- Calibración lineal
- Bajo costo

#### ***Desventajas***

- La fricción continua descalibra el equipo
- Existe interacción directa entre el fluido y el sensor
- Puede producir incrustaciones como carbonatos, influyendo en las lecturas y el flujo.
- No recomendable para monitoreos a largo plazo.

### **2.2.3. Caudalímetro ultrasónico**

Es de destacar que acústicamente podemos distinguir dos metodologías.

La primera se basa en el tiempo de vuelo, explica que el medio por el que se transmiten las ondas acústicas tiene un valor de velocidad de propagación determinado únicamente por variables físicas como salinidad, temperatura y presión. Además, cabe mencionar que las ondas acústicas no viajan a la misma velocidad cuando es a favor que en contra de la corriente, gracias a esto podemos calcular la velocidad por la diferencia de tiempo entre las propagaciones acústicas ubicando los transductores a una distancia conocida [17].

La segunda metodología se basa en el efecto Doppler para medir la velocidad y dirección de las corrientes en la columna de agua. Estos equipos calculan la velocidad en base a la diferencia entre la frecuencia emitida y reflejada en base a las partículas presentes.

#### ***Ventajas***

- Altamente precisos
- Pueden determinar el perfil de corrientes a grandes profundidades
- Pueden ser utilizados en entornos con abundante masa de agua.
- Pueden transmitir los datos en tiempo real

#### ***Desventajas***

- Elevado costo de adquisición y mantenimiento
- La precisión se ve afectada en aguas turbias o con alta concentración de sólidos suspendidos.

### **2.2.4. Caudalímetro electromagnético**

Se basan en el teorema de inducción electromagnética de Faraday utilizando la fuerza electromotriz que induce el agua de mar cuando fluye a través de un campo electromagnético [18].

#### ***Ventajas***

- Elevada resolución y precisión.
- Puede aplicarse en entornos marinos a largo plazo
- Disminuye la interacción directa del fluido y el sensor

### ***Desventajas***

- Sensible a la presencia de campos electromagnéticos
- Mantenimiento especializado

Teniendo en cuenta lo investigado, estas metodologías o no son las más adecuadas para aplicarse en entornos marinos (caudalímetros deprimógenos, de turbina), principalmente debido a la necesidad exhaustiva de mantenimiento que requieren como consecuencias de las propiedades corrosivas del mar; y otros debidos a su elevado costo de adquisición (caudalímetros ultrasónicos, electromagnéticos) y costes de mantenimiento. Como resultado tenemos planteado un dispositivo que sea barato, preciso y con la mínima interacción con el entorno marino para evitar mantenimiento continuo.

### **2.3. Aplicaciones**

A continuación, exploramos los beneficios potenciales que el uso del sensor desarrollado podría ofrecer en la investigación de la velocidad hidrodinámica.

El estudio del flujo de agua en un estuario es crítico debido a la compleja interacción entre las corrientes fluviales y las mareas marinas. La mezcla de agua dulce del río con el agua salada del mar crea condiciones únicas que afectan tanto a la dinámica física como a la química del agua en esta región costera. La velocidad del flujo juega un papel crucial en la distribución de nutrientes e influencia en la biomasa fitoplanctónica. La monitorización precisa de estos flujos mediante este sensor puede proporcionar datos valiosos para entender cómo estos procesos impactan en la biodiversidad local, la productividad biológica y la estabilidad ambiental de la desembocadura del río Serpis en España [19].

En los últimos años la costa Valenciana, desde el delta del Ebro hasta el puerto de Denia, ha experimentado una erosión significativa debido a varios factores, como la construcción de barreras fluviales y litorales que interrumpen el flujo natural de sedimentos hacia el mar [20]. Estas barreras no solo causan erosión localizada al disminuir el suministro de sedimentos en ciertas áreas y fomentar su acumulación en otras, sino que también afectan la capacidad natural de las playas para mantener su estabilidad. Además, el impacto del calentamiento global, que conlleva un aumento en el nivel del mar, intensifica aún más estos procesos erosivos a lo largo del litoral. El sensor de velocidad de flujo basado en la detección de cambios en la absorción y dispersión de la luz puede proporcionar datos precisos y continuos sobre la dinámica sedimentaria

costera, permitiendo monitorear de manera efectiva la distribución de sedimentos y evaluar la efectividad de medidas de restauración como el dragado de materiales sedimentarios y la regeneración de playas. Esto no solo contribuiría al avance científico en la comprensión de los procesos de regresión costera, sino que también facilitaría la toma de decisiones informadas para la gestión sostenible.

Un avance significativo para estudiar y gestionar la dinámica de las aguas continentales y costeras es el estudio prestado a los mejillones dreissenidos en el hemisferio norte, cuya invasión continúa expandiéndose [21], el sensor ofrece la capacidad de evaluar directamente cómo las características hidrodinámicas del flujo de agua, como la velocidad y el caudal, influyen en los ecosistemas acuáticos. Este enfoque busca llenar una brecha de conocimiento similar a la identificada en los estudios sobre mejillones dreissenidos, permitiendo entender mejor cómo estas variables afectan la fertilización, el desarrollo larval, el reclutamiento juvenil y la biología general de las especies acuáticas. La monitorización detallada facilitada por el sensor puede revelar oportunidades para mitigar impactos negativos y fomentar prácticas de gestión que promuevan la sostenibilidad y la salud de los ecosistemas acuáticos frente a cambios ambientales globales y locales.

J. J. Piccolo et al. [22] destaca la importancia crítica de la velocidad del agua en la capacidad de juveniles de salmón coho (*Oncorhynchus kisutch*) y trucha arco iris (*Oncorhynchus mykiss irideus*) para detectar y capturar presas a la deriva. La investigación revela que a medida que la velocidad del agua aumenta, tanto el salmón coho como la trucha arco iris experimentan una notable disminución en la probabilidad de captura de presas y en la distancia desde la cual pueden detectarlas. Estos hallazgos subrayan cómo las variaciones en la velocidad del agua pueden influir significativamente en la eficiencia de alimentación de estas especies juveniles, lo cual es crucial para comprender y gestionar sus hábitats acuáticos de manera efectiva.

L. Pereda-Briones et al. [11] menciona que la influencia de olas y corrientes en la distribución de las praderas de fanerógamas marinas es crucial, ya que afecta al transporte y supervivencia de los propágulos de especies como *Posidonia oceanica*, *Cymodocea nodosa* y *Zostera Marina*. Se estudió la dispersión de los propágulos de estas especies en sustratos de diferentes complejidades bajo flujo unidireccional, obteniendo que las semillas de Zeta marina se mueven antes que las de qué *Posidonia oceanica* y *Cymodocea nodosa* en fondos arenosos planos. Se concluyó en que la captura de propágulos aumenta con la complejidad del fondo relacionado con la reducción del flujo y el espesor de la

capa límite. Estos hallazgos resaltan la importancia de desarrollar un sensor de velocidad hidrodinámica para estudiar estos ecosistemas y mejorar los planes de restauración.

Por estas razones proponemos un producto económico destinado al monitoreo de las aguas de la zona bentónica para evaluar el transporte de sedimentos, nutrientes y biomasa. Según lo investigado, no existe en la actualidad ningún sistema implementado que reúna las características de nuestro desarrollo: económico, resistente al medio subacuático y altamente preciso.

### **3. DESARROLLO DE LA PROPUESTA**

En esta sección se explica el diseño, desarrollo, ensamblaje y programación del sensor para medir la velocidad flujo.

#### **3.1. Principio de medición del flujo**

Se pretende desarrollar un sensor de flujo para medición in situ de la velocidad de flujo de las masas de agua costeras, además de las metodologías conocidas un enfoque alternativo para la medición del flujo es utilizando un sensor de turbidez basado en un sistema de LEDs y LDRs.

Este sistema puede ser una opción de bajo coste ya que aprovecha la capacidad de los LEDs para emitir luz y de los LDR para detectar cambios en la intensidad de la luz reflejada por las partículas en el agua, lo cual es susceptible a ser procesado. Al registrar estos valores en una sección transversal para buscar patrones similares en otra sección ubicada a una distancia conocida se puede determinar el tiempo y de esta forma se puede calcular el flujo.

La metodología medición de flujo basado en detección de cambios en la absorción y dispersión de la luz se ve como una opción de bajo coste y de infraestructura sencilla, además de que posibilita la obtención de datos confiables. Es importante aplicar esta metodología cerca de la zona bentónica, ya que los equipos utilizados para realizar estas mediciones requieren estabilidad en la instalación. La zona bentónica es el área más baja del océano y es donde se encuentra el suelo marino, esta zona es relativamente estable, lo que la hace ideal para la instalación del equipo y realizar mediciones o monitoreos continuos.

#### **3.2. Materiales**

Para el desarrollo de un sensor de flujo que mide cambios en la absorción y dispersión de la luz en entornos acuáticos se utilizó un conjunto específico de componentes electrónicos, los cuales explican a continuación el propósito y la función de cada uno de estos elementos en el contexto del diseño del sensor.

##### **3.2.1. Arduino Mega 2560 Rev3**

El Arduino Mega 2560 Rev3 es una placa de microcontrolador basada en el ATmega2560. Este microcontrolador es ideal para este sensor, ya que requiere una gran cantidad de entradas y salidas digitales y analógicas donde controlaremos y leeremos múltiples LEDs y LDRs (resistencias dependientes de la luz), gracias a esto la placa cumple con las características exigidas para manejar los 10 pares de LEDs y LDRs.

### **3.2.2. LEDs**

Los LEDs se utilizan en el sensor como fuentes de luz. Cuando se encienden, emiten un haz de luz que atraviesa el fluido en la tubería. La luz puede ser absorbida o dispersada por las partículas en el agua, lo cual será detectado por los LDRs correspondientes. El uso de 10 LEDs permite crear 5 pares de medición distribuidos de manera estratégica a lo largo de la tubería, asegurando que se capturen variaciones de flujo y de partículas en diferentes puntos, lo que ayuda a disminuir los errores.

### **3.2.3. LDRs**

Los LDRs son resistencias cuya resistencia eléctrica varía según la cantidad de luz que incide sobre ellos. En este proyecto, los LDRs están emparejados con los LEDs y se colocan de manera opuesta a 180 grados, capturando la luz emitida por los LEDs después de que ha atravesado el fluido. Si el flujo de agua contiene partículas, estas afectarán la cantidad de luz que llega al LDR, lo que se reflejará en un cambio en la resistencia del LDR. Este cambio es captado y almacenado por el nodo.

### **3.2.4. Protoboards**

Las protoboards son placas de prueba que facilitan la conexión temporal de componentes electrónicos sin necesidad de soldadura acordes al circuito electrónico propuesto. En este sensor, las protoboards se utilizan para conectar los LEDs, LDRs, resistencias y cables al Arduino Mega.

### **3.2.5. Cables**

Los cables puente (jumper wires) se utilizarán para conectar los LEDs y LDRs en las protoboards y luego llevar las señales a los pines digitales y analógicos del Arduino.

### **3.2.6. Resistencias de 220 $\Omega$**

Las resistencias de 220  $\Omega$  se conectan en serie con los LEDs para limitar la corriente que pasa a través de ellos. Dado que los LEDs son sensibles a la corriente, estas resistencias protegen los LEDs de posibles daños al regular la corriente a un nivel seguro. Sin estas resistencias, los LEDs podrían quemarse o funcionar de manera ineficiente.

### **3.2.7. Resistencias de 22 K $\Omega$**

Las resistencias de 22 K $\Omega$  se utilizan en conjunto con los LDRs para formar un divisor de tensión. Este divisor permite que los cambios en la resistencia del LDR, causados por variaciones en la luz recibida, se traduzcan en un cambio de voltaje que pueda ser leído por el nodo. Esta resistencia maximiza el rango de valores analógicos [10], un rango más amplio de medición permite capturar una mayor variedad de señales con precisión y resolución en las lecturas.

### **3.2.8. Carcasa**

La carcasa forma parte del soporte estructural y de montaje de los LEDs y LDRs manteniéndolos en las ubicaciones estratégicas y precisas que se requieren, además, evita o reduce la influencia de la luz ambiental en las lecturas de los LDRs.

### **3.3. Contratiempos del diseño**

Durante el desarrollo del sensor, se identificaron varios obstáculos significativos que afectaron tanto el diseño físico como la funcionalidad del sistema. A continuación, se describen los principales desafíos y las soluciones implementadas.

#### **3.3.1. Metodología de Desarrollo**

El proceso de desarrollo del sensor incluyó una exhaustiva investigación y evaluación de diversas metodologías para la medición del flujo. Se exploraron técnicas electromagnéticas, mecánicas y acústicas para encontrar la solución más adecuada. La elección del método basado en la absorción y dispersión de la luz fue el resultado de una evaluación comparativa que consideró la precisión, el costo y la viabilidad de cada técnica.

#### **3.3.2. Funcionamiento de los LEDs**

Otro contratiempo importante fue el debate sobre cómo operar los LEDs en el sensor. Inicialmente, se evaluó la opción de secuenciar los LEDs de manera intermitente, pero el retardo que posee el LDR para la detección de los cambios en la absorción y dispersión de la luz generaba incertidumbre, por ello, se consideró la posibilidad de operar los LEDs de forma continua para obtener una medición constante. Este cambio en el enfoque requirió tiempo adicional para ajustar la programación y el hardware del sensor, así como para validar que el nuevo esquema de funcionamiento proporcionara datos confiables y coherentes.

#### **3.3.3. Tiempo y Requisitos de las Impresiones 3D**

Uno de los primeros desafíos fue el tiempo necesario para imprimir en 3D la carcasa del sensor. La impresión de cada componente de la carcasa fue un proceso largo debido a la complejidad de las piezas y los detalles necesarios para asegurar la funcionalidad técnica y minimizar la influencia de la luz ambiental. Además, el diseño de la carcasa tuvo que ser ajustado para cumplir con los requisitos específicos de la impresora 3D. Esto incluyó evitar ángulos de gravedad negativa y partes horizontales que

podieran interferir en la definición de impresión. Estos ajustes y pruebas previas causaron demoras adicionales, ya que cada error en el diseño podía requerir una nueva iteración del proceso.

### **3.3.4. Frecuencia de Lectura y Procesamiento de Datos**

El sistema también enfrentó desafíos relacionados con la frecuencia de lectura y el procesamiento de datos. En la etapa inicial, se intentó programar el nodo para calcular directamente la velocidad del flujo en tiempo real. Sin embargo, esta metodología presentó problemas debido a la complejidad de los cálculos en tiempo real y las dificultades en la interpretación precisa de los datos durante las lecturas. El procesamiento en tiempo real no solo era computacionalmente intensivo, sino que también resultó en lecturas inconsistentes. Para superar este problema, se optó por una solución alternativa: programar el nodo para recolectar y almacenar todos los datos de cada medición. Esta estrategia permitió descargar los datos al final de cada sesión de medición para un procesamiento posterior más detallado y preciso.

## **3.4. Diseño del sensor**

El diseño del sensor para la medición precisa de la velocidad del flujo de agua se basa en la disposición estratégica de pares de LED y LDR a lo largo de la sección transversal de una tubería. Cada par está separado por 1 cm en el eje Y y dispuesto con una inclinación de 36°, permitiendo un monitoreo exhaustivo y sensible de las propiedades ópticas del flujo como se visualiza gráficamente en la Figura 1 y la Figura 2.

### **3.4.1. Configuración Inicial**

El primer par de LED y LDR se sitúa inicialmente en el plano horizontal de la tubería. Aquí, el LED se coloca a 0 grados en el eje x, mientras que el LDR se posiciona exactamente opuesto a 180 grados en el mismo plano horizontal. Esta alineación asegura que el LDR detecte la luz emitida por el LED a través del flujo de agua con precisión.

### **3.4.2. Disposición a lo largo de la Tubería**

Cada par de sensores se desplaza a lo largo del eje Y para capturar datos en diferentes secciones y ángulos de inclinación:

#### ***Segundo Par***

Ubicado a 1 cm de profundidad en el eje Y, el LDR se inclina a 36 grados respecto al eje horizontal, mientras que el LED a 216 grados.

### **Tercer Par**

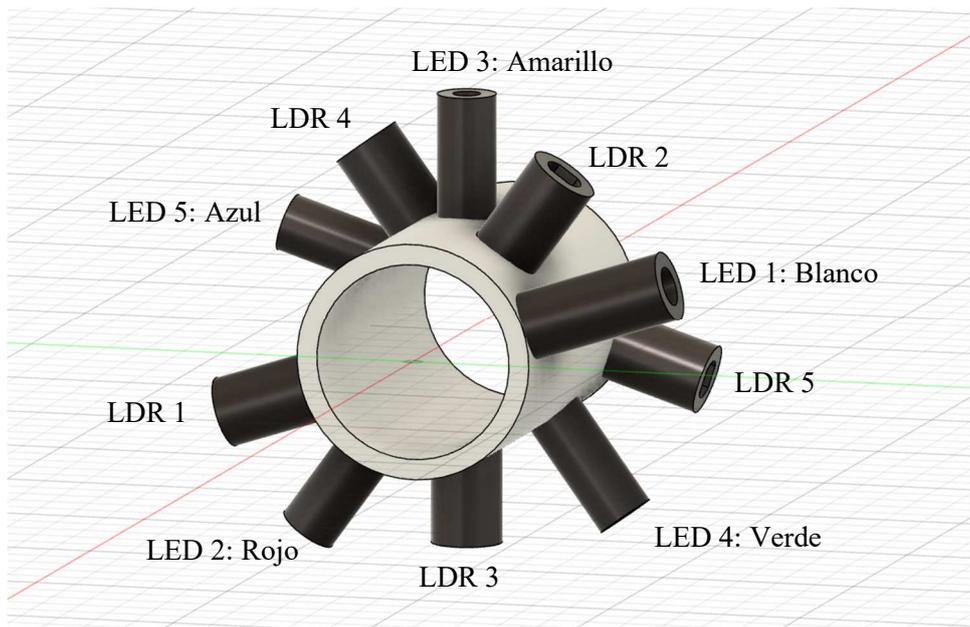
Posicionado a 2 cm de profundidad en el eje Y, el LED se orienta a 72 grados y el LDR a 252 grados.

### **Cuarto Par**

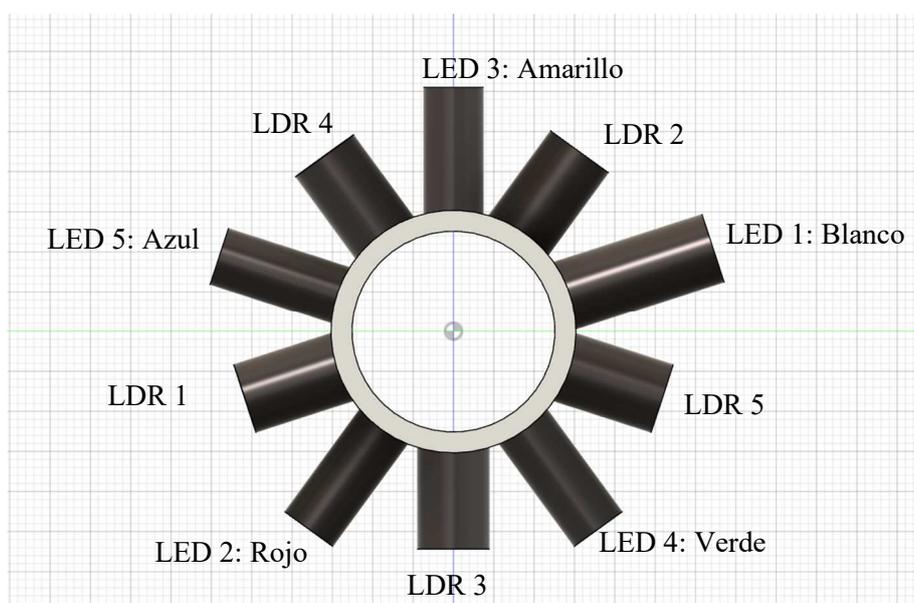
Colocado a 3 cm de profundidad en el eje Y, el LDR se sitúa a 108 grados y el LED a 288 grados.

### **Quinto Par**

Finalmente, a 4 cm de profundidad en el eje Y, el LED se coloca a 144 grados y el LDR a 324 grados.



**Figura 1.** Distribución de los LEDs y LDRs a lo largo de la tubería



**Figura 2.** Vista frontal

### **3.4.3. Ventajas Técnicas**

Cada par de LED y LDR opera en oposición para minimizar interferencias entre mediciones consecutivas, garantizando la precisión de las mediciones de absorción y dispersión de la luz. La configuración del sensor facilita su instalación, mantenimiento y recopilación de datos en entornos subacuáticos, asegurando su fiabilidad y durabilidad en aplicaciones industriales y ambientales; además, ofrece varias ventajas:

#### ***Cobertura Integral de la Sección Transversal***

La distribución de los sensores en cinco pares, cada uno separado por 36 grados y a diferentes cotas (eje Y), asegura una cobertura completa de la sección transversal de la tubería. Esta disposición garantiza que los cambios en la absorción y dispersión de la luz se detecten en múltiples puntos, proporcionando un perfil detallado y preciso de las condiciones dentro de la tubería. Esto es esencial para obtener datos exactos sobre el flujo del agua.

#### ***Minimización de la interferencia entre sensores***

Al posicionar los LEDs y LDRs en pares opuestos y escalonados verticalmente a 1 cm de distancia, se minimiza la interferencia entre los sensores adyacentes. Esta disposición asegura que la medición de un par no afecte la precisión de las mediciones de los otros pares, mejorando así la confiabilidad y exactitud de los datos recolectados.

#### ***Incremento del rango de velocidades estudiadas***

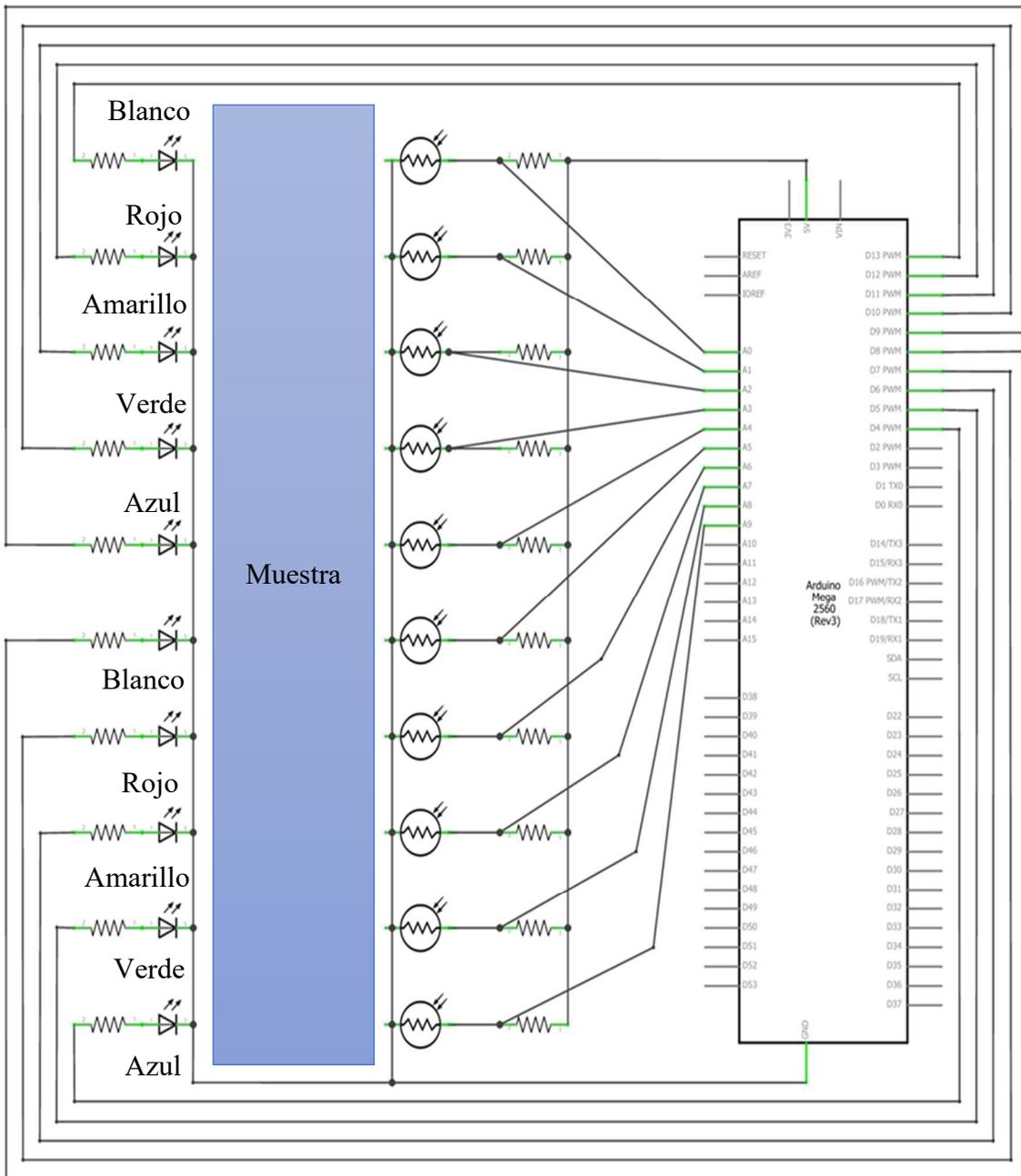
La reducción de la distancia a 1 cm en el eje Y entre cada par de sensores permite incrementar el rango de velocidades de flujo que el sensor puede estudiar. Esta proximidad facilita la detección de cambios más sutiles en la absorción y dispersión de la luz, ampliando la capacidad del sensor para monitorear flujos de agua de diferentes velocidades con una elevada precisión.

