



*La investigación, su esencia y arte.*

**FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL  
TESIS**

**EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LAS FRONTERAS EN EL  
COMPORTAMIENTO DE SOLITONES HIDRODINÁMICOS**

**Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Civil**

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:**  
RECURSOS HÍDRICOS Y TECNOLOGÍA DE MATERIALES

**OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE:**

INDUSTRIA, INNOVACIÓN E INFRAESTRUCTURA

**CAMPO DE LA INVESTIGACIÓN Y EL DESARROLLO OCDE:**

1.05.00

**PRESENTADO POR:**

Taipe Ccente, Beto

(ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0543-4436> )

**ASESOR:**

Dr. De La Cruz Araujo, Ronal Abel

(ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3551-184X> )

**PAMPAS – PERÚ**

**2024**

"Decenio de la Igualdad de oportunidades para mujeres y hombres"  
"Año del Bicentenario, de la consolidación de nuestra Independencia, y de la conmemoración de las heroicas batallas de Junín y Ayacucho"

## FACULTAD DE INGENIERÍA

<b>ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS EN LA MODALIDAD PRESENCIAL PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL</b>	
Expediente N° 17-2024-UNAT/FI-EPIC	Página 1 de 1

En esta acta, se hace constar que en el auditorium de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional Autónoma de Tayacaja "Daniel Hernández Morillo", ubicado en el distrito de Ahuaycha, provincia de Tayacaja, departamento Huancavelica, el día **17 de diciembre del 2024**, a las **12:30** horas, se reunieron los miembros del Jurado Calificador designados con Resolución de Comisión Organizadora N° 317-2023-CO-UNAT, de fecha 12 de setiembre del 2023, con el propósito de llevar a cabo el **Acto de Sustentación** de la tesis de Titulación Profesional:

### "EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LAS FRONTERAS EN EL COMPORTAMIENTO DE SOLITONES HIDRODINÁMICOS"




Dicha tesis ha sido presentada por el Bachiller en Ingeniería Civil **TAIPE CCENTE BETO** asesorado por el docente Dr. DE LA CRUZ ARAUJO RONAL ABEL, adscrito al Departamento Académico de Ingeniería Civil.

Después de haber calificado el informe final de tesis, escuchada la sustentación y las respuestas a las preguntas formuladas por el Jurado, se le declara<sup>1</sup>: APROBADO, para optar el **Título Profesional de INGENIERO CIVIL**, con la calificación de 16.3, que corresponde a la condición<sup>2</sup>: BUENO.

En consecuencia, el sustentante:

- Queda en condición de recibir el indicado Título Profesional, de conformidad con las normas legales, estatutarias y reglamentarias aplicables en materia del proceso de titulación profesional.
- NO queda en condición de recibir el indicado Título Profesional, de conformidad con las normas legales, estatutarias y reglamentarias aplicables en materia del proceso de titulación profesional.

Siendo las 13:35 horas del mismo día, mes y año, se da por concluido el Acto de Sustentación, firmando a continuación los intervinientes, en señal de conformidad de lo acontecido y consignado.

	
<b>Mg. VALQUI CASTAÑEDA CARLOS ALFREDO</b> Presidente	<b>Mg. MURGA TIRADO CHRISTIAN EDINSON</b> Miembro
	
<b>Dr. DE LA CRUZ ARAUJO RONAL ABEL</b> Asesor	

1. Indicar: Aprobado y/o Desaprobado.
2. Indicar: Excelente, Muy Bueno, Bueno, Regular y/o Desaprobado.

## CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD N° 047-2024

EL DIRECTOR DE LA UNIDAD DE INVESTIGACIÓN DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE TAYACAJA DANIEL HERNÁNDEZ MORILLO, QUIEN SUSCRIBE:

### HACE CONSTAR:

Que la tesis titulado: "EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LAS FRONTERAS EN EL COMPORTAMIENTO DE SOLITONES HIDRODINÁMICOS", desarrollado por el estudiante de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil **TAIPE CCENTE BETO**, asesorado por el **DR. DE LA CRUZ ARAUJO RONAL ABEL**, cumple con los requisitos de conformidad de originalidad mediante (*software Anti plagio Turnitin*), evidenciándose en el informe de originalidad un porcentaje de similitud de once (11%), el cual se encuentra dentro del parámetro establecido por la Universidad Nacional Autónoma de Tayacaja Daniel Hernández Morillo.