#### ***Optimización del espacio en la tubería***

La inclinación de 36 grados entre cada par de sensores permite una disposición compacta y eficiente, aprovechando al máximo el espacio disponible. Esto es especialmente ventajoso en aplicaciones donde el espacio es limitado y se requiere una instalación que no interfiera con el flujo natural del agua.

### **3.5. Configuración del sensor**

La programación de este sensor se realiza en un Arduino Mega 2560rev3, debido a la necesidad de tener múltiples entradas para los LEDs y LDRs basado en el circuito eléctrico mostrado en la Figura 3.



**Figura 3.** Circuito eléctrico del nodo propuesto

El sensor se basa en un conjunto de LEDs y fotodiodos (LDRs) para medir la velocidad de flujo en una tubería. Los LEDs emiten luz en diferentes longitudes de onda (blanco, rojo, amarillo, verde y azul), y los LDRs detectan la cantidad de luz que se dispersa o se absorbe en el fluido que fluye a través de la tubería como se ve en la Figura 4. El proceso comienza con la activación de los LEDs, que alcanzarán su intensidad máxima. Una vez que los LEDs están en la máxima intensidad y que los LDRs se han estabilizado, los LDRs comienzan a tomar mediciones cada 10 ms. Estas mediciones se realizan en dos secciones de la tubería (cabezales). En cada cabezal, se recogen datos de

los cinco pares de LEDs y LDRs. Estos datos se comparan para encontrar patrones en los cambios de absorción y dispersión de la luz, lo que permite calcular el tiempo que tarda el trazador o en su defecto solidos suspendidos en pasar de una sección a otra. Una vez que se detectan los patrones, se restan los tiempos de detección del décimo LDR con el quinto LDR. Teniendo en cuenta la distancia conocida entre los dos cabezales y el tiempo que se ha procesado se puede determinar la velocidad de flujo.

Este sensor aprovecha las propiedades de la luz y su interacción con los fluidos para medir la velocidad de flujo de una manera no invasiva. Su diseño y configuración están justificados por su capacidad para proporcionar mediciones rápidas y precisas utilizando componentes relativamente simples y asequibles.

### 3.6. Condiciones de pruebas

La identificación y corrección de errores ya sean aleatorios o sistemáticos, se facilita significativamente mediante el control riguroso de las variables involucradas en el proceso, entre ellas están:

#### 3.6.1. Flujo laminar

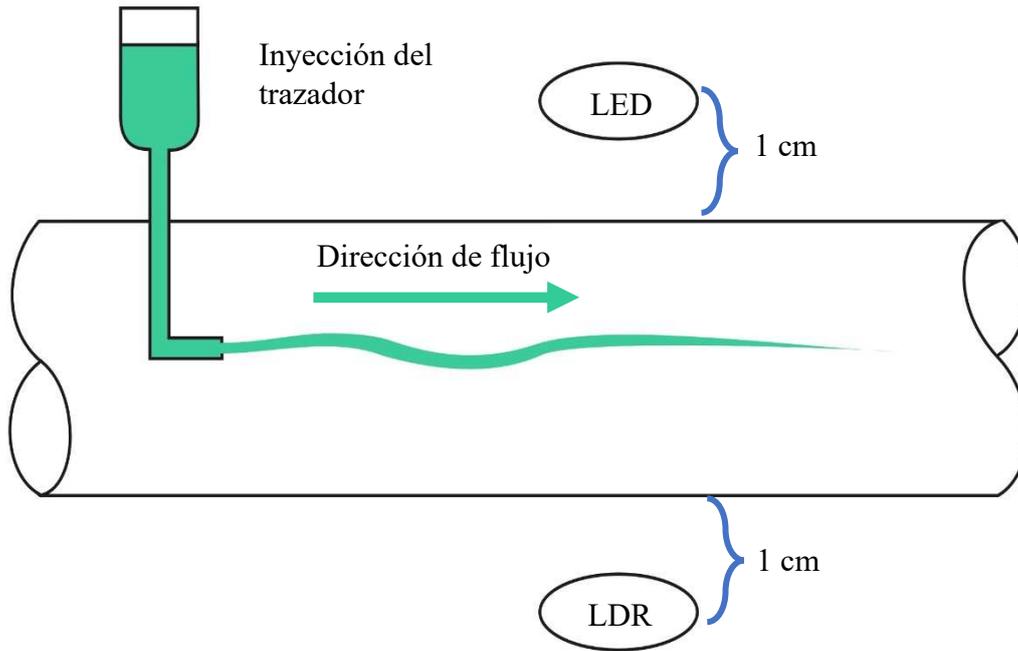
El oceano presenta una estratificación compleja, con distintas capas que poseen propiedades físicas muy distinguibles entre ellas. Esta estratificación resulta en un transporte de masa y calor muy lento. Las velocidades verticales en el océano son extramadamente bajas, en el orden de milímetros por día. No obstante, las velocidades horizontales presentan mayor relevancia, ya que son responsables de diversos fenómenos de transporte que influyen en la variabilidad biológica, química y física del ecosistema marino. El flujo laminar es importante para mantener las condiciones controladas y facilitar el estudio de sensor propuesto. En este flujo, las partículas del fluido se desplazan en capas paralelas (no hay mezcla), por lo tanto, para una velocidad máxima, se tiene:

Numero de Reynolds ( $N_{Re}$ )	:	2100
Diámetro ( $D$ )	:	0,0254 m
Salinidad	:	35 psu
Temperatura	:	20 °C
Viscosidad cinemática ( $\nu$ )	:	0,000001082 $m^2/s$

Reemplazando en la ecuación

$$N_{Re} = \frac{V \cdot D}{\nu} \quad (1)$$

Se obtiene una velocidad máxima aproximada de flujo de 9,0  $cm/s$



**Figura 4.** Sistema propuesto de medición experimental

### 3.6.2. Pruebas

Tomando en cuenta la velocidad máxima de flujo, se calcula el caudal máximo de flujo ya que se medirá por aforo.

$$Q = V \cdot A \quad (2)$$

Donde:

$Q$ : Caudal ( $cm^3$ )

$V$ :: Velocidad ( $cm/s$ )

$A$ : Área de la sección transversal ( $cm^2$ )

Se obtiene un caudal máximo de  $45,60 \text{ cm}^3$ .

### 3.6.3. Orígenes de la turbidez

En la Tabla 1 se incluye la turbidez de los fluidos con los que se trabaja. Se utilizó el turbidímetro comercial modelo TU-2016, esto para evaluar los niveles máximos de eficiencia el sensor, tenemos:

**Tabla 1.** Fluidos de experimentación

Fluido	Turbidez (NTU)
Agua potable	0
Agua con clorofila	58
Escorrentía	173
Trazador	249

### 3.6.4. Trazador

El trazador se preparó con un extracto de *Lactuca sativa*. Para prepararlo se utilizó 10 hojas de esta planta con 100 ml de agua a fin de que simule los sólidos suspendidos presentes en el océano y la clorofila, este fluido será el que marcará una diferencia en las lecturas de los LDRs. Se ingresó al sistema 20ml durante tres segundos aproximadamente, con un intervalo de dos segundos entre medida hasta finalizar el muestreo.

### 3.6.5. Velocidad del sistema

Para que la velocidad del sistema y las condiciones no cambien durante el muestreo se calculó la ecuación que rige la velocidad en base al tiempo de muestreo, esto se realizó tabulando valores en diferentes lapsos de tiempo como se muestran en la Tabla 2 por el método de aforo, donde el tiempo de medición es el calculado para llenar el volumen del recipiente de aforo, la velocidad se calcula en base al caudal y el área de la sección transversal.

**Tabla 2.** Tabla de tabulación de velocidad del sistema

Nº	Tiempo de medición (s)	Volumen medido (cm <sup>3</sup> )	Caudal (cm <sup>3</sup> /s)	Velocidad (cm/s)	Tiempo Total (s)
1	21,06	930	44,15	8,71	13,06
2	23,24	990	42,61	8,41	59,26
3	23,68	925	39,06	7,71	165,26
4	24,08	905	37,58	7,42	209,45
5	26,11	942	36,08	7,12	254,53
6	28,90	992	34,32	6,77	307,07
7	29,11	948	32,57	6,43	359,53
8	30,20	920	30,46	6,01	422,38
9	33,87	962	28,40	5,61	483,97

#### 3.6.5.1. Propagación de errores

Para estas mediciones se ha utilizado diversos dispositivos analógicos y digitales, entre estos tenemos: la probeta (mínima magnitud = 10 cm<sup>3</sup>), pie de rey (mínima magnitud = 0,01 cm) y cronómetro (mínima magnitud = 0,01 s). En este contexto, la velocidad no se mide directamente, sino que se deriva a partir de tres variables distintas: el volumen de agua medido, el diámetro de la tubería y el tiempo de aforo. Esta fórmula involucra productos y cocientes de estas variables, cada una con su propio error de medición, por esta razón se calcula la propagación de errores para determinar cómo las incertidumbres individuales influyen en el error total de la velocidad del sistema. Para este caso en particular se aplica la propagación de errores de logaritmo neperiano para calcular el error absoluto de la velocidad [23]. Para ello definimos la ecuación de velocidad:

$$v = \frac{\pi \times D^2 \times V}{4 \times t} \quad (3)$$

Donde:

$D$ : Diámetro ( $cm$ )

$V$ : Volumen ( $cm^3$ )

$t$ : Tiempo ( $s$ )

$v$ : Velocidad ( $cm/s$ )

Se toma el logaritmo neperiano a cada término de la ecuación, se aplica la propiedad de logaritmos, luego derivamos con respecto a sus variables correspondientes y despejamos  $dv$ :

$$dv = v \left( 2 \frac{dD}{D} + \frac{dV}{V} - \frac{dt}{t} \right) \quad (4)$$

Ahora identificamos los elementos diferenciales con errores, cambiando el signo de aquellos que lo presenten negativo obteniendo la siguiente ecuación.

$$\Delta v = v \left( 2 \frac{\Delta D}{D} + \frac{\Delta V}{V} + \frac{\Delta t}{t} \right) \quad (5)$$

Donde:

$\Delta v$ : Error absoluto en la velocidad

$\Delta D$ : Error en el diámetro = 0,01 cm (error digital)

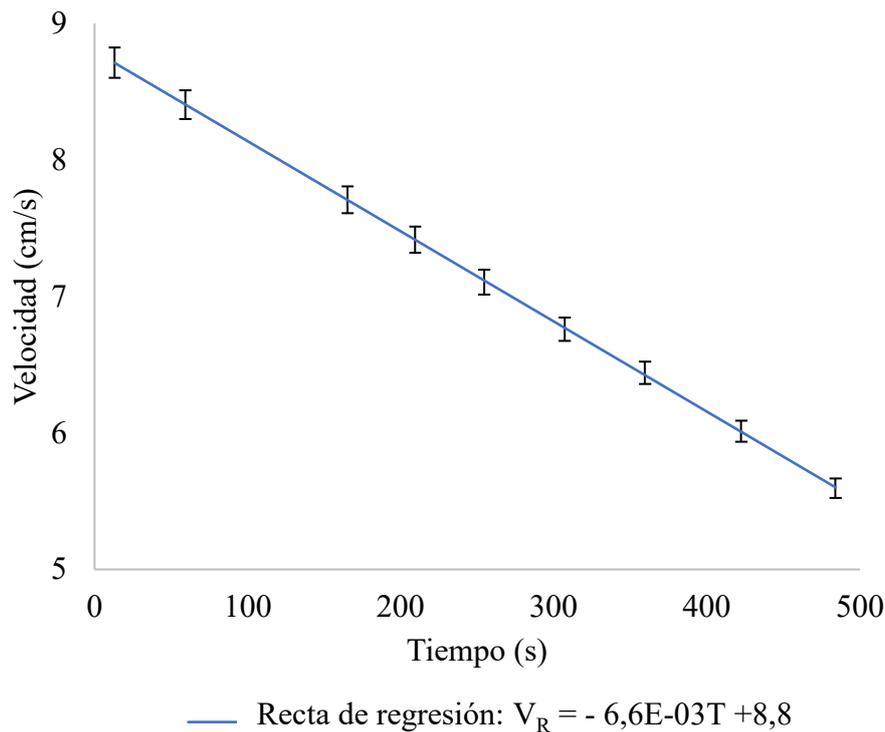
$\Delta V$ : Error en el Volumen = 0,005  $cm^3$  (error analógico)

$\Delta t$ : Error en el tiempo = 0,01 s (error digital)

El valor del diámetro es constante (2,54 cm), volumen medido y tiempo de medición se tomarán de la Tabla 2. En la Tabla 3 se muestran los resultados de error absoluto en cada medición. La tendencia general de la velocidad y los errores se exponen en la Figura 5.

**Tabla 3.** Tabla de velocidades y propagación de errores.

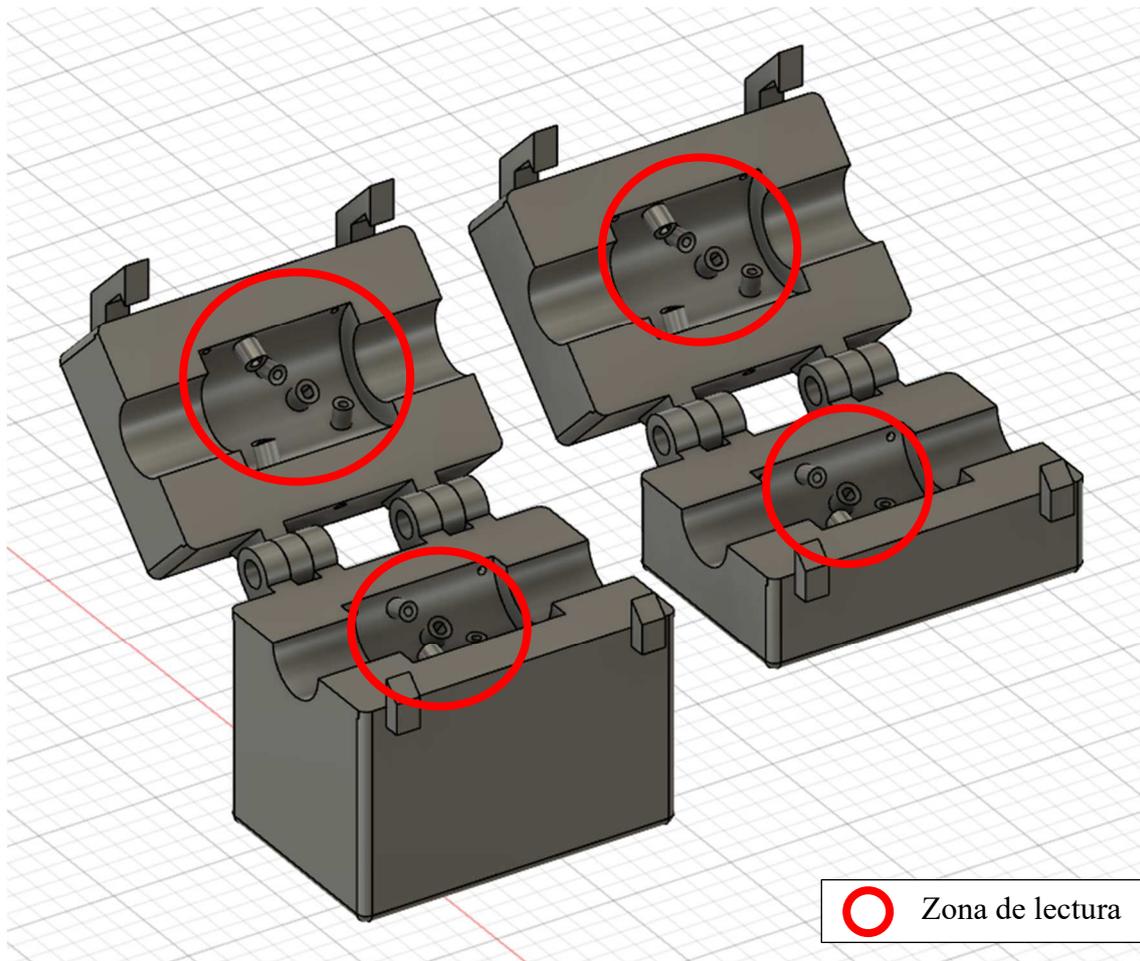
N°	Tiempo Total (s)	Velocidad (cm/s)	Error absoluto (cm/s)
1	13,06	8,71	0,11
2	59,26	8,41	0,11
3	165,26	7,71	0,10
4	209,45	7,42	0,10
5	254,53	7,12	0,09
6	307,07	6,77	0,09
7	359,53	6,43	0,08
8	422,38	6,01	0,08
9	483,97	5,61	0,07



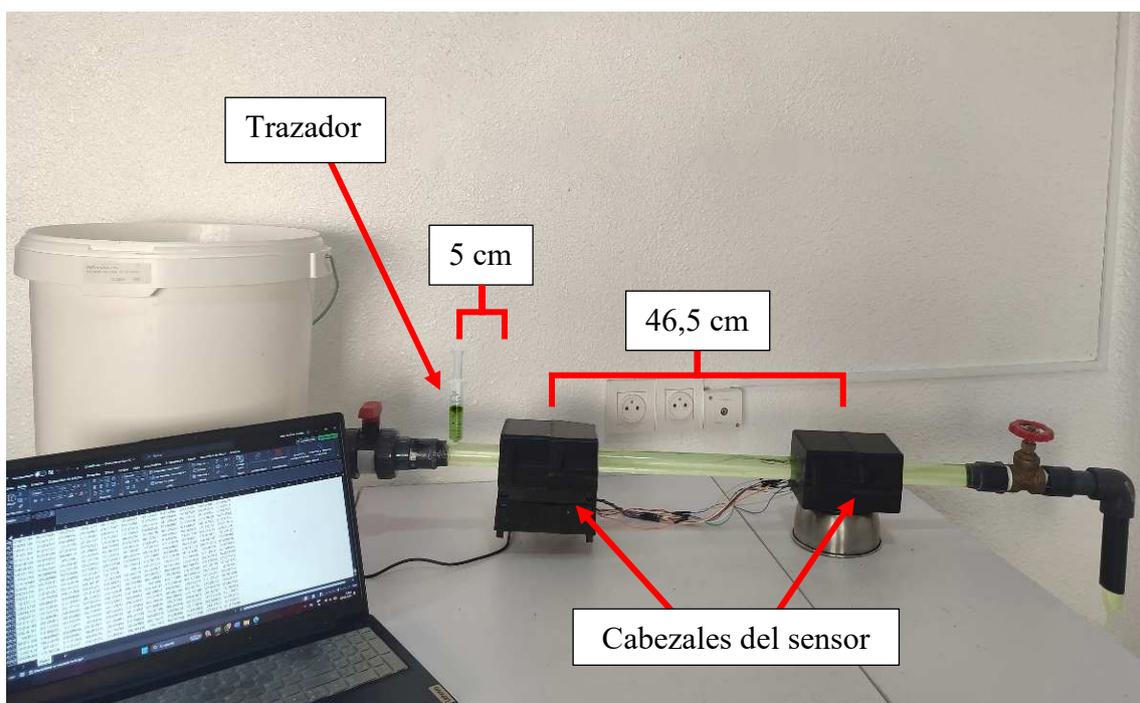
**Figura 5.** Recta de regresión del comportamiento de la velocidad en el sistema

Basándonos en las consideraciones técnicas descritas en el apartado previo, la Figura 6 muestra el diseño final de la carcasa del sensor, la cual está diseñada para albergar los componentes electrónicos, disminuir la influencia del exterior en las mediciones y proteger el circuito electrónico del agua. Se observa un diseño modular con bisagras para facilitar su apertura y cierre. Esto facilita el montaje asegurando que los cabezales mantengan una alineación precisa para la medición donde cada cabezal posee cinco pares de LEDs y LDRs cubriendo toda la sección transversal de la tubería. Además, se observa que cada LED y LDR se ubica estratégicamente manteniendo la distribución mostrada en la Figura 1 y la Figura 2.

En la Figura 7 se muestra el proceso experimental de muestreo y trabajo del sensor. Se muestra la disposición del sistema experimental, aquí se ubica el trazador a 5 cm antes del primer cabezal, este cabezal mantiene una distancia de 46,5 cm con respecto al segundo cabezal tomando en cuenta los ejes centrales de ambos. El sistema de lectura trabaja con un Arduino Mega 2560Rev3 el cual realiza la medición y envía en tiempo real los datos obtenidos a la computadora



**Figura 6.** Diseño estructural 3D de la carcasa del sensor.



**Figura 7.** Toma de lecturas en el sistema propuesto, agua con clorofila.

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Obtención de datos

Para la obtención de los datos se utilizó un Arduino Mega 2560 Rev3. El proceso de recopilación de datos comenzó con la activación secuencial de todos los LEDs, esto permitió que cada LDR establezca sus lecturas y estar a la espera de que se le ordene de forma cíclica la lectura de los valores analógicos de cada uno en intervalos de tiempo regulares (10ms) para ello se le implementó el siguiente código:

```
for (int i = 0; i < 10; i++) {  
    int valorLDR = analogRead(LDR[i])}
```

Estos datos se almacenaron temporalmente en la memoria del microcontrolador, posteriormente se exportaron a un archivo CSV para facilitar el procesamiento y análisis planteado.

### 4.2. Procesamiento de datos

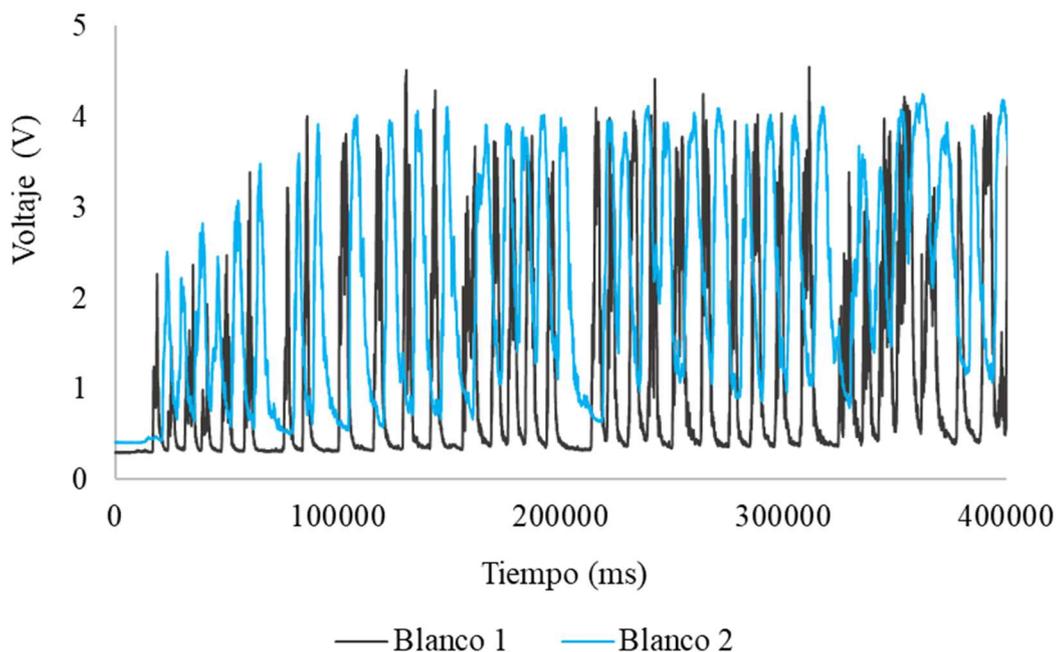
Para todos los conjuntos de datos se procedió a convertir las lecturas al voltaje correspondiente, el Arduino Mega 2560 Rev3 cuenta con una resolución de 10 bits en sus entradas analógicas, es decir, el rango de valores analógicos es de 0 a 1023. Considerando que el voltaje de alimentación es de 5V, se llevó a cabo la conversión a voltaje. Esto permitió estandarizar los datos para poder analizarlos en conjunto, todo este proceso se llevó a cabo en el software Matlab R2024a [24], donde:  $max\_col = 1023$  y  $new\_max = 5$ .

$$normalize\_volt = @(col, max\_col, new\_max) ((col / (max\_col)) * new\_max)$$

#### 4.2.1. Mediciones en agua potable

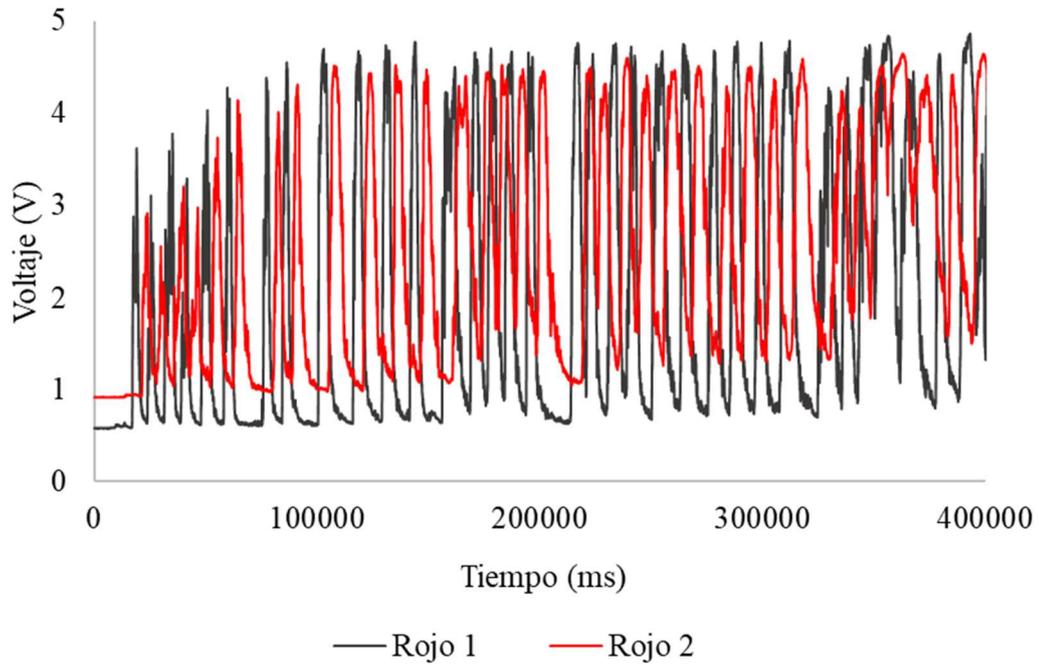
El fluido utilizado en la primera medición fue agua potable. Dado que el agua presenta una turbidez de 0 NTU, los cambios en la absorción y dispersión de la luz a diferentes longitudes de onda (colores) son muy pronunciadas. Esta característica de la turbidez proporciona una alta resolución en las lecturas, permitiendo una evaluación precisa de las fluctuaciones de la luz. A su vez, simplifica el proceso de desarrollo y estudio del algoritmo necesario para estimar la velocidad del trazador en cada instante de tiempo.

En la Figura 8 se muestran los voltajes que van desde un valor mínimo de 0V y un valor máximo de 5V. Estos voltajes son resultado de los cambios en la absorción y dispersión de la luz del LED blanco durante el periodo de muestreo (400000 milisegundos) causados por el flujo de agua. Estas lecturas se registraron en función del tiempo, medido en milisegundos (ms). Las fluctuaciones presentes en las gráficas representan los momentos específicos en los cuales el trazador se mueve a través de la zona de lectura del sensor. Durante estos instantes se detectan cambios en la absorción y dispersión de la luz detectada por el sensor, lo que se traduce en fluctuaciones que generan curvas pronunciadas. Además, se observa una notable similitud entre las series de datos capturados, aunque con un desfase temporal claro entre la serie 1 (primer cabezal) y la serie 2 (segundo cabezal). Este desfase temporal es un factor crítico para calcular la velocidad del trazador. En las lecturas del primer cabezal (Blanco 1) se tiene un máximo de 4,55V , un mínimo de 0,29V y una media de 1,09V; mientras que el segundo cabezal (Blanco 2) tiene un máximo de 4,25V, un mínimo de 0,41V y 2,10V de media.



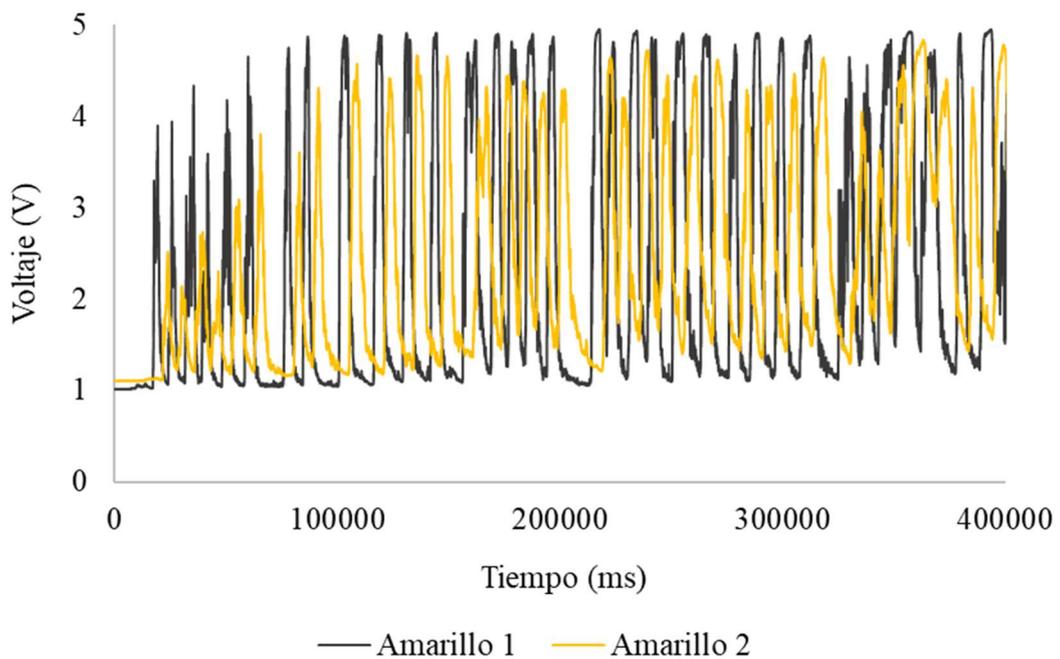
**Figura 8.** Lecturas en el tiempo de muestreo, LED blanco, agua potable.

En la Figura 9 se muestran los voltajes, resultado de los cambios en la absorción y dispersión de la luz del LED rojo durante el muestreo. En las lecturas las fluctuaciones generan 34 curvas muy pronunciadas en ambos cabezales. El primer cabezal (Rojo 1) tiene un máximo de 4,86V, un mínimo de 0,57V y una media de 2,04V; mientras que el segundo cabezal (Rojo 2) un máximo de 4,64V, un mínimo de 0,91V y 2,52V de media.



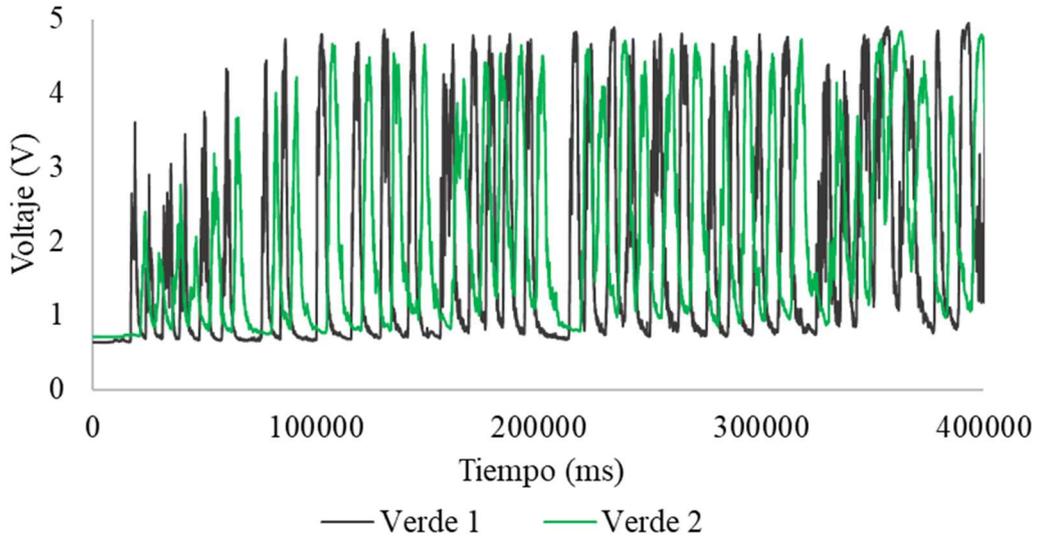
**Figura 9.** Lecturas en el tiempo de muestreo, LED rojo, agua potable.

En la Figura 10 se muestran los voltajes, resultado de los cambios en la absorción y dispersión de la luz del LED amarillo durante el muestreo. Las fluctuaciones generan 34 curvas muy pronunciadas. El primer cabezal (Amarillo 1) tiene un máximo de 4,95V, un mínimo de 1,01V y una media de 2,37V; mientras que el segundo cabezal (Amarillo 2) un máximo de 4,84V, un mínimo de 1,10V y 2,43V de media.



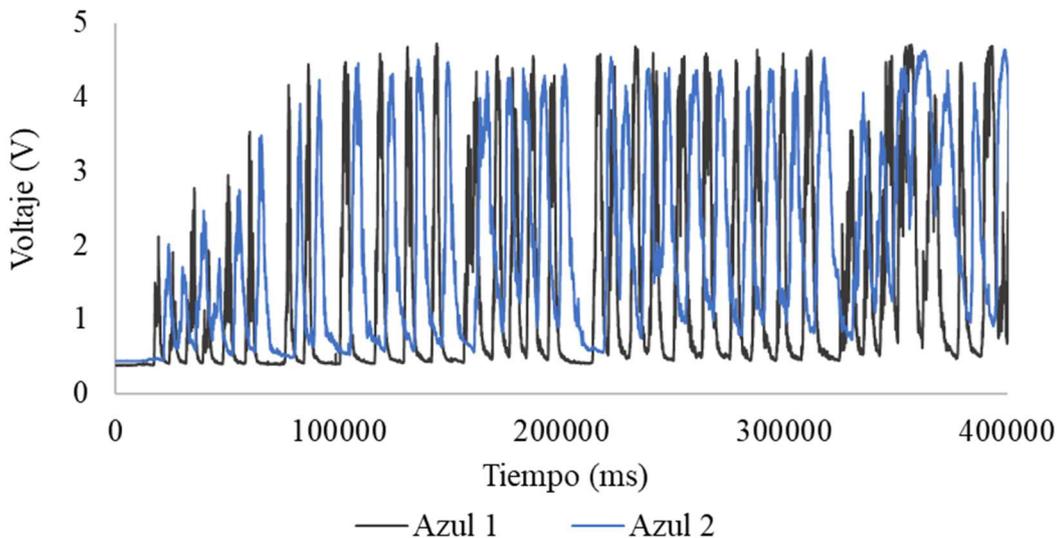
**Figura 10.** Lecturas en el tiempo de muestreo, LED amarillo, agua potable.

En la Figura 11 se muestran los voltajes, resultado de los cambios en la absorción y dispersión de la luz del LED verde durante el muestreo. En las lecturas, las fluctuaciones generan 34 curvas muy pronunciadas. El primer cabezal (Verde 1) tiene un máximo de 4,95V, un mínimo de 0,63V y una media de 1,86V; mientras que el segundo cabezal (Verde 2) un máximo de 4,83V, un mínimo de 0,71V y 2,09V de media.



**Figura 11.** Lecturas en el tiempo de muestreo, LED verde, agua potable.

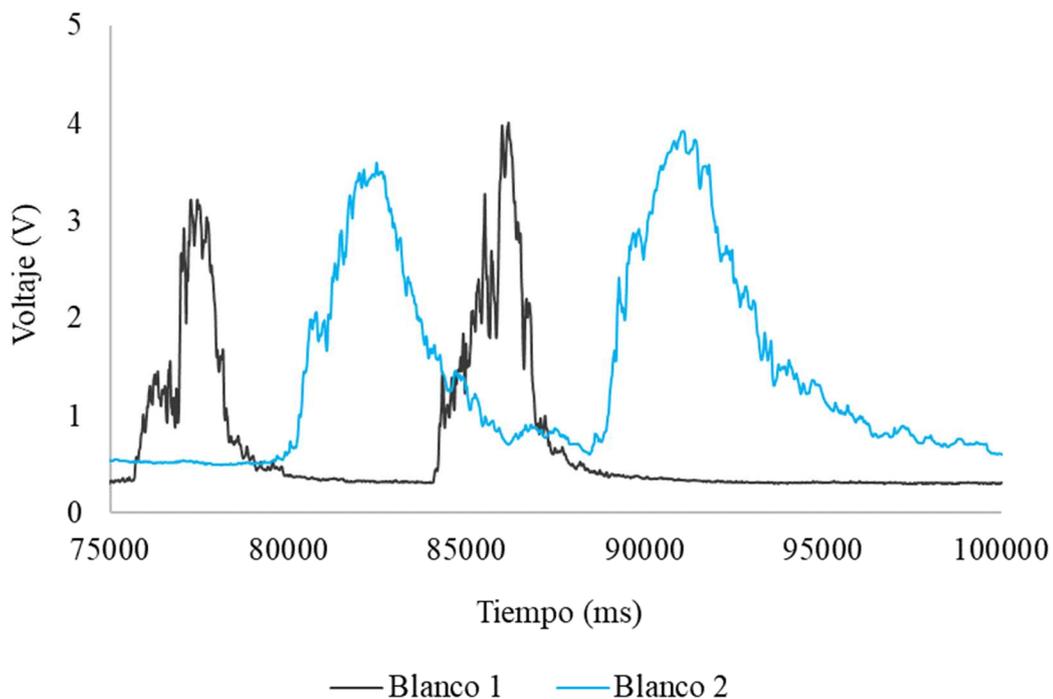
En la Figura 12 se muestran los voltajes, resultado de los cambios en la absorción y dispersión de la luz del LED azul durante el muestreo. En las lecturas, las fluctuaciones generan 34 curvas muy pronunciadas en ambos cabezales. El primer cabezal (Azul 1) tiene un máximo de 4,73V, un mínimo de 0,38V y una media de 1,38V; mientras que el segundo cabezal (Azul 2) un máximo de 4,64V, un mínimo de 0,44V y 1,98V de media.



**Figura 12.** Lecturas en el tiempo de muestreo, LED azul, agua potable.

#### 4.2.1.1. Lecturas ampliadas de agua potable

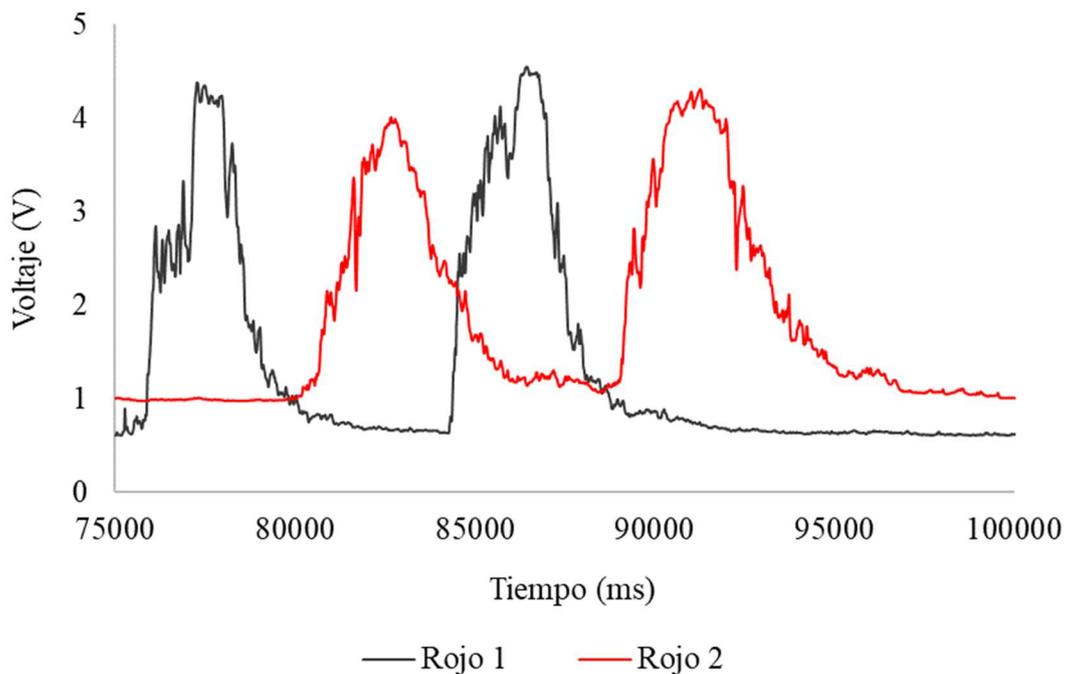
En la Figura 13 se muestran los voltajes, resultado de los cambios en la absorción y dispersión de la luz del LED blanco entre los tiempos de 75000 ms a 100000 ms. Se observa en mayor detalle los fenómenos enunciados anteriormente. Las mediciones permiten destacar con buena resolución el desfase temporal entre las curvas, esta es la característica clave en el desarrollo del algoritmo. En las lecturas correspondientes al primer cabezal (Blanco 1), las fluctuaciones tienden a incrementarse generando dos curvas muy pronunciadas. La primera curva posee un máximo de 3,22V, un mínimo de 0,32V y una media de 1,15V; mientras que la segunda posee un máximo de 4,01V, un mínimo de 0,33V y una media de 1,06V. En el segundo cabezal (Blanco 2) la primera curva posee un máximo de 3,60V, un mínimo de 0,63V y una media de 2,49V; mientras que la segunda posee un máximo de 3,92V, un mínimo de 0,63V y una media de 1,90V. Se observa que, en el primer cabezal, la curva parte de valores mínimos, alcanzan varios picos y luego cae rápidamente a valores mínimos. En contraste, se observa que la curva correspondiente al segundo cabezal no solo presenta un descenso gradual en los valores, sino que también presenta mayor dispersión temporal. Esta expansión de la curva se puede atribuir a la difusión del trazador a lo largo de la sección de la tubería como consecuencia de flujo turbulento y los accesorios del sistema.



**Figura 13.** Ampliación de lecturas desde 75000 ms a 100000 ms, LED blanco.

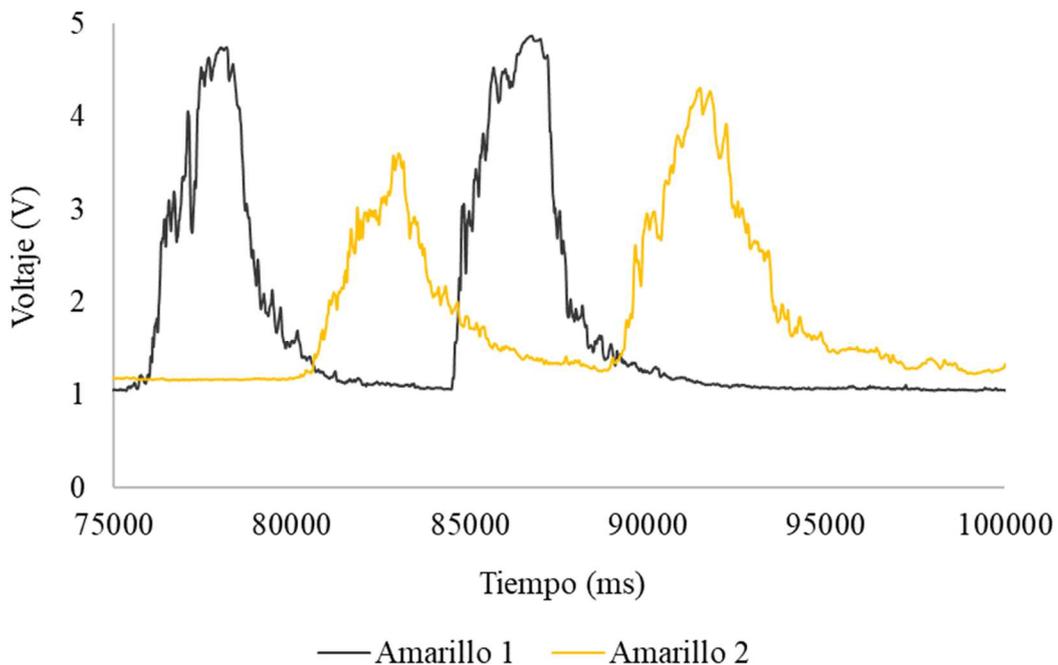
Cuando el trazador se introduce en el fluido, se dispersa progresivamente en el medio, lo que provoca que la concentración del trazador no sea uniforme en un momento dado, causando fluctuaciones en las lecturas. Es decir, el trazador afecta en diferente grado a cada punto del sensor, lo que prolonga las lecturas en el tiempo. Las lecturas del primer cabezal muestran un descenso pronunciado y estrecho porque el trazador no tiene tiempo suficiente para difundirse o los fenómenos de transporte no lo afectan de inmediato. En contraste, el segundo cabezal presenta en una curva de descenso gradual, ya que el trazador no pasa por el sensor de manera instantánea. Esta diferencia en el descenso de las curvas refleja directamente el efecto de la difusión del trazador y proporciona una indicación visual de cómo la concentración del trazador varía a lo largo del tiempo y en cada sección transversal de la tubería.