Se expide la presente constancia para los fines que estime conveniente.

Pampas, 10 de diciembre de 2024


**Dr. Gino Paul Prieto Rosales**  
Director de la Unidad de Investigación  
de la Facultad de Ingeniería

## **AGRADECIMIENTO**

A la Universidad Nacional Autónoma de Tayacaja Daniel Hernández Morillo (UNAT), por haber financiado esta investigación mediante la Resolución de Comisión Organizadora N° 348-2023-CO-UNAT. A mis docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil, quienes me inculcaron los conocimientos fundamentales para mi formación profesional.

A mi asesor de tesis, el Dr. Ronal Abel de la Cruz Araujo, por las valiosas enseñanzas, el tiempo y el espacio brindado a lo largo de esta investigación. Su guía fue clave en cada etapa del proceso, desde la concepción del problema, la experimentación y hasta la escritura de la tesis. Agradezco profundamente sus pautas de mejora, ideas y consejos, que me permitieron alcanzar los objetivos propuestos, así como la retroalimentación constante y la motivación para continuar explorando la investigación y la ciencia.

Al Ing. Daniel Gustavo Quispe Tunque, por su apoyo en la realización de los experimentos en el laboratorio de Hidráulica. Su orientación, aportes e ideas fueron esenciales para la ejecución de esta investigación y la obtención de los resultados.

A mis amigos, quienes, de una u otra forma, me brindaron su apoyo y compañía durante este proceso. Finalmente, a todas las personas que no se mencionan aquí, pero que contribuyeron con sus consejos, motivación y palabras de aliento para conseguir este objetivo.

¡Gracias a todos!

## DEDICATORIA

*Este trabajo se la dedico, en primer lugar, a Dios, por estar siempre conmigo en los momentos difíciles y de angustia, transmitiendo su paz y amor sincero. Por las bendiciones diarias, por darme la vida, la salud y las oportunidades que hicieron posible este logro. Su presencia constante me recordó que incluso en las adversidades, él tiene un propósito para cada uno de nosotros, y que con fe y perseverancia se pueden superar los mayores retos.*

*A mi familia, por su apoyo incondicional en todos mis desafíos. En especial a mis padres, Manuel Taipe y Julia Ccente, quienes son mis mayores ejemplos y guías como persona. Sin ellos, este logro no habría sido posible. Nunca me dejaron solo, y a pesar de la distancia, su amor sincero trascendió, dándome fuerza y manteniéndome enfocado en alcanzar mis metas. Son mi mayor motivación en cada uno de mis sueños, me enseñaron a ser perseverante y resiliente en cada desafío de la vida. Su amor es solo comparable al amor que Dios tiene por cada uno de nosotros. Gracias por su amor, apoyo, confianza y por estar siempre ahí conmigo en los momentos más difíciles. Los quiero profundamente.*

*A mis hermanas Ulda, Alida, Yenny y Mariliz, porque siempre estuvieron ahí cuando más los necesitaba. Por su cariño y la confianza que me dan en cada paso que doy. En especial, a mi hermanita Ulda; desde que era pequeño, fuiste muy buena conmigo. Me cuidaste, me enseñaste cosas nuevas, permitiéndome explorar, aprender y tomar decisiones en la vida, permitiéndome ser feliz, asimismo. Durante mi etapa universitaria, estuviste apoyándome incondicionalmente, y por todo ello, te agradezco de corazón.*

*A mi abuelita Anita Quispe, quien me inculcó los valores más importantes de la vida, que siempre estaba ahí, guiándome desde muy pequeño para hacer bien las cosas. Ahora, desde el cielo, sé que sigues cuidándome y acompañándome en cada una de mis metas. Ella siempre soñó con este logro para mí y tenía la certeza de que lo conseguiría. Sin sus enseñanzas, nada de esto habría sido posible. Te quiero mucho, Abuelita. Desde aquí, espero seguir dándote muchas alegrías hasta que llegue el día en que pueda verte nuevamente.*