En la Figura 14 se muestran los voltajes, resultado de los cambios en la absorción y dispersión de la luz del LED rojo entre los tiempos de 75000 ms a 100000 ms. En las lecturas correspondientes al primer cabezal (Rojo 1), las fluctuaciones generan dos curvas muy pronunciadas. La primera curva posee un máximo de 4,38V, un mínimo de 0,61V y una media de 2,20V; mientras que la segunda posee un máximo de 4,55V, un mínimo de 0,63V y una media de 1,98V. En el segundo cabezal (Rojo 2) la primera curva posee un máximo de 4,01V, un mínimo de 1,00V y una media de 2,60V; mientras que la segunda posee un máximo de 4,31V, un mínimo de 1,06V y una media de 2,22V.



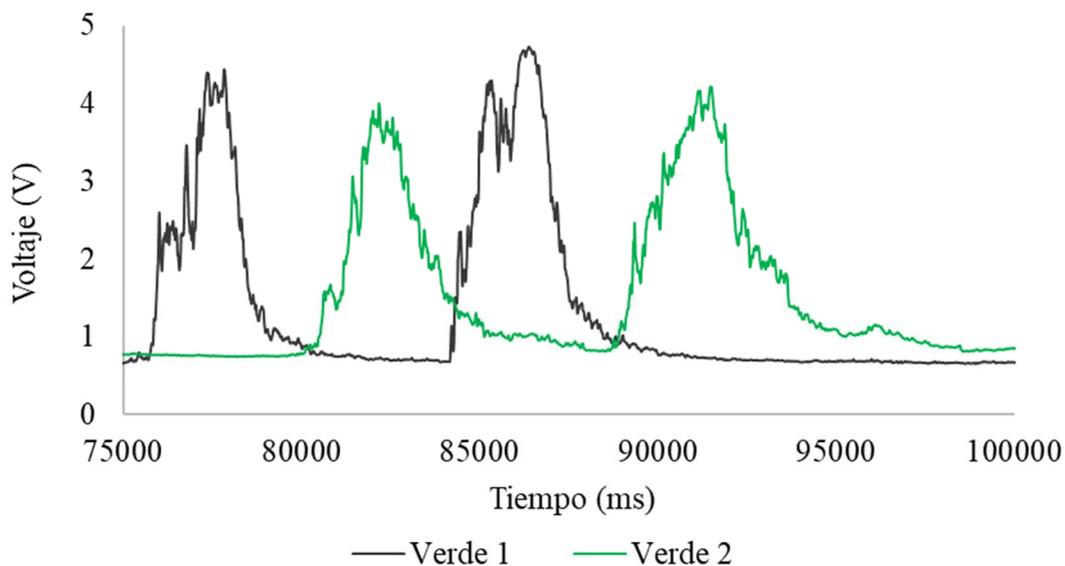
**Figura 14.** Ampliación de lecturas desde 75000 ms a 100000 ms, LED rojo.

En la Figura 15 se muestran los voltajes, resultado de los cambios en la absorción y dispersión de la luz del LED amarillo entre los tiempos de 75000 ms a 100000 ms. En las lecturas correspondientes al primer cabezal (Amarillo 1) las fluctuaciones generan dos curvas muy pronunciadas. La primera curva posee un máximo de 4,75V, un mínimo de 1,04V y una media de 2,67V; mientras que la segunda posee un máximo de 4,87V, un mínimo de 1,06V y una media de 2,37V. En el segundo cabezal (Amarillo 2), la primera curva posee un máximo de 3,61V, un mínimo de 1,17V y una media de 2,28V; mientras que la segunda posee un máximo de 4,31V, un mínimo de 1,25V y una media de 2,23V. Además, se evidencia cierto descenso en las lecturas máximas del segundo cabezal, lo que explica el proceso en el que el trazador se difunde en el fluido.



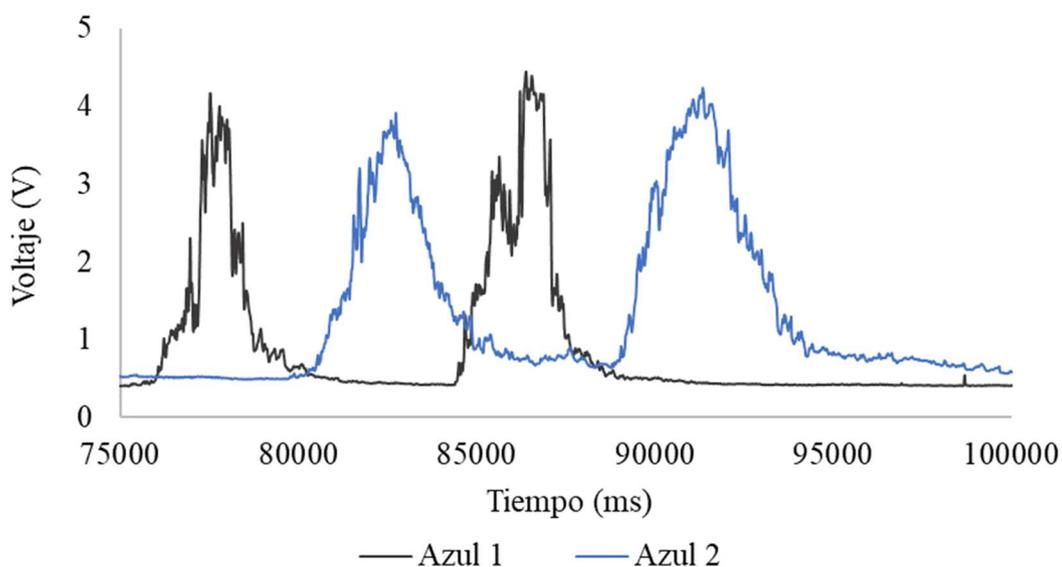
**Figura 15.** Ampliación de lecturas desde 75000 ms a 100000 ms, LED amarillo.

En la Figura 16 se muestran los voltajes, resultado de los cambios en la absorción y dispersión de la luz del LED verde entre los tiempos de 75000 ms a 100000 ms. En las lecturas correspondientes al primer cabezal (Verde 1), las fluctuaciones generan dos curvas muy pronunciadas. La primera curva posee un máximo de 4,44V, un mínimo de 0,66V y una media de 2,03V; mientras que la segunda posee un máximo de 4,73V, un mínimo de 0,68V y una media de 1,95V. En el segundo cabezal (Verde 2) la primera curva posee un máximo de 4,01V, un mínimo de 0,78V y una media de 2,43V; mientras que la segunda posee un máximo de 4,22V, un mínimo de 0,82V y una media de 1,88V.



**Figura 16.** Ampliación de lecturas desde 75000 ms a 100000 ms, LED verde.

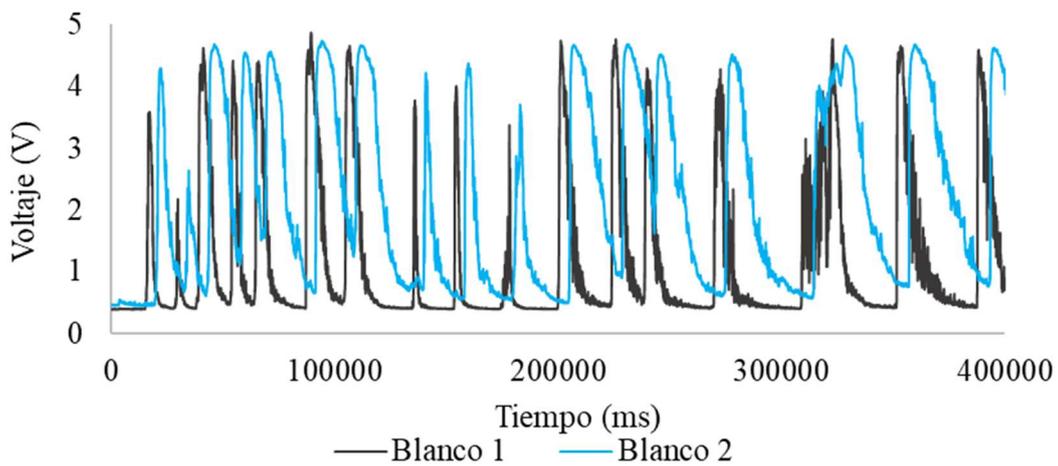
En la Figura 17 se muestran los voltajes, resultado de los cambios en la absorción y dispersión de la luz del LED azul entre los tiempos de 75000 ms a 100000 ms. En las lecturas correspondientes al primer cabezal (Amarillo 1), las fluctuaciones generan dos curvas muy pronunciadas. La primera curva posee un máximo de 4,17V, un mínimo de 0,40V y una media de 1,39V; mientras que la segunda posee un máximo de 4,45V, un mínimo de 0,41V y una media de 1,31V. En el segundo cabezal (Amarillo 2) la primera curva posee un máximo de 3,91V, un mínimo de 0,51V y una media de 2,08V; mientras que la segunda posee un máximo de 4,24V, un mínimo de 0,63V y una media de 1,72V.



**Figura 17.** Ampliación de lecturas desde 75000 ms a 100000 ms, LED azul.

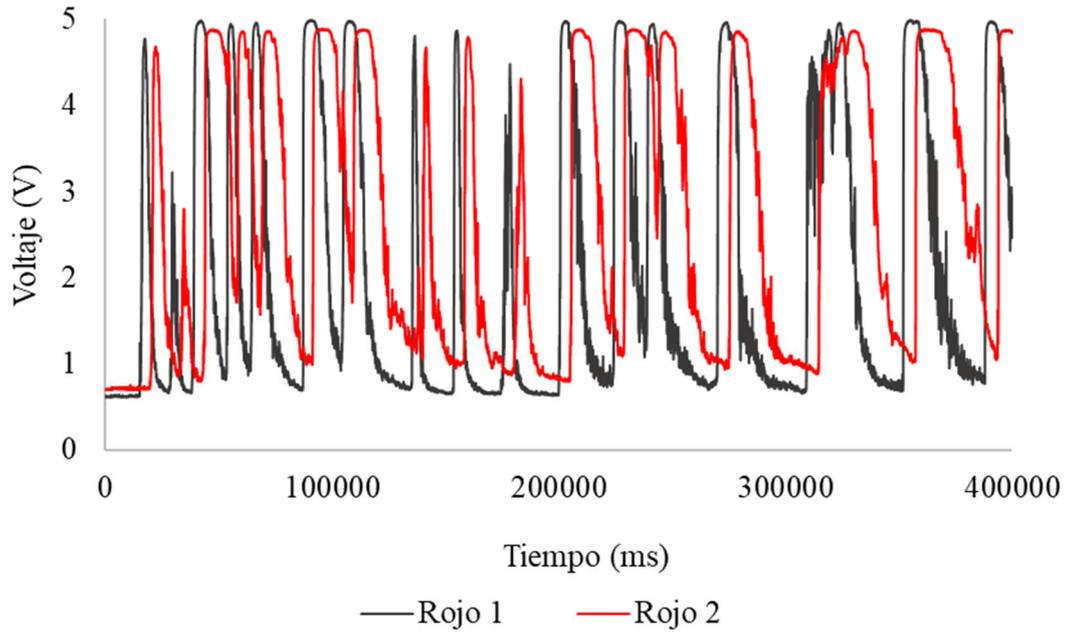
#### 4.2.2. Mediciones en agua con clorofila

El fluido utilizado en la segunda medición fue agua con clorofila. Esta agua presenta una turbidez de 58 NTU. En la Figura 18 se muestran los voltajes que van desde un valor mínimo de 0V y un valor máximo de 5V. Estos voltajes son resultado de los cambios en la absorción y dispersión de la luz del LED blanco durante el periodo de muestreo (400000 milisegundos). Se observa una notable similitud entre las series de datos capturados, evidenciando el desfase temporal. Sin embargo, es importante de tener en cuenta que en la segunda lectura nuevamente los valores no suelen ser descender inmediatamente después de pasar el trazador, esta observación destaca que el trazador tiende a mezclarse e influye en la resolución de lecturas, indicando que es un componente crucial para tener en cuenta al perfeccionar el sistema, especialmente para reducir la probabilidad de anomalías y garantizar que las mediciones tengan mayor precisión. Estas anomalías en las lecturas no solo pueden hacer que el cálculo sea más difícil, sino que también puede producir resultados que difieren de los valores reales, lo que puede comprometer la precisión del modelo. Las fluctuaciones generan 17 curvas muy pronunciadas en ambos cabezales, en el primer cabezal (Blanco 1) se tiene un máximo de 4,87V, un mínimo de 0,39V y media de 1,34V; mientras que el segundo cabezal (Blanco 2) tiene un máximo de 4,74V, un mínimo de 0,44V y 2,38V de media.



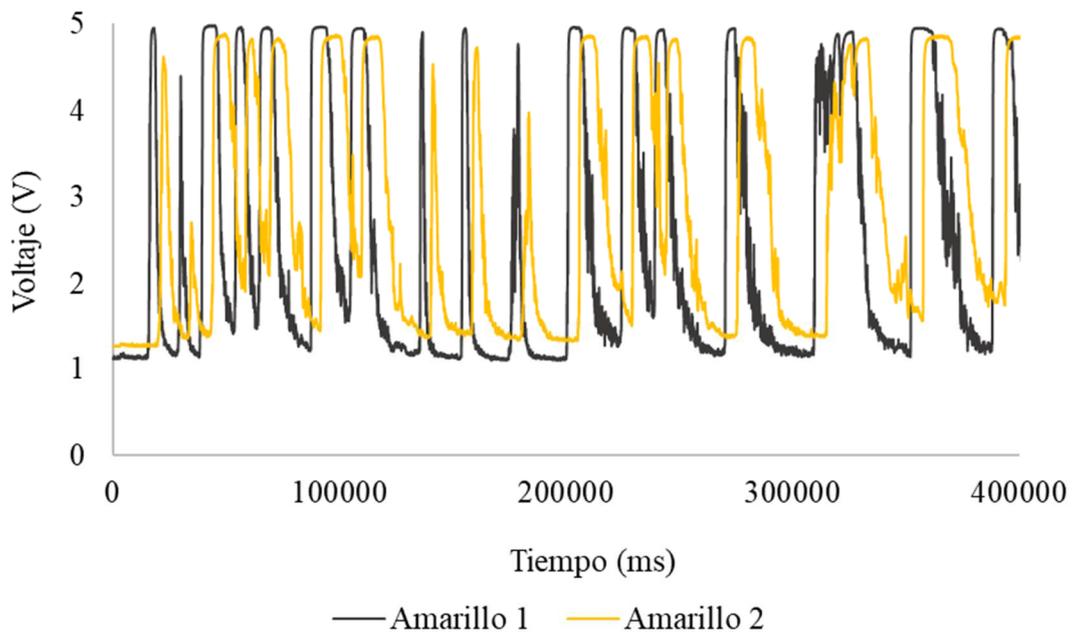
**Figura 18.** Lecturas en el tiempo de muestreo, LED blanco, agua con clorofila.

En la Figura 19 se muestran los voltajes, resultado de los cambios en la absorción y dispersión de la luz del LED rojo durante el muestreo. Las fluctuaciones generan 17 curvas muy pronunciadas en ambos cabezales. El primer cabezal (Rojo 1) tiene un máximo de 5,00V, un mínimo de 0,61V y una media de 2,36V, mientras que el segundo cabezal (Rojo 2) tiene un máximo de 4,88V, un mínimo de 0,69V y 3,08V de media.



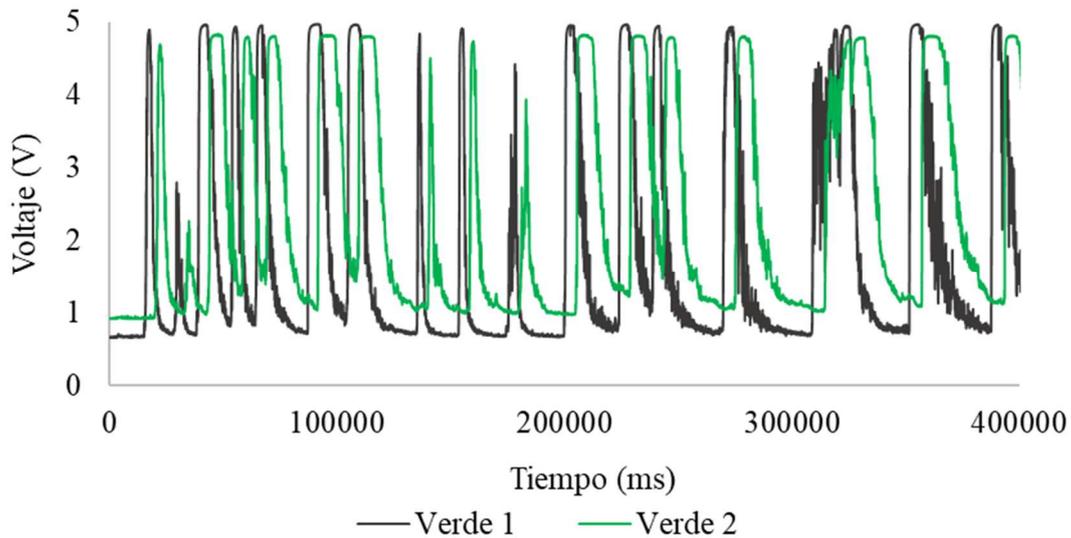
**Figura 19.** Lecturas en el tiempo de muestreo, LED rojo, agua con clorofila.

En la Figura 20 se muestran los voltajes, resultado de los cambios en la absorción y dispersión de la luz del LED amarillo durante el periodo de muestreo. En las lecturas las fluctuaciones generan 17 curvas muy pronunciadas en ambos cabezales. El primer cabezal (Amarillo 1) tiene un máximo de 4,99V, un mínimo de 1,10V y una media de 2,77V; mientras que el segundo cabezal (Amarillo 2) tiene un máximo de 4,89V, un mínimo de 1,26V y 3,09V de media.



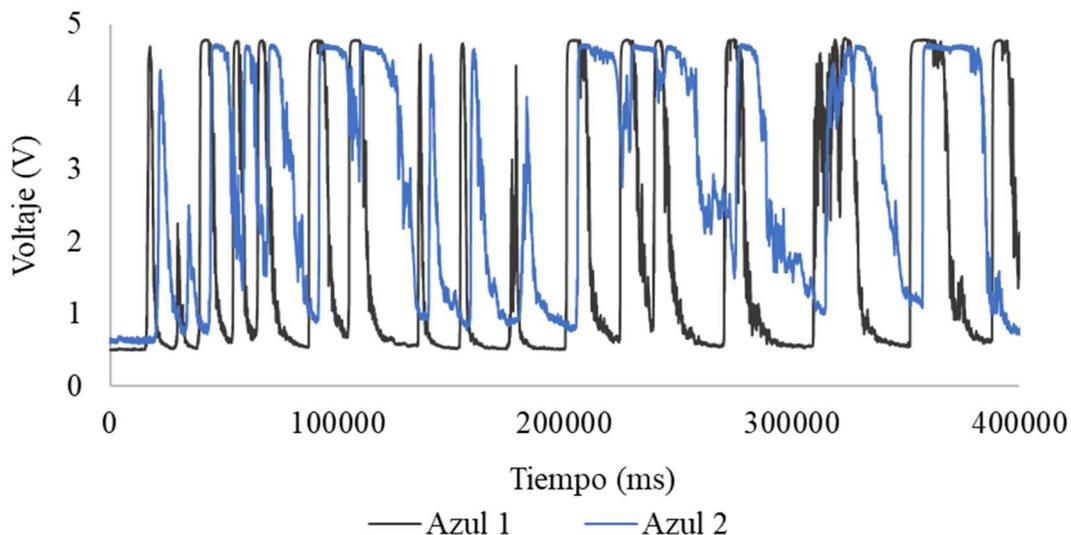
**Figura 20.** Lecturas en el tiempo de muestreo, LED amarillo, agua con clorofila.

En la Figura 21 se muestran los voltajes, resultado de los cambios en la absorción y dispersión de la luz del LED verde durante el muestreo. En las lecturas las fluctuaciones generan 17 curvas muy pronunciadas en ambos cabezales. El primer cabezal (Verde 1) tiene un máximo de 4,98V, un mínimo de 0,65V y una media de 2,05V; mientras que el segundo cabezal (Verde 2) un máximo de 4,83V, un mínimo de 0,91V y 2,59V de media.



**Figura 21.** Lecturas en el tiempo de muestreo, LED verde, agua con clorofila.

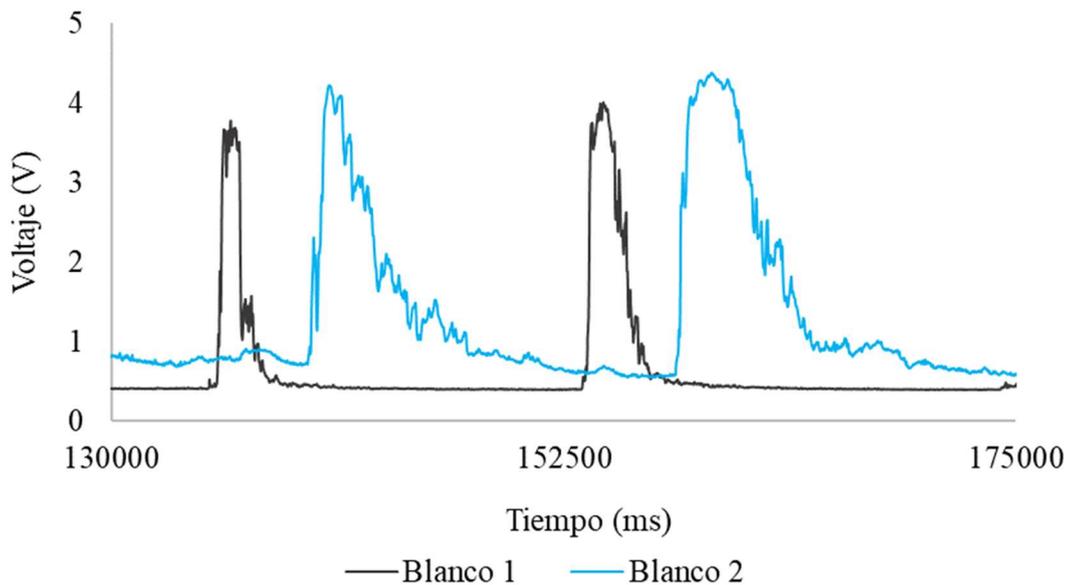
En la Figura 21 se muestran los voltajes, resultado de los cambios en la absorción y dispersión de la luz del LED azul durante el periodo de muestreo. Las fluctuaciones generan 17 curvas muy pronunciadas en los cabezales. El primer cabezal (Azul 1) tiene un máximo de 4,81V, un mínimo de 0,49V y una media de 2,17V; mientras el segundo cabezal (Azul 2) tiene un máximo de 4,73V, un mínimo de 0,59V y 2,94 de media.



**Figura 22.** Lecturas en el tiempo de muestreo, LED azul, agua con clorofila.

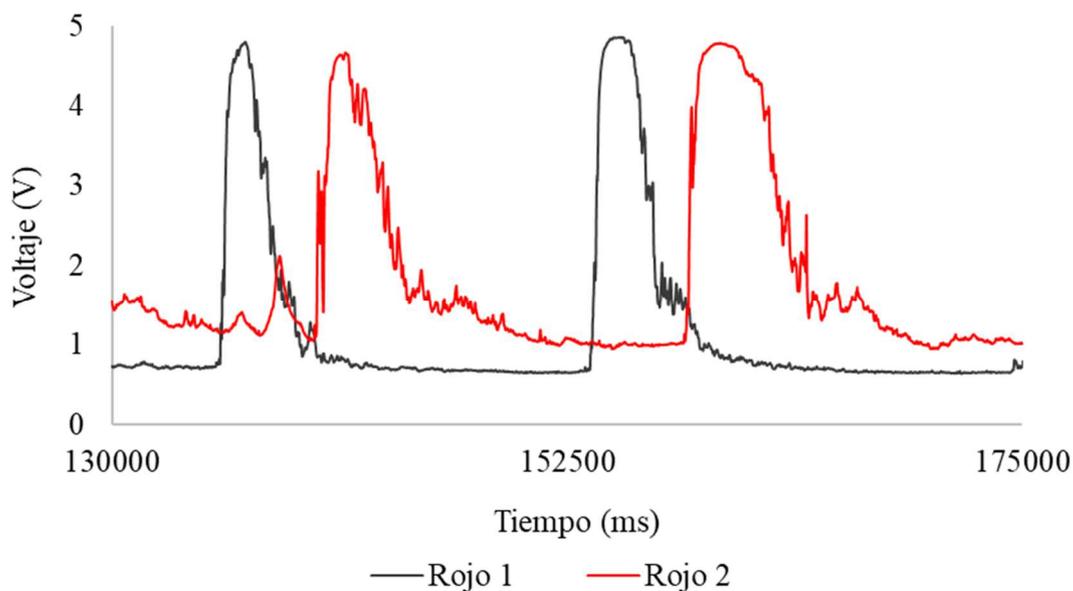
#### 4.2.2.1. Lecturas ampliadas de agua con clorofila

En la Figura 23 se muestran los voltajes, resultado de los cambios en la absorción y dispersión de la luz del LED blanco entre los tiempos de 130000 ms a 175000 ms. Las mediciones permiten destacar con buena resolución el desfase temporal entre las curvas. En las lecturas correspondientes al primer cabezal (Blanco 1) las fluctuaciones tienden a incrementarse generando dos curvas muy pronunciadas. La primera curva posee un máximo de 3,78V, un mínimo de 0,43V y una media de 1,83V; mientras que la segunda posee un máximo de 4,01V, un mínimo de 0,40V y una media de 2,25V. En el segundo cabezal (Blanco 2) la primera curva posee un máximo de 4,22V, un mínimo de 0,73V y una media de 2,07V mientras que la segunda posee un máximo de 4,38V, un mínimo de 0,59V y una media de 2,84V.



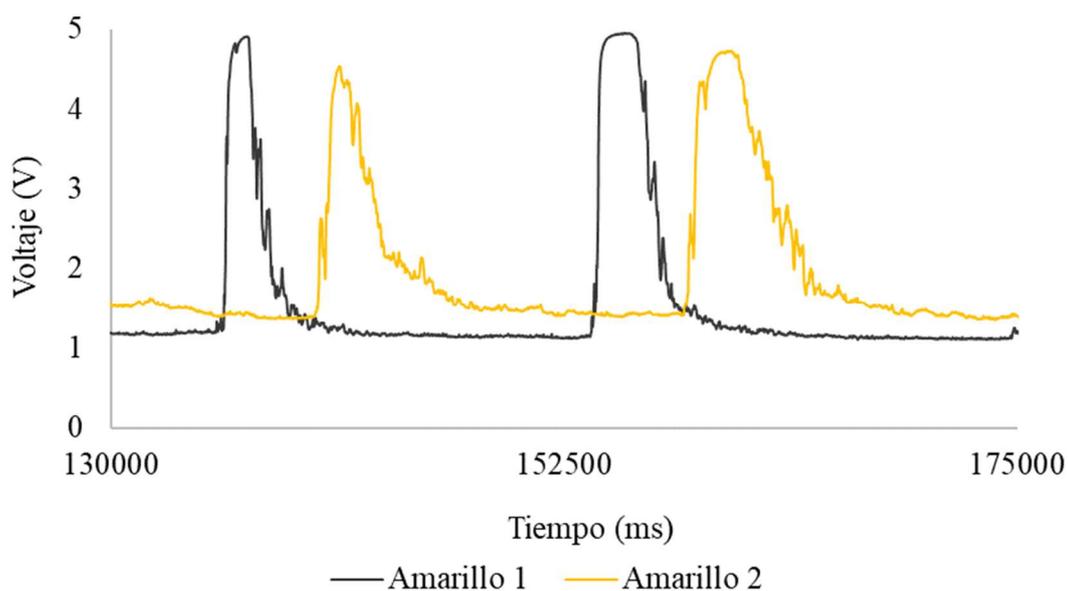
**Figura 23.** Ampliación de lecturas desde 130000 ms a 175000 ms, LED blanco.

En la Figura 24 se muestran los voltajes, resultado de los cambios en la absorción y dispersión de la luz del LED rojo entre los tiempos de 130000 ms a 175000 ms. En las lecturas correspondientes al primer cabezal (Rojo 1) las fluctuaciones tienden a incrementarse generando dos curvas muy pronunciadas. La primera curva posee un máximo de 4,80V, un mínimo de 0,75V y una media de 3,57V; mientras que la segunda posee un máximo de 4,86V, un mínimo de 0,66V y una media de 3,74. En el segundo cabezal (Rojo 2) la primera curva posee un máximo de 4,67V, un mínimo de 1,05V y una media de 2,56V; mientras que la segunda posee un máximo de 4,79V, un mínimo de 1,02V y una media de 3,42V.



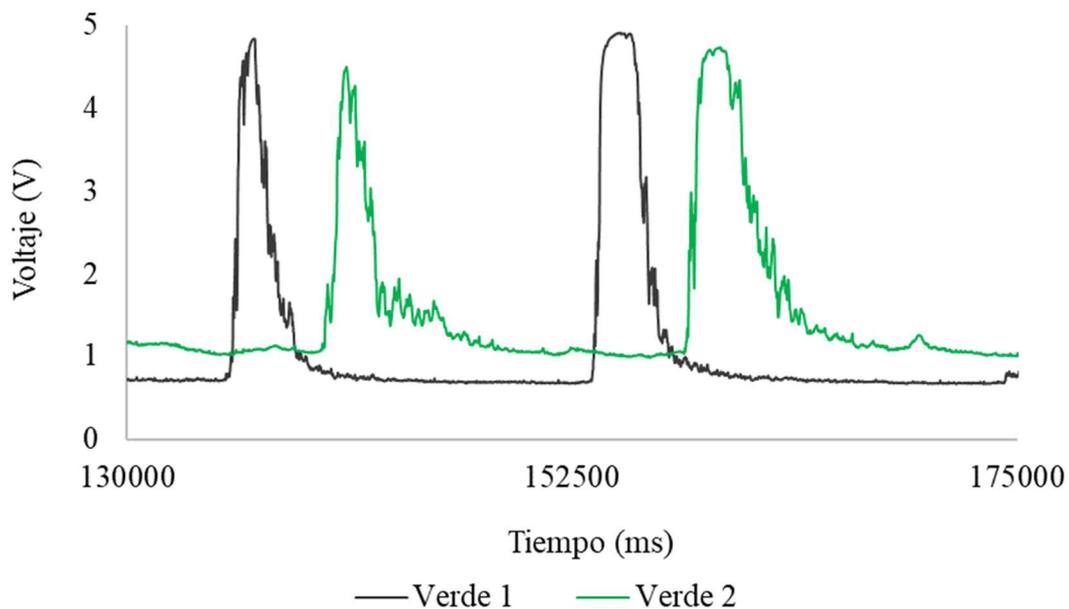
**Figura 24.** Ampliación de lecturas desde 130000 ms a 175000 ms, LED rojo.

En la Figura 25 se muestran los voltajes, resultado de los cambios en la absorción y dispersión de la luz del LED amarillo entre los tiempos de 130000 ms a 175000 ms. En las lecturas correspondientes al primer cabezal (Amarillo 1), las fluctuaciones generan dos curvas muy pronunciadas. La primera curva posee un máximo de 4,91V, un mínimo de 1,19V y una media de 3,43V; mientras que la segunda posee un máximo de 4,95V, un mínimo de 1,13V y una media de 3,84V. En el segundo cabezal (Amarillo 2) la primera curva posee un máximo de 4,54V, un mínimo de 1,37V y una media de 2,45V; mientras que la segunda posee un máximo de 4,73V, un mínimo de 1,40V y una media de 3,26V.



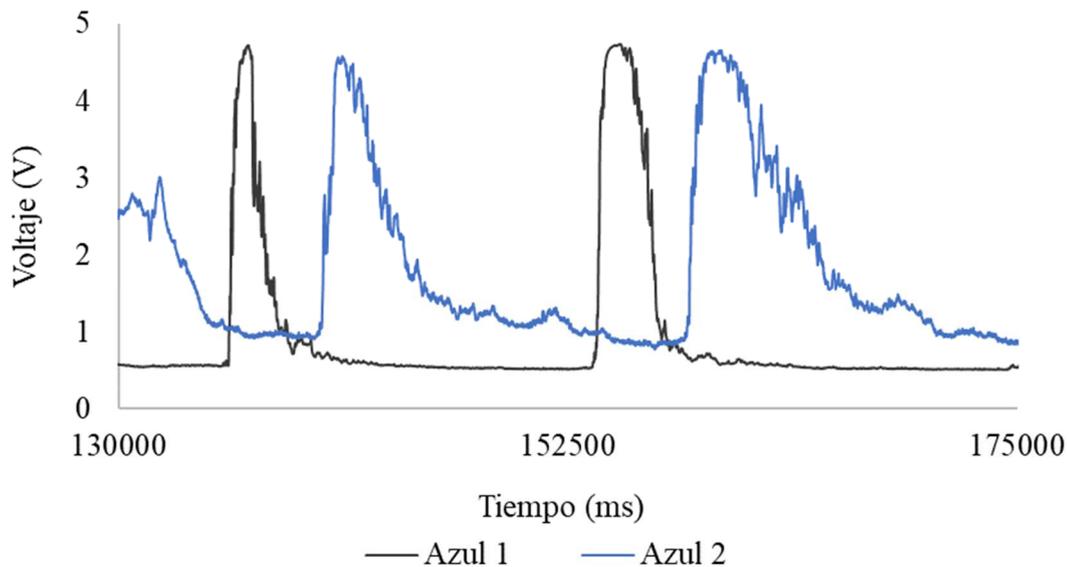
**Figura 25.** Ampliación de lecturas desde 130000 ms a 175000 ms, LED amarillo.

En la Figura 26 se muestran los voltajes, resultado de los cambios en la absorción y dispersión de la luz del LED verde entre los tiempos de 130000 ms a 175000 ms. En las lecturas correspondientes al primer cabezal (Verde 1), las fluctuaciones generan dos curvas muy pronunciadas. La primera curva posee un máximo de 4,84V, un mínimo de 0,75V y una media de 3,10V; mientras que la segunda posee un máximo de 4,91V, un mínimo de 0,70V y una media de 3,61V. En el segundo cabezal (Verde 2) la primera curva posee un máximo de 4,50V, un mínimo de 1,06V y una media de 1,99V; mientras que la segunda posee un máximo de 4,74V, un mínimo de 1,03V y una media de 2,79V. Según lo observado se evidencia que a esta longitud de onda, las lecturas del segundo cabezal presentan menor difusión en el tiempo en los valores máximos de la curva.



**Figura 26.** Ampliación de lecturas desde 130000 ms a 175000 ms, LED verde.

En la Figura 27 se muestran los voltajes, resultado de los cambios en la absorción y dispersión de la luz del LED azul entre los tiempos de 130000 ms a 175000 ms. En las lecturas correspondientes al primer cabezal (Azul 1), las fluctuaciones tienden a incrementarse generando dos curvas muy pronunciadas. La primera curva posee un máximo de 4,72V, un mínimo de 0,56V y una media de 2,72V; mientras que la segunda posee un máximo de 4,74V, un mínimo de 0,53V y una media de 3,40V. En el segundo cabezal (Azul 2) la primera curva posee un máximo de 4,58V, un mínimo de 0,91V y una media de 2,39V; mientras que la segunda posee un máximo de 4,66V, un mínimo de 0,87V y una media de 3,30V. Asimismo, se evidencia que a esta longitud de onda las lecturas fluctúan mucho más.



**Figura 27.** Ampliación de lecturas desde 130000 ms a 175000 ms, LED azul.

### 4.3. Procesamiento de máximos locales

Después de convertir las mediciones a voltaje, se asignaron variables específicas para cada columna y se procedió a eliminar la tendencia constante con el comando “detrend”, es decir a cada valor se le resta su promedio, luego, se ajustan los valores negativos a cero:

```
y(:, i) = detrend(y(:, i), "constant");
y(:, i) = max(y(:, i), 0);
```

Este procedimiento brindó como resultados matrices de datos en el que se contenían voltajes significativos mientras que otras contenían ceros, al ser una gran cantidad de datos, además, ayuda a desprestigiar los voltajes provenientes de lecturas consecuencia de la difusión del trazador. Se identificaron los máximos locales en el vector “y”, manteniendo todos los datos correspondientes a estos máximos, agrupamos convenientemente los datos colocando el tiempo en la primera columna seguido de las columnas correspondientes a un solo color. Para mejorar la precisión se mantienen los datos que posean al menos una lectura en cualquiera de las dos columnas correspondiente a la misma fila.

```
LM = double(islocalmax(y, "MaxNumExtrema", LocalMax));
B = [x1, y(:, 1), y(:, 6)]; B = B(LM(:, 1) + LM(:, 6) > 0, :)
```

Además, el sistema que se ha utilizado trabaja con velocidades que van de 4 cm/s a 11 cm/s, por lo tanto, los datos estarán restringidos a ese rango de valores antes de trabajar el algoritmo propuesto. Este algoritmo constituye núcleo del análisis, se basa en la detección precisa del instante en el que las lecturas caen a cero, es decir cuando el trazador ha pasado por completo, además, calcula la velocidad en estos instantes. A continuación, se expone el código que implementa esta lógica:

```

for i = 2:num_rows-1
    if num_cols >= 2 && TF(i, 2) ~= 0 && TF(i + 1, 2) == 0
        new_col1(i) = 1;
    end
    if num_cols >= 3 && TF(i, 3) ~= 0 && TF(i + 1, 3) == 0
        new_col2(i) = 1;
    end
end
for i = 2:num_rows
    if new_col1(i) == 1
        new_col3(i) = TF(i, 1);
    end
    if new_col2(i) == 1
        new_col4(i) = TF(i, 1);
    end
end
for i = 2:num_rows
    if new_col4(i-1) > 1
        new_col5(i) = 0;
    elseif new_col5(i-1) == 0
        if new_col3(i-1) == 0
            new_col5(i) = 0;
        else
            new_col5(i) = new_col3(i-1);
        end
    else
        new_col5(i) = new_col5(i-1);
    end
end
for i = 1:num_rows
    if new_col4(i) > 1 && new_col5(i) > 1
        new_col6(i) = abs(new_col4(i) - new_col5(i));
    else
        new_col6(i) = 0;
    end
end
for i = 1:num_rows
    if new_col6(i) ~= 0
        new_col7(i) = 46,5 / new_col6(i) * 1000;
    else
        new_col7(i) = 0;
    end
end

```

#### 4.4. Resultados de calibración con agua potable.

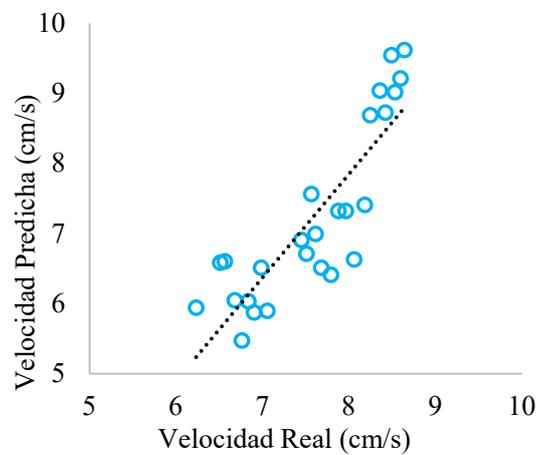
Este proceso permitió reducir la gran cantidad de datos que contienen únicamente la columna de tiempo y el de la velocidad predicha ya calculada, en la Tabla 4 se presentan los datos correspondientes a la velocidad predicha vs velocidad real para cada color (la velocidad real es la calculada con la recta de regresión de la Figura 5, vease la ecuación 6, donde tiempo se mide en segundos). Los resultados evidencian una pendiente positiva entre todas las series, es decir, algoritmo propuesto captura la tendencia general de los datos. Sin embargo, en las velocidades inferiores a 6 cm/s se presenta mayor dispersión, indicando que estos datos se obtuvieron cerca al límite inferior que se podía calcular velocidad en el sistema que es 5 cm/s. Como resultado los predichos tienden a ser menos preciso, subestimando en velocidades inferiores y sobreestimando las velocidades altas, debe remarcarse que existen diversa cantidad de velocidades en los colores debido a que la turbidez de las aguas puede llegar a ser más sensibles a la detección a determinadas longitudes de onda.

$$V_{Real} = -0,0066 \times Tiempo + 8,8 \quad (6)$$

**Tabla 4.** Velocidad predicha vs real en las distintas longitudes de onda, agua potable.

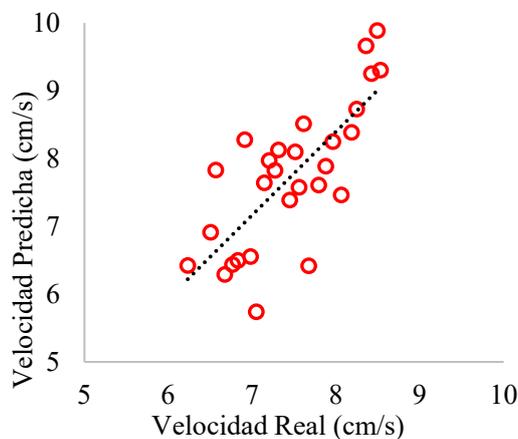
<b>Blanco</b>		<b>Rojo</b>		<b>Amarillo</b>		<b>Verde</b>		<b>Azul</b>	
Velocidad Predicha	Velocidad Real								
9,61	8,64	9,30	8,53	9,14	8,36	9,67	8,53	9,52	8,53
9,21	8,60	9,89	8,49	8,09	8,18	9,79	8,43	9,91	8,43
9,02	8,53	9,25	8,43	8,53	8,07	9,57	8,36	9,39	8,36
9,54	8,49	9,66	8,36	8,84	7,97	9,08	8,25	8,89	8,25
8,72	8,42	8,73	8,25	8,40	7,88	8,53	8,19	8,37	8,19
9,04	8,36	8,38	8,19	7,69	7,80	8,74	8,07	7,90	8,07
8,69	8,25	7,46	8,06	7,23	7,68	8,35	7,97	8,41	7,97
7,41	8,19	8,25	7,96	8,77	7,62	8,54	7,88	7,64	7,88
6,63	8,06	7,88	7,88	8,35	7,57	7,57	7,80	7,60	7,80
7,32	7,97	7,61	7,80	8,28	7,51	6,90	7,68	6,51	7,68
7,32	7,88	6,42	7,68	7,19	7,45	7,89	7,62	7,92	7,62
6,41	7,79	8,51	7,62	7,96	7,31	8,18	7,57	7,39	7,56
6,51	7,68	7,57	7,56	7,96	7,27	7,82	7,52	7,81	7,51
6,99	7,62	8,10	7,52	7,16	7,20	7,84	7,46	6,84	7,45
7,56	7,57	7,39	7,45	7,21	7,15	6,52	7,20	8,43	7,21
6,71	7,51	8,13	7,31	7,11	7,06	7,56	7,15	6,86	7,15
6,91	7,45	7,82	7,27	6,55	6,98	7,48	7,07	6,26	7,06
5,89	7,06	7,97	7,21	7,95	6,91	5,85	6,98	6,81	6,98
6,51	6,99	7,64	7,15	7,92	6,84	7,54	6,92	7,51	6,91
5,87	6,91	5,74	7,05	7,61	6,77	8,12	6,84	7,40	6,84
6,03	6,84	6,55	6,98	7,00	6,68	7,41	6,77	6,19	6,77
5,47	6,76	8,28	6,91	7,42	6,56	7,35	6,69	6,26	6,68
6,05	6,68	6,50	6,83	7,62	6,51	7,79	6,57	7,40	6,57
6,60	6,57	6,44	6,77			6,01	6,31	7,01	6,52

La precisión de las mediciones realizadas con el LED blanco (Figura 28) es un factor importante para tener en cuenta. Muestra una menor dispersión en los datos, especialmente en los rangos de velocidad más altos. Esto indica que el uso de un LED blanco mejora la precisión de la detección de velocidades del sistema y reduce las desviaciones en velocidades altas. Esto puede deberse a que el color blanco abarca todas las longitudes de onda del espectro visible. La recta de regresión posee un  $R^2 = 0,7368$ , lo que explica el 73,68 % de la variabilidad de los datos. En general, aunque el modelo funciona bien, la precisión podría mejorarse optimizando las condiciones de medición, especialmente en los rangos de velocidad que están cerca del límite inferior.



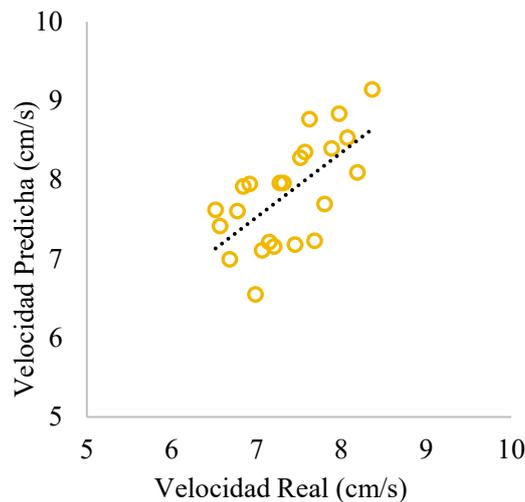
**Figura 28.** Velocidad predicha vs real, blanco, agua potable.

En la Figura 29 se observan las mediciones realizadas con el LED rojo, en su mayoría los puntos se agrupan cerca de la recta de regresión. La recta de regresión posee un  $R^2 = 0,5696$ , lo que explica el 56,96% de la variabilidad de los datos. Muestra una menor dispersión en los datos, especialmente en los rangos de velocidad más altos. Sin embargo, se visualiza mucha dispersión a bajas velocidades



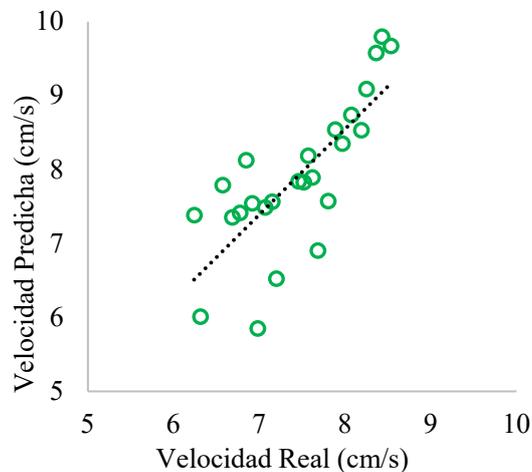
**Figura 29.** Velocidad predicha vs real, rojo, agua potable.

En la Figura 30 se observan las mediciones realizadas con el LED amarillo, los puntos se agrupan cerca de la recta de regresión. La recta de regresión posee un  $R^2 = 0,4238$ , lo que explica el 42,38 % de la variabilidad de los datos. No obstante, también se visualiza mucha dispersión en los datos tanto en la parte superior e inferior de la recta de regresión, lo que podría resultar en un menor error (se compensan) pese a la gran dispersión que posee.