## TABLA DE CONTENIDOS

<b>AGRADECIMIENTO</b> .....	<b>iv</b>
<b>DEDICATORIA</b> .....	<b>v</b>
<b>TABLA DE CONTENIDOS</b> .....	<b>vi</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	<b>viii</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>ix</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>xii</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>xiii</b>
<b>I. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
1.1. Planteamiento del Problema.....	1
1.2. Formulación del problema .....	5
1.3. Objetivos .....	5
1.4. Justificación.....	6
1.5. Limitaciones .....	7
<b>II. MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>9</b>
2.1. Antecedentes .....	9
2.2. Bases teóricas o Marco Conceptual .....	14
2.3. Definición de términos básicos .....	32
2.4. Hipótesis.....	33
2.5. Variables, definición conceptual y operacional. ....	34
<b>III. METODOLOGÍA</b> .....	<b>35</b>
3.1. Diseño Metodológico .....	35
3.2. Diseño muestral.....	37
3.3. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	38
3.4. Procedimiento de recolección de datos .....	39
3.5. Técnicas de Análisis y procesamiento de datos. ....	41
3.6. Configuración Experimental .....	42

3.7. Procedimiento Experimental con modulo generador tipo pistón .....	72
3.8. Procesamiento de datos experimentales .....	74
3.9. Aspectos éticos y regulatorios.....	81
<b>IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>82</b>
4.1. Efecto de las geometrías de fondo en el solitón hidrodinámico.....	82
4.2. Discusión de resultados.....	102
<b>V. CONCLUSIONES.....</b>	<b>103</b>
<b>VI. RECOMENDACIONES .....</b>	<b>104</b>
<b>VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>105</b>
<b>VIII. ANEXOS .....</b>	<b>109</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> <i>Matriz de operacionalización de variables</i> .....	34
<b>Tabla 2</b> <i>Parámetros Experimentales Generales</i> .....	71
<b>Tabla 3</b> <i>Parámetros Experimentales del Fondo</i> .....	72
<b>Tabla 4</b> <i>Parámetros Experimentales del Fondo</i> .....	74
<b>Tabla 5</b> <i>Numero de ensayos por cada caso experimental</i> .....	75
<b>Tabla 6</b> <i>Selección de Frames por cada ensayo</i> .....	76
<b>Tabla 7</b> <i>Selección de Frames por cada ensayo</i> .....	76
<b>Tabla 8</b> <i>Resultados de solitón hidrodinámico en fondo liso</i> .....	86
<b>Tabla 9</b> <i>Resultados de solitón hidrodinámico en fondo de Grava</i> .....	91
<b>Tabla 10</b> <i>Resultados de solitón hidrodinámico en fondo de arena</i> .....	96
<b>Tabla 11</b> <i>Resultado de solitón hidrodinámico en fondo liso con pendiente</i> .....	101

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> <i>Recreación del solitón en Unión Canal</i> .....	15
<b>Figura 2</b> <i>Evolución de una onda solitaria pura sin tren de ondas residual</i> .....	16
<b>Figura 3</b> <i>Evolución de una elevación inicial de agua en dos ondas solitarias</i> .....	16
<b>Figura 4</b> <i>Evolución en un tren de ondas</i> .....	17
<b>Figura 5</b> <i>Onda Senoidal y una Onda Solitaria</i> .....	19
<b>Figura 6</b> <i>Experimentos de J. Scott Russell</i> .....	20
<b>Figura 7</b> <i>Esquema para reproducir una onda solitaria</i> .....	21
<b>Figura 8</b> <i>Condición limite cinemática</i> .....	23
<b>Figura 9</b> <i>Parámetros de la Onda Solitaria</i> .....	27
<b>Figura 10</b> <i>Diseño experimental Onda Solitaria (UNAM)</i> .....	27
<b>Figura 11</b> <i>Frontera en la base del canal Hidráulico de fondo liso</i> .....	30
<b>Figura 12</b> <i>Frontera en la base del canal Hidráulico - Fondo de grava</i> .....	30
<b>Figura 13</b> <i>Frontera en la base del canal Hidráulico - Fondo de arena</i> .....	31
<b>Figura 14</b> <i>Frontera en la base del canal Hidráulico - Fondo liso con pendiente</i> .....	31
<b>Figura 15</b> <i>Esquema Diseño Cuasi - experimental</i> .....	37
<b>Figura 16</b> <i>Sistema de generación solitones hidrodinámico tipo compuerta</i> .....	40
<b>Figura 17</b> <i>Vista Esquemática del canal hidráulico HM 162</i> .....	42
<b>Figura 18</b> <i>Vista General del Canal Hidráulico</i> .....	43
<b>Figura 19</b> <i>Vista real 01 – Canal Hidráulico HM 162</i> .....	44
<b>Figura 20</b> <i>Vista real 02 – Canal Hidráulico HM 162</i> .....	44
<b>Figura 21</b> <i>Vista real 03 – Canal Hidráulico HM 162</i> .....	45
<b>Figura 22</b> <i>Controlador lógico programable (PLC) del canal de ensayo</i> .....	45
<b>Figura 23</b> <i>Interfaz del controlador lógico programable (PLC)</i> .....	46
<b>Figura 24</b> <i>Bomba de agua</i> .....	47
<b>Figura 25</b> <i>Ajuste de la inclinación eléctrico HM 162.57</i> .....	47
<b>Figura 26</b> <i>Depósito de agua 1000 l del canal de ensayo</i> .....	48
<b>Figura 27</b> <i>Caudalímetro electrónico</i> .....	49
<b>Figura 28</b> <i>2 rejillas graduadas para mediciones</i> .....	49
<b>Figura 29</b> <i>Disipador de olas</i> .....	50
<b>Figura 30</b> <i>Vista 3d esquemático del sistema generador tipo 1 en el canal de ensayo</i> .....	51
<b>Figura 31</b> <i>Vista Esquemático superior de la compuerta fija 01 y la compuerta móvil</i> .....	51
<b>Figura 32</b> <i>Vista 3d de la compuerta móvil y compuerta fija</i> .....	52

<b>Figura 33</b> <i>Ensayo de solitón hidrodinámico con el generador tipo compuerta</i> .....	53
<b>Figura 34</b> <i>Esquema de partes del sistema generador olas tipo pistón</i> .....	55
<b>Figura 35</b> <i>Vista de modelo 3d generador tipo empujador</i> .....	56
<b>Figura 36</b> <i>Generador tipo empuje de solitón hidrodinámico – Vistas reales</i> .....	57
<b>Figura 37</b> <i>Montaje general de experimento</i> .....	59
<b>Figura 38</b> <i>Montaje General de Experimento – Vista general real</i> .....	60
<b>Figura 39</b> <i>Vista general y definición de coordenadas de origen</i> .....	60
<b>Figura 40</b> <i>Esquema experimental con fondo liso</i> .....	61
<b>Figura 41</b> <i>Configuración experimental real con fondo liso</i> .....	62
<b>Figura 42</b> <i>Esquema experimental con fondo de grava</i> .....	62
<b>Figura 43</b> <i>Configuración experimental real con fondo de grava</i> .....	63
<b>Figura 44</b> <i>Configuración experimental real con fondo de grava</i> .....	63
<b>Figura 45</b> <i>Esquema experimental con fondo de arena</i> .....	64
<b>Figura 46</b> <i>Configuración experimental real con fondo de arena</i> .....	64
<b>Figura 47</b> <i>Esquema experimental con fondo liso con pendiente <math>s=5\%</math></i> .....	65
<b>Figura 48</b> <i>Configuración experimental real con fondo liso con pendiente <math>S=5\%</math></i> .....	65
<b>Figura 49</b> <i>Estructura de fondo liso con pendiente variable</i> .....	66
<b>Figura 50</b> <i>Estructura de pendiente con fondo liso – Vista real</i> .....	67
<b>Figura 51</b> <i>Ubicación de la cámara con trípode para los ensayos experimentales</i> .....	67
<b>Figura 52</b> <i>Solitón hidrodinámico con <math>h=5.8</math> cm</i> .....	68
<b>Figura 53</b> <i>Solitón hidrodinámico con <math>h=5.8</math> cm</i> .....	68
<b>Figura 54</b> <i>Solitón hidrodinámico perturbado</i> .....	69
<b>Figura 55</b> <i>Solitón hidrodinámico con un <math>h=10</math> cm</i> .....	69
<b>Figura 56</b> <i>Recorrido del solitón hidrodinámico</i> .....	69
<b>Figura 57</b> <i>Recorrido del solitón hidrodinámico en canal con <math>h=10</math> cm</i> .....	70
<b>Figura 58</b> <i>Parámetros experimentales en el canal hidráulico</i> .....	71
<b>Figura 59</b> <i>Escalamiento de Imagen con Image J</i> .....	77
<b>Figura 60</b> <i>Asignación de coordenadas de origen</i> .....	78
<b>Figura 61</b> <i>Corrección de dirección del eje y</i> .....	78
<b>Figura 62</b> <i>Insertado de grillas a la imagen</i> .....	79
<b>Figura 63</b> <i>Insertado de puntos en el borde del perfil del solitón hidrodinámico</i> .....	80
<b>Figura 64</b> <i>Exportación de puntos del image J a formato Csv</i> .....	80
<b>Figura 65</b> <i>Evolución temporal experimental del solitón en canal con fondo liso horizontal</i> .84	
<b>Figura 66</b> <i>Evolución temporal experimental del solitón en canal con fondo liso</i> .....	85