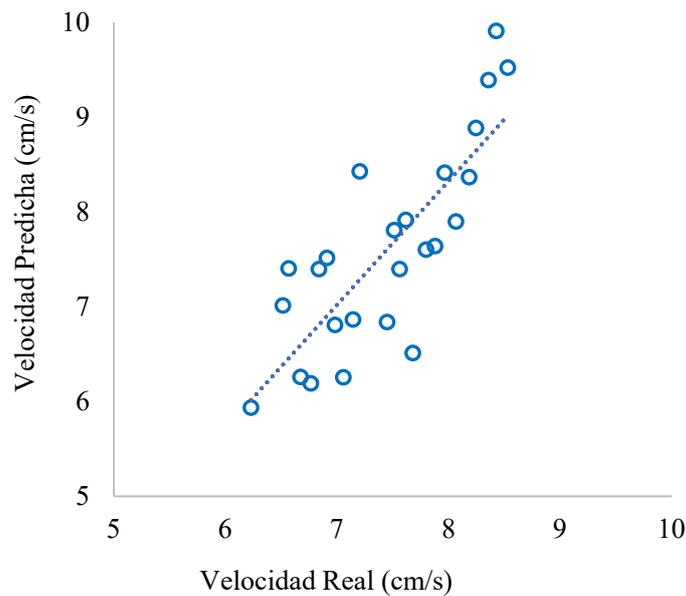
**Figura 30.** Velocidad predicha vs real, amarillo, agua potable.

En la Figura 31 se observan las mediciones realizadas con el LED verde, en su mayoría los puntos se agrupan cerca de la recta de regresión. La recta de regresión posee un  $R^2 = 0,5906$ , lo que explica el 59,06 % de la variabilidad de los datos. A velocidades altas posee gran precisión. No obstante, también se visualiza mucha dispersión en los datos, especialmente a bajas velocidades, esto puede deberse a que estaba calculando velocidad cerca del límite mínimo de trabajo del sistema, además que los accesorios que presenta el sistema pueden afectar las lecturas.



**Figura 31.** Velocidad predicha vs real, verde, agua potable.

Las mediciones realizadas con el LED azul se muestran en la Figura 32. Se observa una menor dispersión en los datos al igual que el LED blanco, en comparación con los demás colores, especialmente en los rangos de velocidad más altos y bajos. La recta de regresión posee un  $R^2 = 0,6484$ , lo que explica el 64,84 % de la variabilidad de los datos. Esto indica que a estas longitudes de onda mejora la precisión de la detección de velocidades predichas del sistema y reduce las desviaciones en velocidades bajas y altas.



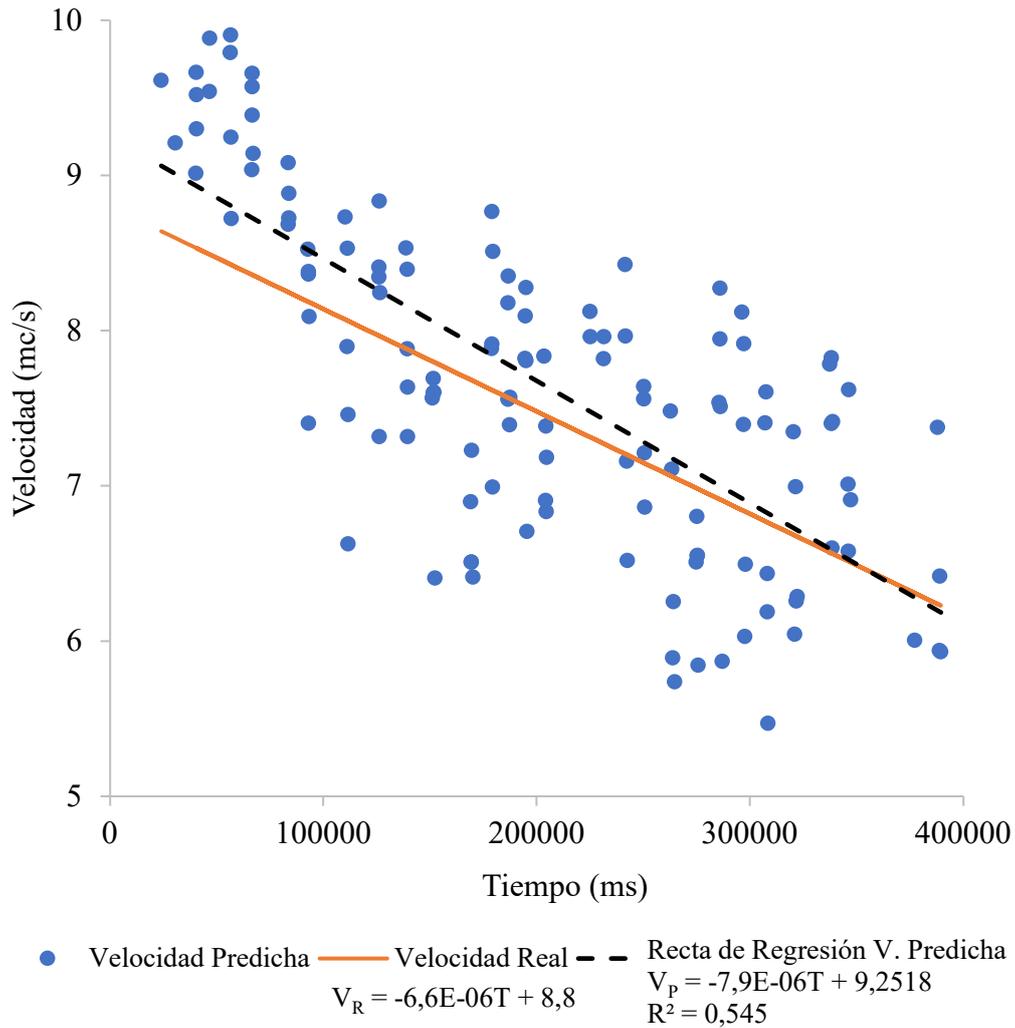
**Figura 32.** Velocidad predicha vs real, azul, agua potable.

La Tabla 5 presenta un resumen de los datos obtenidos (velocidad predicha vs tiempo), estos datos se exponen en la Figura 33 para mayor detalle de la tendencia observada en las mediciones después del procesamiento de los datos con el algoritmo propuesto. Dos rectas importantes se destacan en la figura: una recta discontinua que muestra la tendencia del ajuste por regresión lineal de la velocidad predicha con respecto al tiempo, y una recta en color naranja que grafica la recta de la velocidad real del sistema, obtenido durante los experimentos. Para esto el sistema trabajado expresa a la velocidad con la siguiente formula que es el resultado de pruebas experimentales descritas anteriormente, pero esta vez se convertirá el tiempo a unidades de milisegundos para que se ingrese el tiempo en la ecuación sin realizar una conversión previa.

$$V_{Real} = -0,0000066 \times Tiempo + 8,8 \quad (7)$$

**Tabla 5.** Datos obtenida de tiempo y velocidad predicha, agua potable.

<b>Tiempo (ms)</b>	<b>Velocidad Predicha (cm/s)</b>
23990	9,61
40316	9,02
40589	9,52
40600	9,30
56347	9,79
56710	9,25
67091	9,14
83510	8,69
83552	9,08
83825	8,73
92985	8,37
110215	8,74
111653	6,63
126067	8,41
138793	8,54
139370	7,88
139391	8,40
139433	7,32
151588	7,60
170109	6,42
179010	7,92
186539	8,18
186603	7,56
186688	8,35
187420	7,57
204393	7,39
204687	7,19
231352	7,82
231511	7,96
241409	8,43
250199	7,56
250273	7,64
250442	7,21
264022	6,26
275447	6,55
275733	5,85
286145	7,51
296248	8,12
297074	7,92
297817	6,50
308160	6,19
320344	7,35
321029	6,05
321439	7,00
322207	6,29
338093	7,40
346092	6,58
346304	7,62
347217	6,91
377149	6,01
389440	5,93



**Figura 33.** Velocidad predicha vs velocidad real, agua potable.

En la Tabla 6 se muestra que las lecturas con menor error absoluto y relativo medio fueron los provenientes del LED azul en agua potable con un EAM = 0,56 y un ERM = 7,59; caso contrario ocurre con las lecturas provenientes del LED verde que muestran mayores errores con un EAM = 0,71 y un ERM = 9,58

**Tabla 6.** Errores absolutos y relativos medios en diferentes LEDs, agua potable.

LEDs	Error Absoluto Medio (cm/s)	Error Relativo Medio (%)
Blanco	0,70	9,23
Rojo	0,62	8,36
Amarillo	0,58	8,04
Verde	0,71	9,58
Azul	0,56	7,59
<b>Promedio</b>	<b>0,63</b>	<b>8,56</b>

#### 4.5. Resultados de calibración con agua con clorofila.

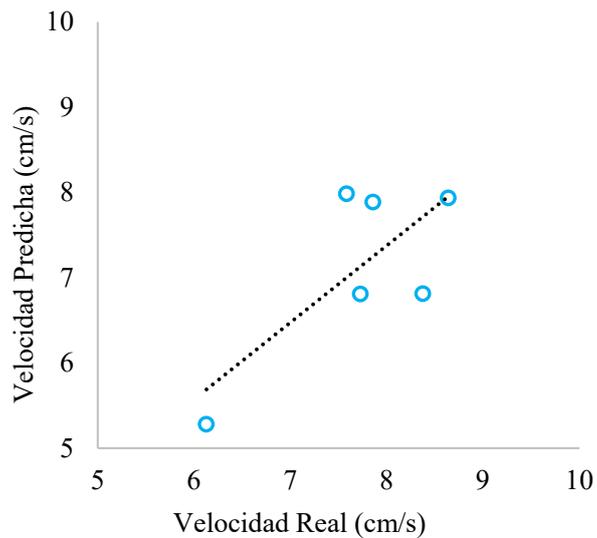
Como ya se mencionó anteriormente la cantidad de datos varía en cada serie de colores, esto como consecuencia de posibles errores de compilación, o unos LDRs son más sensibles que otros. Además, es de tomar en cuenta el color en el que cierta turbidez es mejor detectada, esto puede abrir nuevas investigaciones.

En la Tabla 7 se presentan los datos correspondientes a la velocidad predicha vs velocidad real para cada uno de los colores utilizados en el agua con clorofila, los resultados evidencian una pendiente positiva entre todas las series, pero una dispersión muy significativa en los datos. Sin embargo, las velocidades calculadas de las lecturas provenientes del LED Amarillo posee en promedio menores errores, en la Figura 30 se aprecia que, pese a tener mayor dispersión, en promedio posee menor error con este rango en la longitud de onda del espectro visible.

**Tabla 7.** Velocidad predicha vs real en las distintas longitudes de onda, agua con clorofila

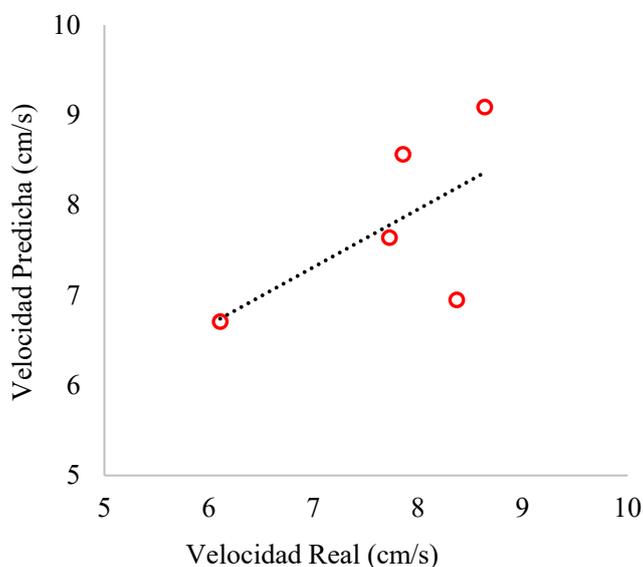
Blanco		Rojo		Amarillo		Verde		Azul	
Velocidad Predicha	Velocidad Real								
7,94	8,64	9,09	8,63	8,71	8,64	8,33	8,64	8,63	8,64
6,82	8,37	6,95	8,37	6,78	8,44	7,66	8,37	7,41	8,37
7,89	7,86	8,56	7,85	8,96	8,37	6,92	8,12	8,13	7,86
6,81	7,73	7,64	7,73	8,11	8,28	9,03	7,73	6,26	7,72
7,99	7,58	6,71	6,11	6,94	8,11	6,61	6,92	8,42	7,58
5,28	6,13			8,43	7,86	5,13	6,13		
				7,98	7,73	5,02	5,98		
				6,29	7,22	5,04	5,88		
				6,94	7,13				
				5,87	6,11				
				6,00	5,96				

En la Figura 34 se observan que, el cálculo realizado con los datos del LED blanco, en su mayoría se agrupan cerca de la recta de regresión. La recta de regresión posee un  $R^2 = 0,5587$ , lo que explica el 55,87% de la variabilidad de los datos. Muestra dispersión en los datos, especialmente en los rangos de velocidad más altos.



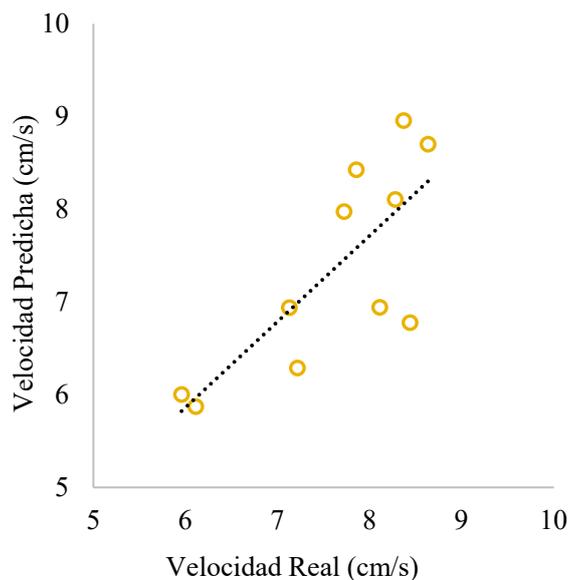
**Figura 34.** Velocidad predicha vs real, blanco, agua con clorofila.

En la Figura 35 se observa que, el cálculo realizado con los datos del LED rojo, se acercan a la recta de regresión, con una significativa dispersión a altas velocidades. La recta de regresión posee un  $R^2 = 0,382$ , lo que explica el 38,20% de la variabilidad de los datos.



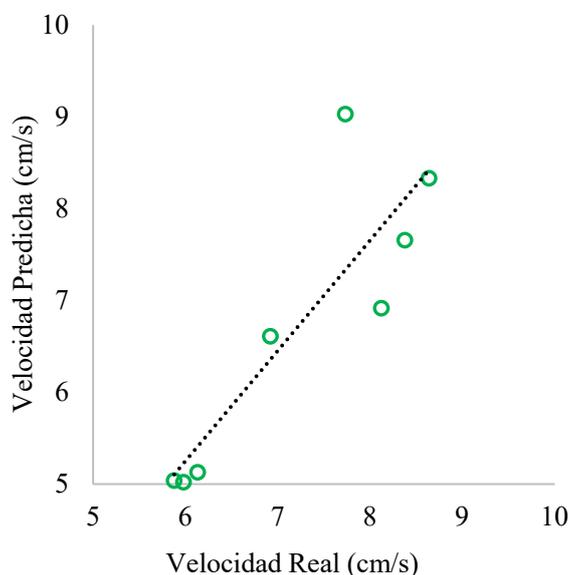
**Figura 35.** Velocidad predicha vs real, rojo, agua con clorofila.

En la Figura 36 se observa que, el cálculo realizado con los datos del LED amarillo, en su mayoría se agrupan cerca de la recta de regresión. La recta de regresión posee un  $R^2 = 0,5883$ , lo que explica el 58,83% de la variabilidad de los datos. Muestra gran dispersión a velocidades altas, mientras que a velocidades bajas posee buena correlación, con una pendiente de 0,93.



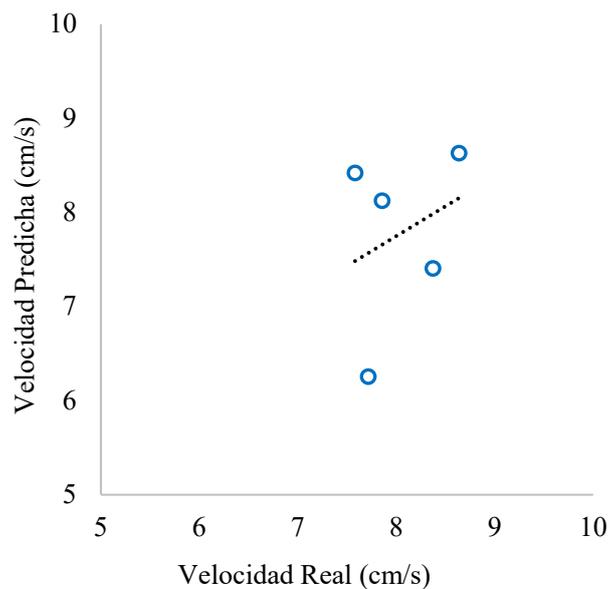
**Figura 36.** Velocidad predicha vs real, amarillo, agua con clorofila.

En la Figura 37 se observa que, el cálculo realizado con los datos del LED verde, en su mayoría se agrupan cerca de la recta de regresión. La recta de regresión posee un  $R^2 = 0,7631$ , lo que explica el 76,31% de la variabilidad de los datos. En general presenta menor dispersión en comparación a los demás colores, sin embargo la pendiente es 1,2018, que se aleja de la tendencia ideal en comparación con el LED amarillo.



**Figura 37.** Velocidad predicha vs real, verde, agua con clorofila.

En la Figura 38 se observa que, el cálculo realizado con los datos del LED azul, muestra una dispersión significativa. La recta de regresión posee un  $R^2 = 0,0887$  lo que explica el 8,87% de la variabilidad de los datos.



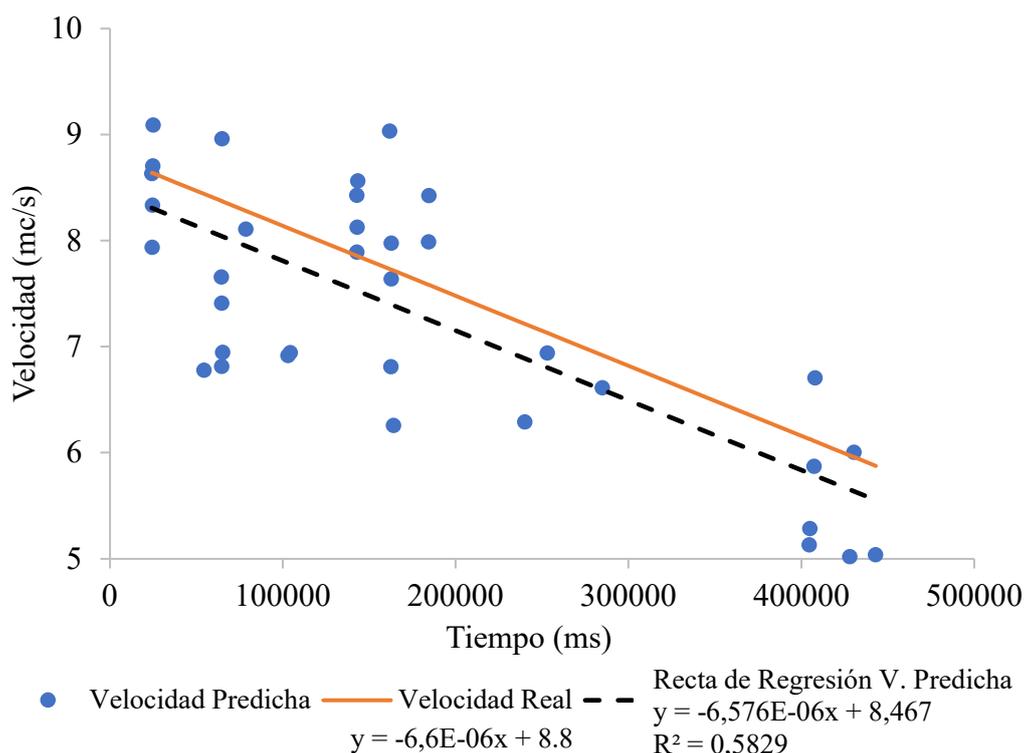
**Figura 38.** Velocidad predicha vs real, azul, agua con clorofila.

La Tabla 8 muestra un resumen de los resultados obtenidos por el modelo propuesto (velocidad predicha) con respecto al tiempo.

**Tabla 8.** Datos obtenidos de tiempo y velocidad predicha, agua con clorofila.

<b>Tiempo (ms)</b>	<b>Velocidad Predicha (cm/s)</b>
24536	7,94
24920	8,71
54530	6,78
64744	6,82
64958	8,96
78628	8,11
104412	6,94
142957	8,43
143362	8,56
162637	6,81
162818	7,98
184440	7,99
239945	6,29
284884	6,61
404944	5,28
407942	6,71
430484	6,00

La Figura 39 muestra que la recta de regresión de la velocidad predicha tiene una notable similitud tanto en pendiente como en intercepto con la recta de velocidad real. Aunque los puntos de la velocidad predicha presentan cierta dispersión, explicando un 58,29 % de la variabilidad de los datos ( $R^2 = 0,5829$ ). La regresión lineal posee una pendiente de  $-6,576 \times 10^{-6}$ , en contraste con la pendiente de la velocidad real que es  $-6,6 \times 10^{-6}$ . la proximidad entre ambas rectas sugiere que, en promedio el algoritmo propuesto predice adecuadamente la velocidad real.



**Figura 39.** Velocidad predicha vs velocidad real, agua con clorofila.

En la Tabla 9 se muestra que las lecturas con menor error absoluto y relativo medio fueron los provenientes del LED amarillo en agua con clorofila con un EAM = 0,54 y un ERM = 6,80; caso contrario ocurre con las lecturas provenientes del LED verde que muestran mayores errores con un EAM = 0,83 y un ERM = 11,83.

**Tabla 9.** Errores absolutos y relativos medios en diferentes LEDs, agua con clorofila.

LEDs	Error Absoluto Medio (cm/s)	Error Relativo Medio (%)
Blanco	0,74	9,68
Rojo	0,65	8,44
Amarillo	0,54	6,80
Verde	0,83	11,83
Azul	0,71	9,02
<b>Promedio</b>	<b>0,69</b>	<b>9,15</b>

#### 4.6. Prueba del modelo en fluido simulado de escorrentía

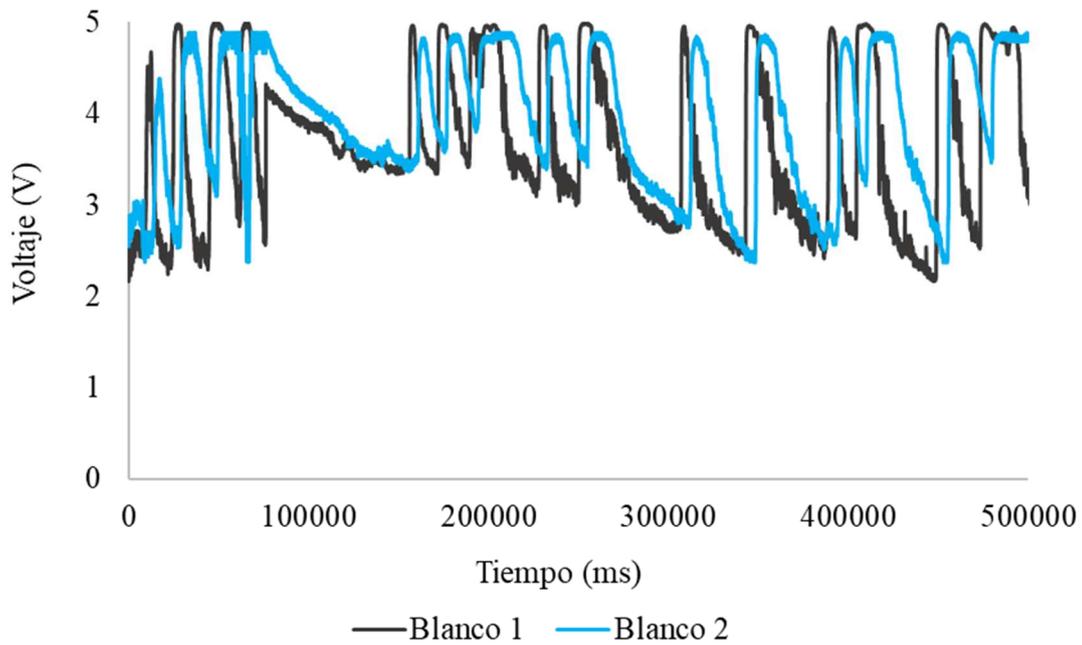
Para poner en prueba la eficiencia del modelo se simuló una posible escorrentía para tomar lecturas y procesarlas, como se muestra en la Figura 40. Las lecturas obtenidas fueron expresadas en voltajes, como respuesta a los cambios en la absorción y dispersión de la luz.