<b>Figura 67</b> <i>Evolución temporal experimental del solitón en canal de fondo de grava horizontal</i> .....	87
<b>Figura 68</b> <i>Solitón Hidrodinámico en <math>t=0.95</math> s – Fondo Grava</i> .....	89
<b>Figura 69</b> <i>Evolución temporal del solitón en un canal con fondo de grava</i> .....	90
<b>Figura 70</b> <i>Evolución temporal experimental del solitón en canal de fondo de arena horizontal</i> .....	92
<b>Figura 71</b> <i>Solitón Hidrodinámico en <math>t=1.15</math> s</i> .....	94
<b>Figura 72</b> <i>Evolución temporal del solitón en un canal con fondo de arena</i> .....	95
<b>Figura 73</b> <i>Evolución temporal del solitón en un canal con fondo liso con pendiente del 5%</i> 97	
<b>Figura 74</b> <i>Solitón Hidrodinámico en <math>t=0.95</math> s</i> .....	99
<b>Figura 75</b> <i>Evolución temporal del solitón en fondo liso con pendiente - Laboratorio</i> .....	100

## RESUMEN

En la presente investigación se estudió el efecto de las fronteras variables en el comportamiento de solitones hidrodinámicos en un canal rectangular. Los solitones, como fenómenos ondulatorios superficiales en aguas poco profundas, son de gran relevancia tanto desde el punto de vista científico y de la ingeniería, especialmente en contextos donde pueden provocar inundaciones o afectar estructuras hidráulicas, como canales, presas de embalse, rompeolas costeros, entre otros. Con el fin de entender como las fronteras del fondo afectan el perfil del solitón hidrodinámico, se ha iniciado estudiando los solitones en un canal hidráulico con fondo liso horizontal, para tener un sistema de control que nos permita la validación experimental de nuestro sistema generador de solitones. Luego, se ha variado en un tramo del canal con un fondo de grava, fondo de arena y fondo liso con pendiente al 5%. Para cada tipo de fondo antes mencionado se tomaron como muestra 5 ensayos, haciendo un total de 20 ensayos. En el caso de fondo liso horizontal, se logró reproducir el solitón hidrodinámico, la cual compara muy bien con la predicción teórica clásica, es decir la ecuación de Korteweg de Vries (KdV). Por otro lado, se observó que, para los casos de fondo de grava, fondo de arena y fondo liso con una pendiente al 5 % perturban la regularidad del solitón, generando incrementos en sus amplitudes de un 8.54% en  $t = 0.80 s$ , 9.16% en  $t = 1.10 s$  y del 1.09 % en  $t = 0.95 s$ , respectivamente. Además, se observó un cambio en el ancho del solitón hidrodinámico debido al alargamiento de la cola izquierda, así como un efecto de empinamiento en la cola derecha, lo que ocasionó que la cresta se curvara y posteriormente se produjera el rompimiento de la onda. Este estudio muestra que la geometría del fondo del terreno donde se desarrolla el solitón hidrodinámico tiene un impacto crucial en su comportamiento. Estos hallazgos pueden ser aplicados para responder de manera más eficiente a eventos de inundación, mejorar los diseños de estructuras de disipación en la protección costera y contribuir a la preservación y protección de paisajes asociados con la dinámica de los solitones.

**Palabras Clave:** Solitón Hidrodinámico, Ondas no lineales, Ecuación KdV, Generador de Solitones

## ABSTRACT

In the present investigation, the effect of variable boundaries on the behavior of hydrodynamic solitons in a rectangular channel was studied. Solitons, as surface wave phenomena in shallow water, are of great relevance from both scientific and engineering points of view, especially in contexts where they can cause flooding or affect hydraulic structures, such as canals, reservoir dams, coastal breakwaters, among others. In order to understand how the bottom boundaries affect the hydrodynamic soliton profile, we have started studying the solitons in a hydraulic channel with horizontal smooth bottom, to have a control system that allows us the experimental validation of our soliton generator system. Then, it has been varied in a section of the channel with a gravel bottom, sand bottom and smooth bottom with 5% slope. For each type of bottom mentioned above, 5 tests were taken as samples, making a total of 20 tests. In the case of the horizontal smooth bottom, the hydrodynamic soliton was reproduced, which compares very well with the classical theoretical prediction, i.e. the Korteweg de Vries (KdV) equation. On the other hand, it was observed that, for the cases of gravel bottom, sand bottom and smooth bottom with a 5 % slope disturb the regularity of the soliton, generating increases in their amplitudes of 8.54 % at  $t = 0.80$  s, 9.16 % at  $t = 1.10$  s and 1.09 % at  $t = 0.95$  s, respectively. In addition, a change in the width of the hydrodynamic soliton was observed due to the elongation of the left tail, as well as a steepening effect on the right tail, which caused the crest to curve and subsequently resulted in wave breaking. This study shows that the geometry of the bottom of the terrain where the hydrodynamic soliton develops has a crucial impact on its behavior. These findings can be applied to respond more efficiently to flood events, improve designs of dissipation structures in coastal protection, and contribute to the preservation and protection of landscapes associated with soliton dynamics.

**Keywords:** Hydrodynamic Soliton, Nonlinear waves, KdV Equation, Soliton Generator.

# I. INTRODUCCIÓN

## 1.1. Planteamiento del Problema

### *1.1.1. Situación problemática*

El Perú, con su variada topografía y diversidad geológica, se encuentra constantemente expuesto a eventos hidrodinámicos tales como son los tsunamis que pueden tener un impacto significativo en su entorno natural y en la vida de la población. La comprensión y predicción de estos eventos, como inundaciones repentinas o cambios en los niveles de los cuerpos de agua, son cuestiones de importancia crítica para la seguridad.

De acuerdo a Francis et al. (2020) las olas de tsunami representan un riesgo significativo para las zonas costeras, lo que ha motivado numerosos estudios a lo largo del tiempo para entender su comportamiento. Para simular una ola de tsunami, se han empleado frecuentemente las ondas solitarias (solitones hidrodinámicos), ya que capturan algunas de sus características clave, como su forma estable. Lakshmanan (2012) menciona que la propagación de los tsunamis, en muchos casos, ocurre en forma de ondas en aguas poco profundas y, a veces, puede adoptar la forma de ondas solitarias o solitones

La mayoría de los daños causados por los tsunamis, como las inundaciones internas y la destrucción de estructuras, están íntimamente relacionados con el “run-up” o la elevación máxima de las olas por encima del nivel medio del mar cerca de la costa. Los investigadores a menudo utilizan las ondas solitarias como condiciones iniciales para estudiar las características del “run-up” de los tsunamis debido a las similitudes hidrodinámicas entre ambos (Jeong et al., 2019). Entre las catástrofes marinas, el tsunami oceánico es devastador tanto para la población como para las estructuras costeras. Un ejemplo de esto es el tsunami de Tohoku en 2011 en el océano Pacífico, causado por un terremoto de magnitud 9 en la escala de Richter en el este de Japón. Por lo tanto, es fundamental adquirir un conocimiento

más profundo de los procesos hidrodinámicos de las olas oceánicas que afectan estructuras tipo placa (Niu et al., 2022).