**Figura 40.** Sistema de simulación de escorrentía.

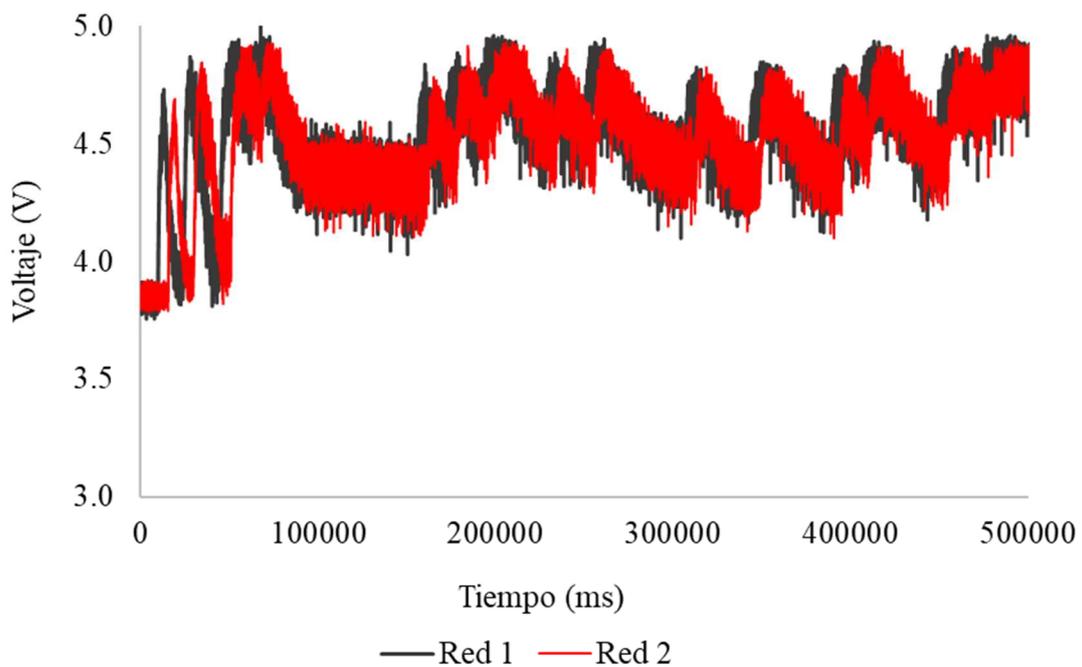
Los picos en las figuras que se verán a continuación representan los rangos de tiempo en el que el sustrato del suelo se diluye en el agua. El agua no se mezcla inmediatamente con el sustrato, ya que existen instantes en los que la mezcla es baja, manteniendo una turbidez reducida. No obstante, en ciertos instantes, un mayor volumen de sustrato se desprende del suelo y se mezcla, incrementando la turbidez. Esta última mezcla funciona como un trazador natural, lo que genera curvas pronunciadas. La turbidez de la mezcla presentaba 173 NTU. Estas nuevas lecturas presentan características similares a las mediciones que se realizaron en el calibrado, evidenciando el desfase temporal esperado.

En la Figura 41 se muestran los voltajes, resultado de los cambios en la absorción y dispersión de la luz del LED blanco durante el periodo de muestreo (500 000 milisegundos). En las lecturas las fluctuaciones generan 17 curvas muy pronunciadas en ambos cabezales. El primer cabezal (Blanco 1) tiene un máximo de 5,00V, un mínimo de 2,17V y una media de 3,64V; mientras que el segundo cabezal (Blanco 2) un máximo de 4,89V, un mínimo de 2,38V y 3,95V de media.



**Figura 41.** Lecturas en el tiempo de muestreo, LED blanco, escorrentía.

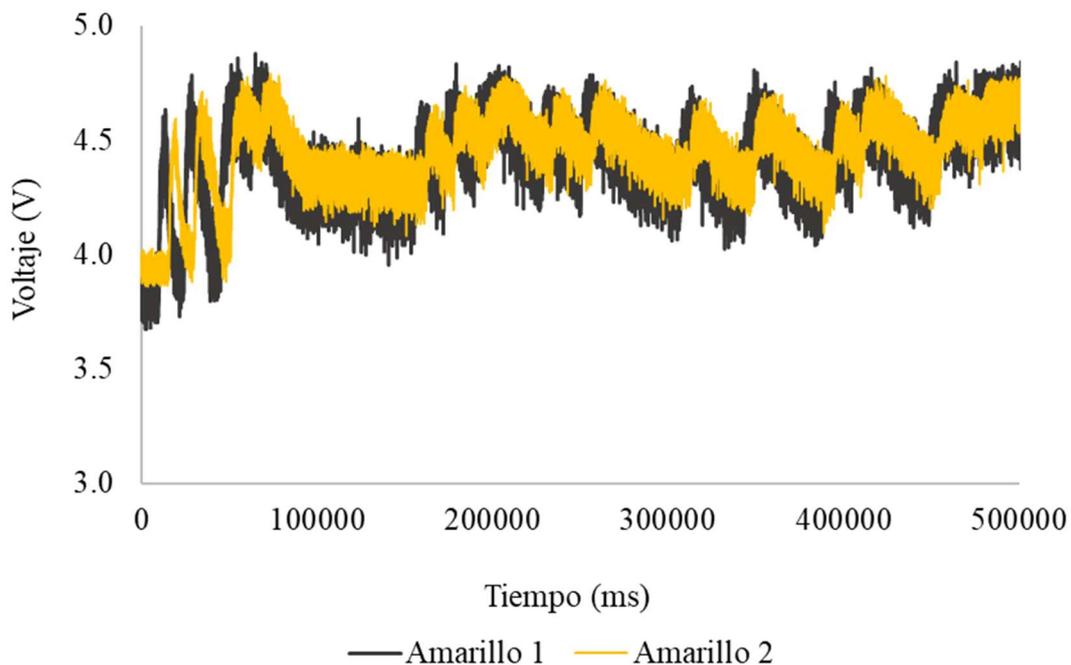
En la Figura 42 se muestran los voltajes, resultado de los cambios en la absorción y dispersión de la luz del LED rojo durante el muestreo. En las lecturas las fluctuaciones generan 17 curvas muy pronunciadas. El primer cabezal (Rojo 1) tiene un máximo de 5,00V, un mínimo de 3,76V y una media de 4,55V; mientras que el segundo cabezal (Rojo 2) un máximo de 4,94V, un mínimo de 3,79V y 4,53V de media.



**Figura 42.** Lecturas en el tiempo de muestreo, LED rojo, escorrentía.

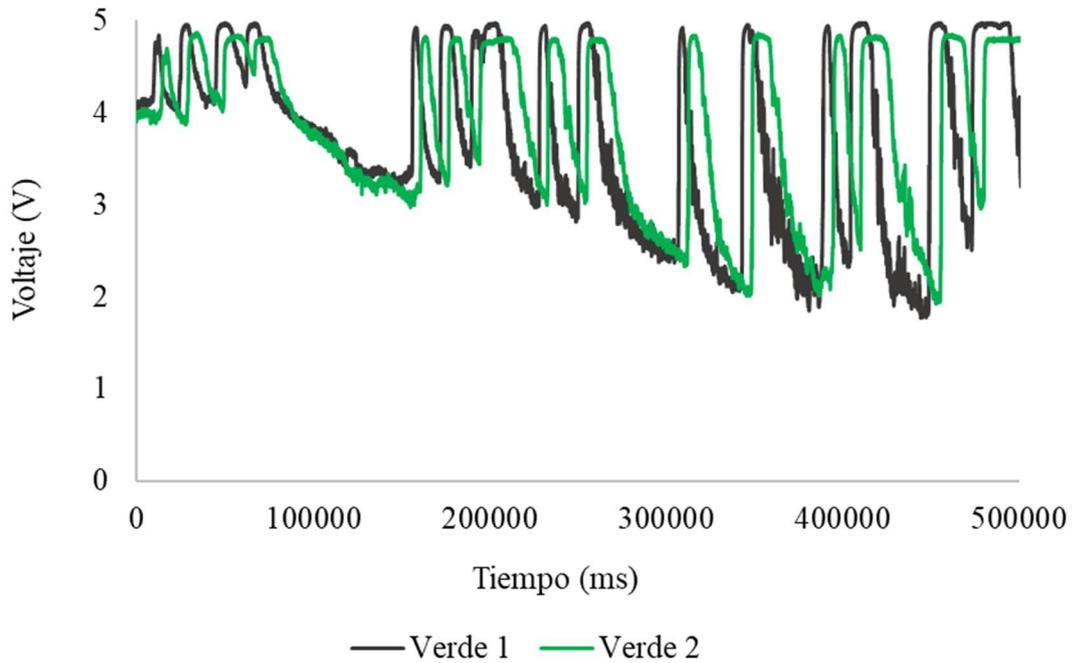
Es importante destacar que las lecturas presentadas en Figura 42 y Figura 43, correspondientes a los datos obtenidos de los LEDs rojo y amarillo presentaron un nivel significativo de ruido, pese a eso, se observa que las lecturas mantienen congruencia general con los resultados de las demás figuras, pero con una deficiente resolución. Esto sugiere que las lecturas pudieron verse afectadas por la turbidez o las partículas como trozos de hojas o ramas que poseen menor densidad al mantenerse en la superficie obstruyeron la lectura, deben destacarse otros factores externos que pudieron afectar la lectura, como errores en la compilación de datos o la influencia de la humedad, que pueden haber comprometido algunas conexiones del sensor.

En la Figura 43 se muestran los voltajes, resultado de los cambios en la absorción y dispersión de la luz del LED amarillo durante el muestreo. En las lecturas las fluctuaciones generan 17 curvas. El primer cabezal (Amarillo 1) tiene un máximo de 4,88V, un mínimo de 3,68V y una media de 4,42V; mientras que el segundo cabezal (Amarillo 2) un máximo de 4,79V, un mínimo de 3,87V y 4,45V de media.



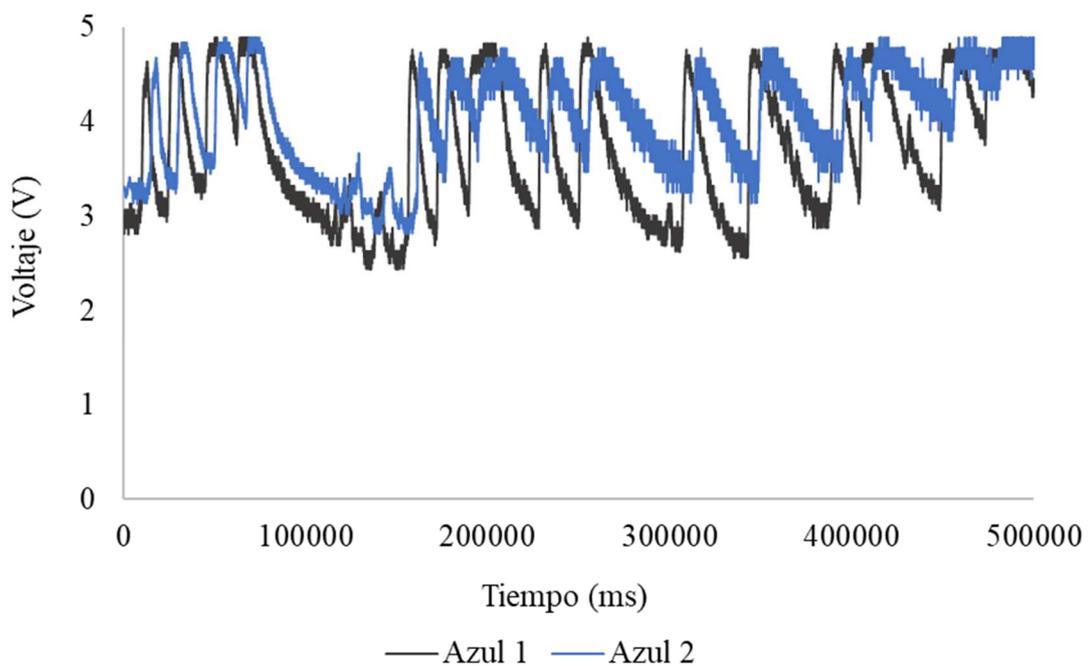
**Figura 43.** Lecturas en el tiempo de muestreo, LED amarillo, escorrentía.

En la Figura 44 se muestran los voltajes, resultado de los cambios en la absorción y dispersión de la luz del LED verde durante el muestreo. En las lecturas las fluctuaciones generan 17 curvas muy pronunciadas en ambos cabezales. El primer cabezal (Verde 1) tiene un máximo de 4,98V, un mínimo de 1,78V y una media de 3,69V; mientras que el segundo cabezal (Verde 2) un máximo de 4,87V, un mínimo de 1,93V y 3,81V de media.



**Figura 44.** Lecturas en el tiempo de muestreo, LED verde, escorrentía.

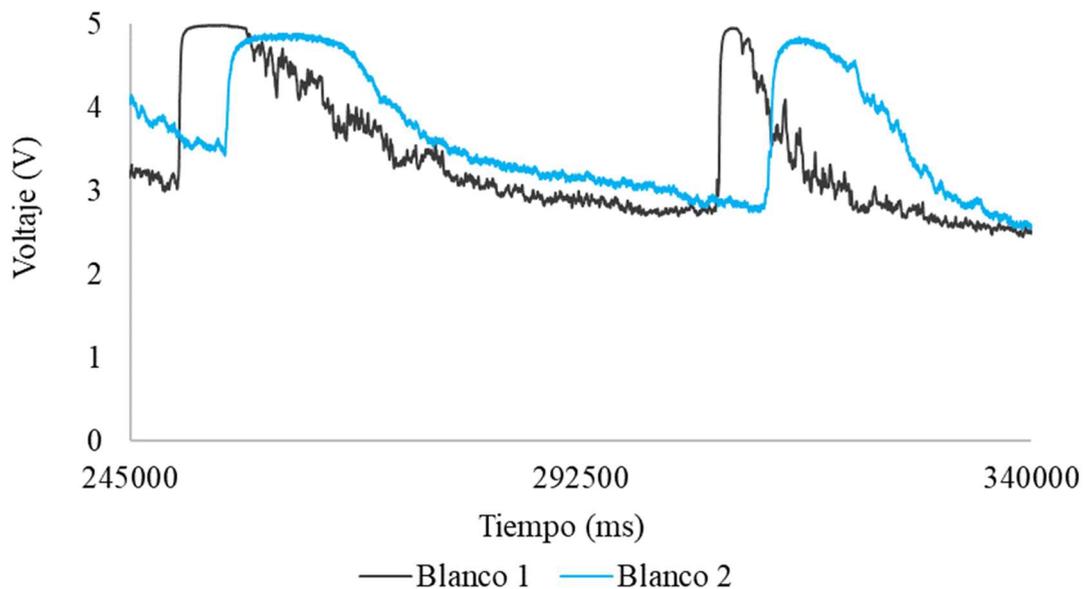
En la Figura 45 se muestran los voltajes, resultado de los cambios en la absorción y dispersión de la luz del LED azul durante el muestreo. En las lecturas las fluctuaciones generan 17 curvas muy pronunciadas en ambos cabezales. El primer cabezal (Azul 1) tiene un máximo de 4,89V, un mínimo de 2,45V y una media de 3,75V; mientras que el segundo cabezal (Azul 2) un máximo de 4,89V, un mínimo de 2,83V y 4,07V de media.



**Figura 45.** Lecturas en el tiempo de muestreo, LED azul, escorrentía.

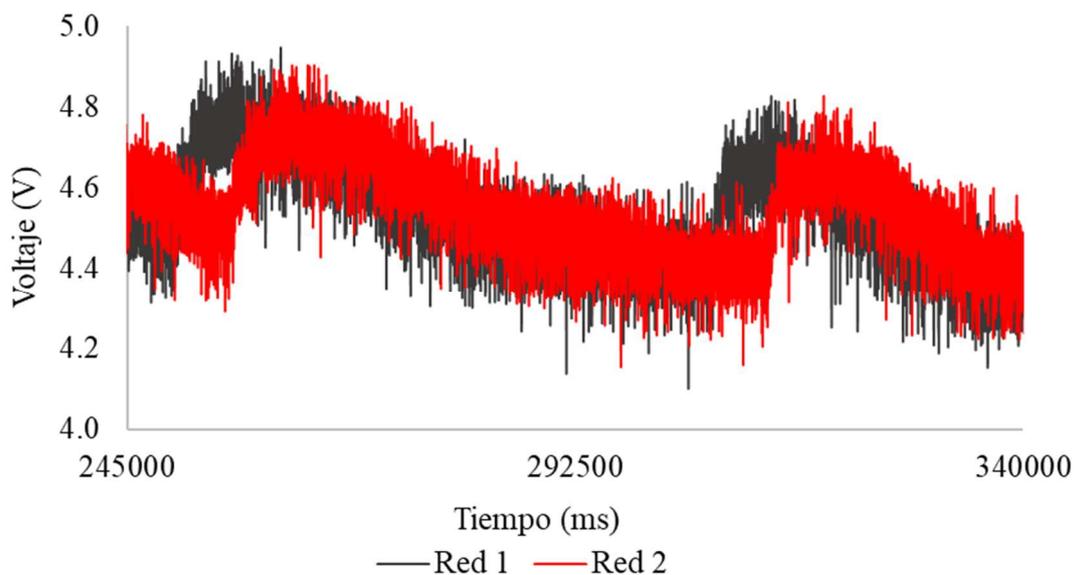
#### 4.6.1. Lecturas ampliadas de escorrentia

En la Figura 46 se muestran los voltajes, resultado de los cambios en la absorción y dispersión de la luz del LED blanco entre los tiempos de 245000 ms a 340000 ms. Las mediciones permiten destacar con buena resolución el desfase temporal entre las curvas. En las lecturas correspondientes al primer cabezal (Blanco 1) las fluctuaciones tienden a incrementarse generando dos curvas muy pronunciadas. La primera curva posee un máximo de 4,99V, un mínimo de 3,03V y una media de 4,13V; mientras que la segunda posee un máximo de 4,96V, un mínimo de 2,74V y una media de 3,76V. En el segundo cabezal (Blanco 2) la primera curva posee un máximo de 4,89V, un mínimo de 3,26V y una media de 4,23V; mientras que la segunda posee un máximo de 4,85V, un mínimo de 2,82V y una media de 4,35V.



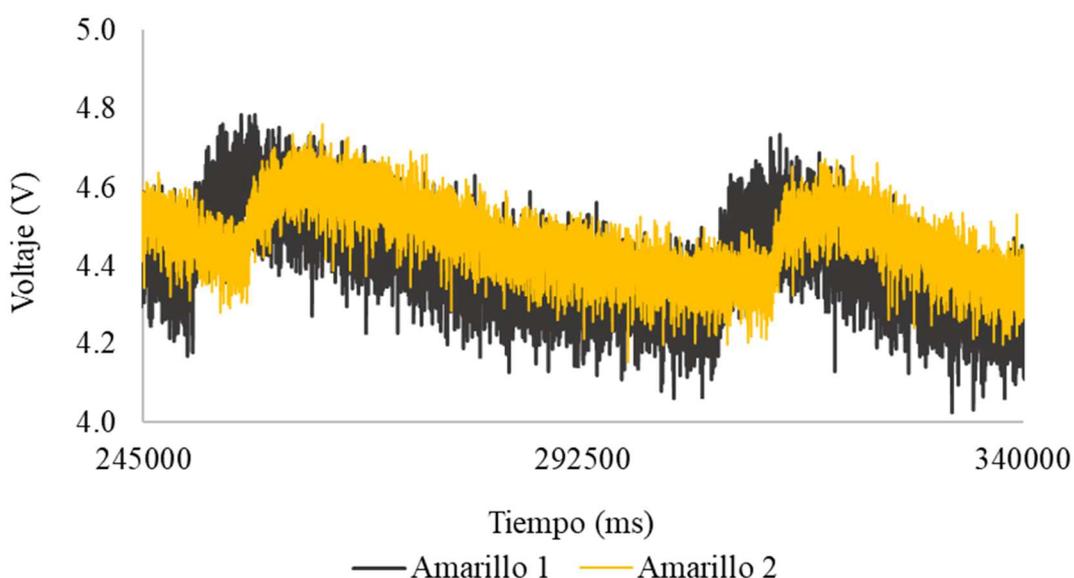
**Figura 46.** Ampliación de lecturas desde 245000 ms a 385000 ms, LED blanco.

En la Figura 47 se muestran los voltajes, resultado de los cambios en la absorción y dispersión de la luz del LED rojo entre los tiempos de 245000 ms a 340000 ms. En las lecturas correspondientes al primer cabezal (Rojo 1), las fluctuaciones tienden a incrementarse generando dos curvas muy pronunciadas. La primera curva posee un máximo de 4,95V, un mínimo de 4,31V, y una media de 4,66V; mientras que la segunda posee un máximo de 4,82V, un mínimo de 4,24V y una media de 4,61V. En el segundo cabezal (Rojo 2) la primera curva posee un máximo de 4,90V, un mínimo de 4,30V y una media de 4,65V; mientras que la segunda posee un máximo de 4,82V, un mínimo de 4,21V y una media de 4,60V.



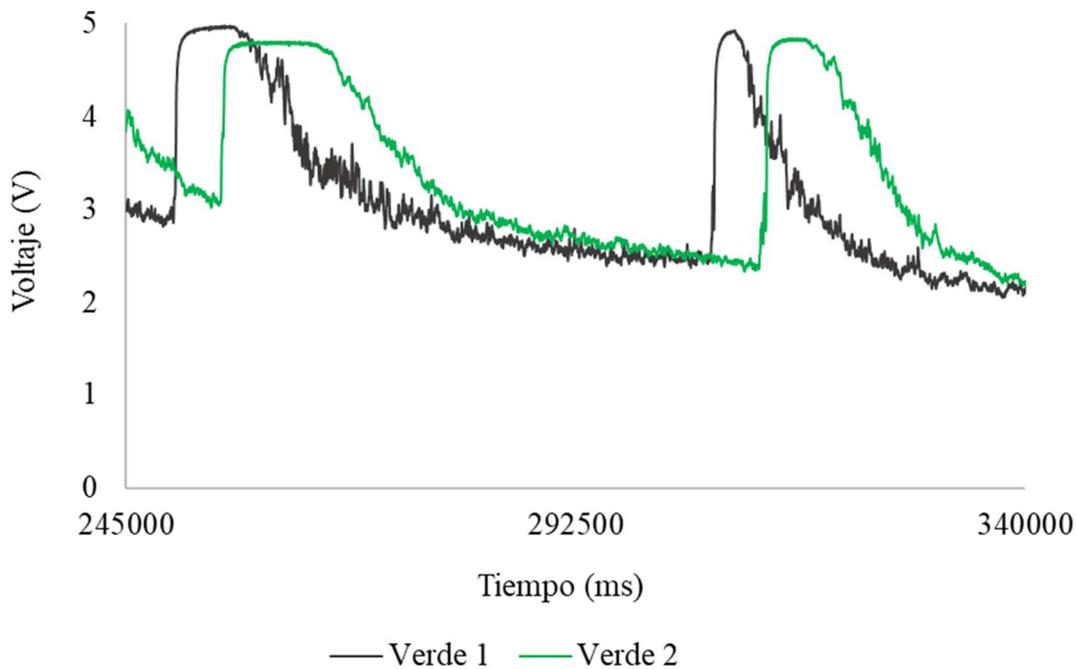
**Figura 47.** Ampliación de lecturas desde 245000 ms a 385000 ms, LED rojo.