El terremoto del Océano Índico ocurrido en el año 2004, con una magnitud de 9.1 en la escala de Richter, y el tsunami asociado causaron la mayor cantidad de víctimas mortales documentadas por un terremoto hasta la fecha. Este desastre afectó a 10 países en el sur de Asia y el este de África, provocando más de 283,100 muertes, 14,100 personas desaparecidas y 1,126,900 desplazados. La mayoría de las muertes fueron resultado del proceso de inundación generado por el sobrepaso de las olas del tsunami (Lee et al., 2022).

El impacto directo de un tsunami se origina a partir de un proceso que genera ondas de choque, elevación del nivel del agua, rebase de olas e inundaciones. Por esta razón, los investigadores han enfocado sus estudios en la formación y elevación de olas mediante el uso de olas solitarias o similares a tsunamis, en lugar de estudiar los tsunamis directamente en las zonas costeras (Lee et al., 2022).

Además, como lo menciona Lu & Wang (2015) la investigación sobre cómo interactúan las olas con las estructuras, considerando la transformación de las olas y las fuerzas hidrodinámicas generadas, es fundamental para la ingeniería en zonas costeras. Un ejemplo clave es el análisis de las fuerzas de elevación que actúan sobre cubiertas horizontales u otras estructuras flotantes bajo la influencia de grandes olas en aguas poco profundas, ya que estas fuerzas son cruciales para el diseño de dichas estructuras.

Por ende, según Ghafari et al. (2021), en las áreas costeras, las olas muchas veces suelen manifestarse como olas solitarias, motivo por el cual numerosos investigadores analizan cómo estas interactúan con distintos tipos de rompeolas y estudian los patrones de flujo tanto frente a ellos como detrás. Determinar la forma y el tamaño óptimos de los rompeolas implica examinar el comportamiento del flujo alrededor de estas estructuras, la intensidad de las fuerzas que soportan y su eficacia en disminuir tanto la energía como la altura de las olas, es por ello que se requiere hacer investigaciones de su comportamiento en escalas menores para poder replicarlos a escala real.

Por otro lado, es muy importante en los casos de mitigación de riegos, en zonas de presas, donde es propenso a que se produzcan eventos como deslizamientos, la cual genera una onda impulso, la cual comparte características similares al de una onda tipo solitón. Las olas de impulso comparten características similares a los tsunamis, son generadas por el desplazamiento muy rápido de masas como el deslizamiento de tierras, desprendimiento de

rocas, avalanchas de nieve y desprendimientos de glaciares en una masa de agua. En los embalses artificiales, estas olas pueden ascender y sobrepasar la presa, ejerciendo fuerzas hidrostáticas y dinámicas sobre su estructura. Por ello, se utilizan ondas solitarias como sustituto de las ondas de impulso (Hess et al., 2023).

Un hecho histórico mortífero ocurrió el 9 de octubre de 1963 en la presa de Vajont (Italia), de 262 metros de altura, cuando el flanco sur del monte Toc, con un volumen de deslizamiento estimado en 270 millones de m<sup>3</sup>, se deslizó hacia el embalse y desplazó el agua almacenada. Aunque 158 personas murieron debido al inmediato ascenso de las olas en las comunidades de Erto y Casso, adyacentes a la orilla del embalse, la mayoría de las aproximadamente 2.000 víctimas mortales se produjeron en el pueblo de Longarone, aguas abajo de la presa, a causa de la inundación que siguió al desbordamiento de las olas (Hess et al., 2023).