En la Figura 48 se muestran las lecturas ampliadas de la absorción y dispersión de la luz del LED amarillo entre los tiempos de 245000 ms a 340000 ms. En las lecturas correspondientes al primer cabezal (Amarillo 1) las fluctuaciones generan dos curvas muy pronunciadas. La primera curva posee un máximo de 4,78V, un mínimo de 4,18V, y una media de 4,51V; mientras que la segunda posee un máximo de 4,73V, un mínimo de 4,11V y una media de 4,48V. En el segundo cabezal (Amarillo 2) la primera curva posee un máximo de 4,76V, un mínimo de 4,29V, una media de 4,55V; mientras que la segunda posee un máximo de 4,68V, un mínimo de 4,21V y una media de 4,51V.



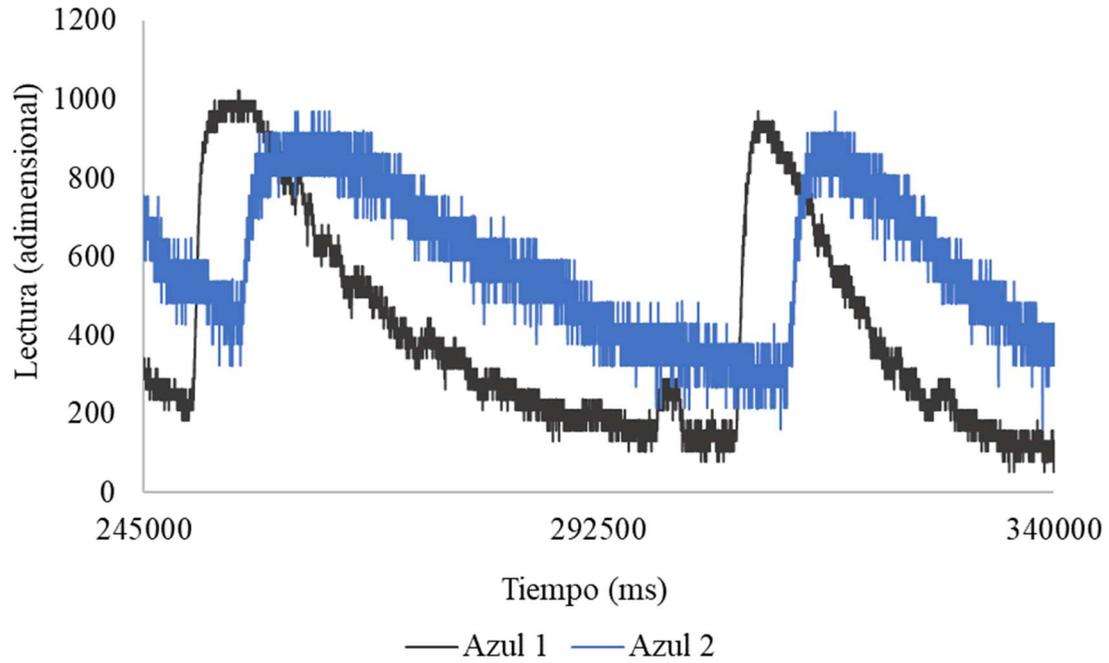
**Figura 48.** Ampliación de lecturas desde 245000 ms a 385000 ms, LED amarillo.

En la Figura 49 se muestran los voltajes, resultado de los cambios en la absorción y dispersión de la luz del LED verde entre los tiempos de 245000 ms a 340000 ms. En las lecturas correspondientes al primer cabezal (Verde 1), las fluctuaciones generan dos curvas muy pronunciadas. La primera curva posee un máximo de 4,98V, un mínimo de 2,65V, y una media de 3,80V; mientras que la segunda posee un máximo de 4,93V, un mínimo de 2,42V y una media de 3,63V. En el segundo cabezal (Verde 2) la primera curva posee un máximo de 4,80V, un mínimo de 2,83V y una media de 4,01V; mientras que la segunda posee un máximo de 4,84V, un mínimo de 2,36V y una media de 4,19V.



**Figura 49.** Ampliación de lecturas desde 245000 ms a 385000 ms, LED verde.

En la Figura 50 se muestran los voltajes, resultado de los cambios en la absorción y dispersión de la luz del LED azul entre los tiempos de 245000 ms a 340000 ms. En las lecturas correspondientes al primer cabezal (Azul 1), las fluctuaciones generan dos curvas muy pronunciadas. La primera curva posee un máximo de 4,89V, un mínimo de 2,95V, y una media de 3,93V; mientras que la segunda posee un máximo de 4,77V, un mínimo de 2,70V y una media de 4,03V. En el segundo cabezal (Azul 2) la primera curva posee un máximo de 4,78V, un mínimo de 3,48V y una media de 4,33V; mientras que la segunda posee un máximo de 4,78V, un mínimo de 3,26V y una media de 4,33V. También se evidencia que las lecturas del segundo cabezal pierden resolución, esto se debe a la presencia de partículas, hojas o trozos de ramas que, al poseer menos densidad, friccionan con la superficie interior de la tubería, obstruyendo las lecturas.



**Figura 50.** Ampliación de lecturas desde 245000 ms a 385000 ms, LED azul.

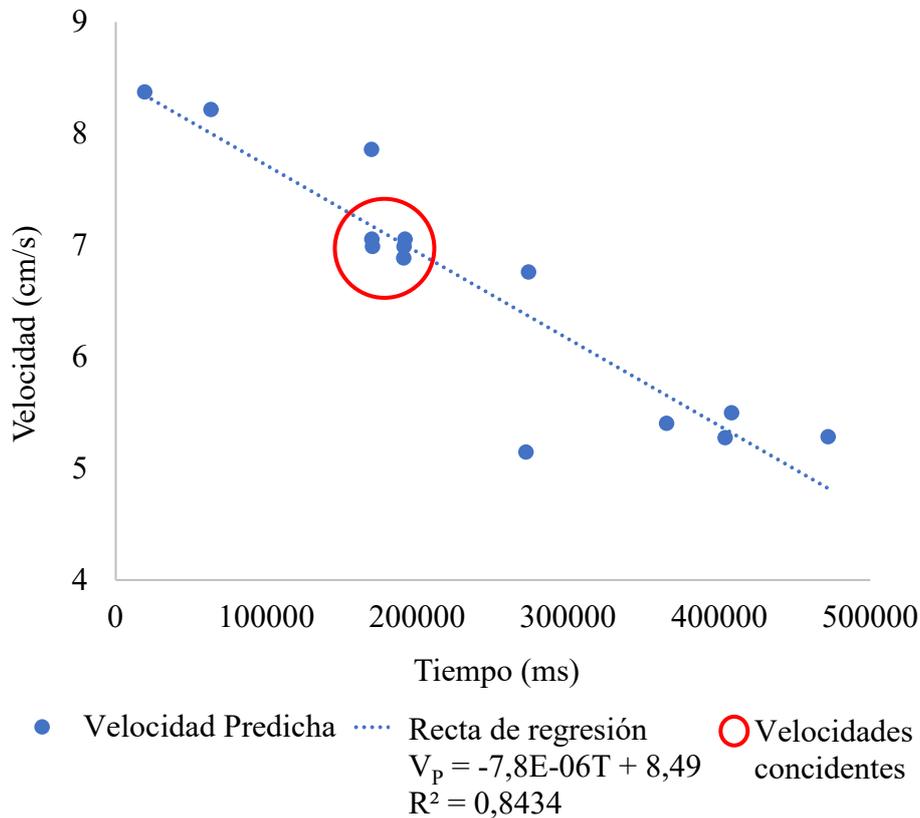
#### 4.6.2. Resultados de la prueba

Para obtener los resultados se ha tomado en cuenta que los valores de velocidad obtenidos con las lecturas provenientes de los LEDs blanco, verde y azul. Rojo y amarillo no se tomarán en cuenta como consecuencia de la gran cantidad de incertidumbre que generan. Estos resultados se muestran en la Tabla 10.

**Tabla 10.** Datos obtenidos de tiempo y velocidad predicha, escorrentía.

Tiempo (ms)	Velocidad Predicha (cm/s)
19117	8,37
63174	8,21
169466	7,86
169705	7,05
170105	6,99
190855	6,89
190909	6,99
191727	7,05
271815	5,15
273568	6,76
364959	5,40
403820	5,27
408062	5,50
472042	5,28

En la Figura 51 se aprecia una consistencia significativa en las mediciones, especialmente en el intervalo de 160000 ms a 200000 ms, lo que indica que el sensor puede determinar con gran precisión la velocidad del fluido, la recta de regresión explicaría el comportamiento de la velocidad durante el muestreo y un 84,3% de la variabilidad de la velocidad predicha.



**Figura 51.** Velocidad predicha vs velocidad real, escorrentía.

La coincidencia de puntos se muestra en la Tabla 11, haciendo notar la precisión y sensibilidad del sensor.

**Tabla 11.** Datos de velocidades predichas coincidentes, escorrentía.

Tiempo (ms)	Velocidad Predicha (cm/s)	LED
169705	7,05	Azul
170105	6,99	Blanco
190855	6,89	Azul
190909	6,99	Verde
191727	7,05	Blanco

## 5. CONCLUSIONES

Este trabajo destaca el desarrollo de un sensor de flujo de agua basado en la interacción de LEDs y LDRs, respondiendo a los objetivos planteados:

- En primer lugar, su bajo costo lo hace accesible para una amplia gama de investigaciones, esto permitiría su implementación en estudios ambientales y científicos con recursos limitados; además que el diseño estructural que se plantea hace que se reduzca la interacción directa entre el fluido y el sensor, y de esta forma disminuir significativamente la actividad corrosiva que pueda generarse al sensor.
- El algoritmo es relativamente sencillo de implementar, además, los resultados son fáciles de interpretar. Pese a ello se busca mejorar el algoritmo para reducir el ruido presente en las lecturas y mejorar la precisión en condiciones de baja velocidad y alta turbidez, y así capturar la tendencia real de la velocidad de flujo. Esto ayudará a que el sensor pueda ser utilizado en una variedad más amplia de entornos sin comprometer la calidad de los resultados.
- Se debe resaltar que el sensor puede operar en niveles de turbidez relativamente altos con respecto a los que se presentan en las aguas costeras debido a la turbulencia de las aguas.
- Esta metodología minimiza la interacción directa entre el sensor y el fluido en medición, esto colaboraría a un mínimo mantenimiento y monitoreos a largo plazo.
- Los rangos de velocidades estudiados van acordes a los ecosistemas objetivos, especialmente a las aguas de la zona bentónica, no obstante, en campo a velocidades altas ocasionados por posibles temporales puede llegar a exagerar los valores, por lo que se requeriría calibrar el algoritmo para obtener datos confiables.

### 5.1. Comparativo sensor desarrollado y sensores comerciales

Los correntímetros más conocidos son los Acoustic Doppler Current Profiler pudiendo medir velocidades a grandes profundidades, cuyo costo en distintas marcas pueden superar fácilmente los 100 000 €, un equipo que recoge características semejantes al sensor propuesto en este trabajo es el Vector 6MHz de Nortek cuyo precio es de aproximadamente 22 000 €. La principal similitud entre estos equipos radica en que

ambos requieren de una estación de monitoreo para hacer las mediciones, además, el resultado es un vector de velocidad que indica modulo y dirección tridimensional, esto puede replicarse en el sensor que proponemos haciendo tres medidores orientados a  $45^\circ$  de elevación en el eje Z y distribuidos a  $120^\circ$  entre sí en el plano XY como se muestra en la Figura 52.

**Figura 52.** Distribución de los sensores para cálculo tridimensional de la velocidad.



**Tabla 12.** Precio del sensor propuesto.

<b>Componentes</b>	<b>Precio (€)</b>
Arduino Mega 2560 Rev3	51,20
LEDs	5,00
LDRs	5,00
Resistencias	4,00
Cables	5,00
Protoboard	10,00
Tubería transparente	5,00
Carcasa	10,00
<b>Total</b>	<b>95,20</b>

## **5.2. Propuestas de mejora**

Para optimizar el rendimiento y la precisión del sensor, se sugieren las siguientes mejoras:

- Reducir la distancia entre los sensores para mitigar los efectos de la difusión del trazador en las lecturas, manteniendo una elevada resolución y precisión en la medición.
- Cambiar los LEDs por un LED RGB, de esta forma se tendría toda la gama del espectro visible en uno solo, aumentando la versatilidad, precisión y las aplicaciones del sensor.
- Trabajar en una versión subacuática del sensor para ser utilizada en estaciones de monitoreo continuo.

## **5.3. Aportaciones personales**

Esta es la primera vez que trabajo con un grupo de investigación multidisciplinario, ha sido una experiencia enriquecedora. He escuchado y recibido consejos, lo que me ha hecho evaluar y ver un panorama con diversos puntos de vista, he aprendido mucho en áreas en las que nunca había profundizado en conocimiento, especialmente en el área electrónica. Gracias a los conocimientos básicos que ya poseía y a los que aprendí autodidácticamente, he podido cumplir con los objetivos propuestos.

Todo esto me ha ayudado a entrelazar las distintas ramas de ingeniería y comprender a mayor profundidad como se interrelacionan y colaboran para desarrollar investigaciones y proyectos complejos.

## **5.4. Futuras investigaciones**

Las futuras líneas de investigación se basan en la realización de diversas pruebas con distinta distribución de longitudes de onda del espectro visible para que no interfieran entre ellas, además de desarrollar un solo sensor más compacto disminuyendo la distancia de medición y evitar la difusión de los trazadores naturales que existen en el medio de muestreo. Otro aspecto importante que resaltar es tomar en cuenta la luz ambiental y determinar si existe influencia en las lecturas del sensor.

Un aspecto innovador es la posibilidad de utilizar la firma espectral obtenida por el sensor para determinar y distinguir la presencia de contaminantes o componentes específicos del agua, como concentración de clorofila u otros compuestos orgánicos. Este enfoque no solo permitirá medir la velocidad de flujo, si no también estudiar la calidad

del agua y su composición. Esto proporcionaría una herramienta valiosa para el monitoreo de ecosistemas acuáticos.

El desarrollo de estaciones de monitoreo con este sensor puede desempeñar un papel importante en el estudio de la regresión de playas, problemas en la germinación de *Posidonia oceanica*, la distribución de nutrientes u otros fenómenos críticos en entornos marinos.

## 6. REFERENCIAS

- [1] K. Klemmer and E. Rolf, “Satellite images reveal untracked human activity on the oceans,” 2024. doi: 10.1038/d41586-023-03983-7.
- [2] F. Paolo *et al.*, “Satellite mapping reveals extensive industrial activity at sea,” *Nature*, vol. 625, no. 7993, 2024, doi: 10.1038/s41586-023-06825-8.
- [3] P. Castro, *Biología marina*, 6<sup>a</sup> ed. Madrid [etc: McGraw-Hill/Interamericana, 2007.
- [4] F. Navarro, F. Sánchez Martos, and J. Gisbert Gallego, *Caracterización de los factores hidrogeológicos, hidrológicos y antrópicos que condicionan la interacción de aguas superficiales-subterráneas del río Andarax*, 1<sup>a</sup> ed., vol. 364. in Tesis doctorales, vol. 364. Spain: Universidad de Almería, 2018.
- [5] B. Herrero Rodríguez, “Estudio de soluciones para la regeneración artificial de las playas entre el puerto de Burriana y el puerto de Sagunto.,” 2021, *Universitat Politècnica de València*.
- [6] A. Larreategui Fadrique, “Estado del arte en la medición de magnitudes hidráulicas (I): medición de caudales en conducciones cerradas, en diámetros pequeños y medianos,” *Ingeniería del agua*, vol. 1, no. 2, pp. 33–68, Jun. 1994, doi: 10.4995/ia.1994.2636.
- [7] L. Parra, J. Rocher, J. Escrivá, and J. Lloret, “Design and development of low cost smart turbidity sensor for water quality monitoring in fish farms,” *Aquac Eng*, vol. 81, pp. 10–18, May 2018, doi: 10.1016/j.aquaeng.2018.01.004.
- [8] B. Brentan, S. Carpitella, D. Barros, G. Meirelles, A. Certa, and J. Izquierdo, “Water Quality Sensor Placement: A Multi-Objective and Multi-Criteria Approach,” *Water Resources Management*, vol. 35, no. 1, pp. 225–241, Jan. 2021, doi: 10.1007/s11269-020-02720-3.
- [9] J. Rocher, J. M. Jimenez, J. Tomas, and J. Lloret, “Low-Cost Turbidity Sensor to Determine Eutrophication in Water Bodies,” *Sensors*, vol. 23, no. 8, p. 3913, Apr. 2023, doi: 10.3390/s23083913.
- [10] L. Parra, A. Ahmad, S. Sendra, J. Lloret, and P. Lorenz, “Combination of Machine Learning and RGB Sensors to Quantify and Classify Water Turbidity,” *Chemosensors*, vol. 12, no. 3, 2024, doi: 10.3390/chemosensors12030034.
- [11] L. Pereda-Briones, E. Infantes, A. Orfila, F. Tomas, and J. Terrados, “Dispersal of seagrass propagules: Interaction between hydrodynamics and substratum type,” *Mar Ecol Prog Ser*, vol. 593, 2018, doi: 10.3354/meps12518.
- [12] H. Soo Lim, H. Jun Lee, D. Kim, and S. Hong, “Beach erosion along the eastern coast of Korea: A brief review,” *J Coast Res*, vol. 39, no. 1, pp. 181–190, 2023, doi: 10.2112/JCOASTRES-D-22TM-00006.1.
- [13] J. Zhao, F. Dai, X. Ma, and F. Wang, “Ocean current velocity measuring device based on acoustic time difference current meter,” *Journal of Robotics*,

- Networking and Artificial Life*, vol. 7, no. 3, 2020, doi: 10.2991/jrnal.k.200909.007.
- [14] S. Sarangapani, “Multi-frequency Phased Array Transducer for ADCP Applications,” in *Oceans Conference Record (IEEE)*, 2022. doi: 10.1109/OCEANSSChennai45887.2022.9775469.
- [15] T. Gytre, J. E. O. Nilsen, J. E. Stiansen, and S. Sundby, “Resolving small scale turbulence with acoustic Doppler and acoustic travel time difference current meters from an underwater tower,” in *Oceans Conference Record (IEEE)*, 1996. doi: 10.1109/oceans.1996.572797.
- [16] B. J. MacVicar, E. Beaulieu, V. Champagne, and A. G. Roy, “Measuring water velocity in highly turbulent flows: Field tests of an electromagnetic current meter (ECM) and an acoustic Doppler velocimeter (ADV),” *Earth Surf Process Landf*, vol. 32, no. 9, 2007, doi: 10.1002/esp.1497.
- [17] J. Zhao, F. Dai, X. Ma, and F. Wang, “Ocean current velocity measuring device based on acoustic time difference current meter,” *Journal of Robotics, Networking and Artificial Life*, vol. 7, no. 3, 2020, doi: 10.2991/jrnal.k.200909.007.
- [18] S. Chen *et al.*, “Development of Electromagnetic Current Meter for Marine Environment,” *J Mar Sci Eng*, vol. 11, no. 1, 2023, doi: 10.3390/jmse11010206.
- [19] E. Belenguer Peris, “Análisis de nutrientes y biomasa fitoplanctónica en el tramo final y desembocadura del río Serpis,” Nov. 2013, Accessed: Jun. 14, 2024. [Online]. Available: <https://riunet.upv.es:443/handle/10251/34146>
- [20] Á. Alguacil Jiménez, “Estudio de la restitución del flujo sedimentario fluvial y litoral de la costa valenciana entre el Delta del Ebro y el Puerto de Denia.,” Jan. 2021, Accessed: Jun. 14, 2024. [Online]. Available: <https://riunet.upv.es:443/handle/10251/158768>
- [21] C. T. Hasler, J. Leathers, A. Ducharme, and N. J. Casson, “Biological effects of water velocity and other hydrodynamic characteristics of flow on dreissenid mussels,” *Hydrobiologia*, vol. 837, no. 1, pp. 1–14, Jul. 2019, doi: 10.1007/S10750-019-03976-6/TABLES/1.
- [22] J. J. Piccolo, N. F. Hughes, and M. D. Bryant, “Water velocity influences prey detection and capture by drift-feeding juvenile coho salmon (*Oncorhynchus kisutch*) and steelhead (*Oncorhynchus mykiss irideus*),” <https://doi.org/10.1139/f07-172>, vol. 65, no. 2, pp. 266–275, Feb. 2011, doi: 10.1139/F07-172.
- [23] Dpto. Física, “Guía práctica para la realización de la medida y el cálculo de errores,” 1998. Accessed: Sep. 02, 2024. [Online]. Available: [https://laboratoriofisica.uc3m.es/guiones\\_esp/errores/Incertidumbres.pdf](https://laboratoriofisica.uc3m.es/guiones_esp/errores/Incertidumbres.pdf)
- [24] “MATLAB - El lenguaje del cálculo técnico.” Accessed: Aug. 30, 2024. [Online]. Available: <https://es.mathworks.com/products/matlab.html>

## 7. ANEXOS

### 7.1. Anexo I. Relación del trabajo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030

**Tabla 13.** Grado de relación del trabajo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible

Objetivos de Desarrollo Sostenibles	Alto	Medio	Bajo	No procede
ODS 1. Fin de la pobreza				X
ODS 2. Hambre cero				X
ODS 3. Salud y bienestar				X
ODS 4. Educación de calidad				X
ODS 5. Igualdad de género				X
ODS 6. Agua limpia y saneamiento	X			
ODS 7. Energía asequible y no contaminante				X
ODS 8. Trabajo decente y crecimiento económico		X		
ODS 9. Industria, innovación e infraestructuras	X			
ODS 10. Reducción de las desigualdades				X
ODS 11. Ciudades y comunidades sostenibles				X
ODS 12. Producción y consumo responsables				X
ODS 13. Acción por el clima		X		
ODS 14. Vida submarina	X			
ODS 15. Vida de ecosistemas terrestres				X
ODS 16. Paz, justicia e instituciones sólidas				X
ODS 17. Alianzas para lograr objetivos			X	

#### Descripción de la alineación del TFM con los ODS con un grado de relación más alto

El desarrollo de un sensor subacuático para medir la velocidad de corrientes marinas con LEDs y LDRs se alinea con varios Objetivos de Desarrollo Sostenible. En el marco del ODS 9 (Industria, Innovación e Infraestructura), este sensor representa un avance tecnológico que mejora la capacidad de monitoreo en entornos acuáticos, promoviendo infraestructuras resilientes y sostenibles. A su vez, el sensor apoya el ODS 14 (Vida Submarina), al proporcionar datos precisos que son cruciales para estudiar y proteger ecosistemas marinos como arrecifes de coral, praderas de posidonia y zonas costeras en regresión. Estos datos son fundamentales para la conservación de la biodiversidad marina y la mitigación de impactos ambientales. Además, al contribuir a la gestión eficiente del agua, este proyecto también se vincula con el ODS 6 (Agua Limpia y Saneamiento), al asegurar la disponibilidad y sostenibilidad de los recursos hídricos, tanto en la superficie como en el entorno submarino.