De acuerdo a Soomere (2012) un solitón es una entidad no lineal que se encuentra localizada tanto en el espacio como en el tiempo (como una onda solitaria, un impulso, un paquete de ondas o una discontinuidad) y que mantiene su forma e identidad de manera permanente, incluso al interactuar con otras entidades similares. Lakshmanan (2012) menciona que es una onda dispersiva no lineal, que logran un delicado equilibrio entre los efectos de dispersión y no linealidad, permitiendo la aparición de ondas solitarias localizadas. Estas ondas, después de interactuar entre sí, mantienen asintóticamente sus formas y velocidades. De acuerdo a Cascante & Martín (2016), son ondas de gran amplitud cuya velocidad de propagación varía en función de su amplitud. Aunque son dispersivas, mantienen su forma intacta. Además, corresponden al tipo de onda solitaria y, tras interactuar con otra onda solitaria, recuperan completamente sus propiedades originales.

En este contexto, los solitones hidrodinámicos, que son ondas no lineales que viajan a través de medios líquidos que mantienen su forma y velocidad, representan un fenómeno natural complejo y poco comprendido. Su comportamiento en condiciones geográficas particulares, especialmente en relación con las geometrías de las fronteras, como el tipo de fondo (liso, grava, arena, etc.) en ríos, lagos y zonas costeras, plantea preguntas fundamentales que deben ser abordadas.

Tal como lo afirma, Bastón et al. (2010) saber cuál es el peligro de inundación que puede ocurrir en caso de un evento extremo es fundamental para planificar cómo ordenar el territorio en la costa, diseñar formas de reducir los daños en caso de un desastre y crear

planes para evacuar o enfrentar emergencias. Por lo tanto, es importante tener acceso a investigaciones y modelos numéricos que puedan predecir o representar cómo se comportan este tipo de ondas, ya sea que sean generadas por un terremoto, en un canal de agua u otros casos en la ingeniería.

Actualmente, la falta de una comprensión sólida de cómo las distintas geometrías de las fronteras afectan a los solitones hidrodinámicos limita la capacidad de los ingenieros para predecir y mitigar eficazmente eventos hidrológicos extremos. Esto se traduce en desafíos para la gestión del agua, la planificación urbana, la seguridad de la población en áreas propensas a inundaciones y los cambios drásticos en los niveles de agua, como ocurre en las costas, lagos y en los grandes proyectos realizados en el Perú como Chancay, Chavimochic, Proyecto Especial Chinecas, Tránsito Olmos y otros.

En el Perú un fenómeno natural especial son las olas de Chicama considerada la “legendaria” ola de izquierda más larga del mundo (NASA, 2022) y se encuentra en el Puerto de Chicama, en la región de La Libertad. Esta ola, es famosa entre los surfistas por ser una de las pocas en el mundo que permite recorrer una gran distancia sobre tabla. En condiciones ideales, esta ola de izquierda puede extenderse hasta 2.2 kilómetros, medir 2.5 metros de altura y mantener su forma, lo que permite surfearla durante varios minutos, algo excepcional en el mundo del surf (Montoro, 2024). La ola de Chicama es una ola bastante rápida, que rompe sobre fondo de arena y se divide en 5 secciones: El Cabo, Malpaso, Llaves, El Punto y El Hombre, siendo “el cabo” la más famosa y favorita por los surfistas (The Indian Face, 2024).

La ola de izquierda es aquella que, al romper, se desplaza hacia la izquierda desde el punto de vista del surfista que está mirando al mar. Esto implica que, al surfear una ola de izquierda, el surfista se moverá en sentido contrario a las agujas del reloj, lo que le permite realizar maniobras utilizando el lado izquierdo de su cuerpo (Montoro, 2024). Además, En 2013 el área obtuvo protección del gobierno contra el desarrollo y la construcción de infraestructura que dañaría las olas, con el Reglamento de la Ley N° 27280, Ley de preservación de las rompientes apropiadas para la práctica deportiva (NASA, 2022). En ese sentido es importante conocer mejor el comportamiento de estas olas y de cómo el fondo marino afecta su forma, con la cual se puede obtener datos relevantes para su preservación o generación artificial de estas en otras zonas, con fines de turismo o protección.

Por lo tanto, es crucial abordar esta brecha de conocimiento para desarrollar estrategias efectivas de gestión de riesgos y recursos para la planificación y construcción de estructuras eficientes para la disipación de estas olas; además, su preservación de esta con fines turísticos. Asimismo, es necesario poder entender mejor su comportamiento frente a acciones externas, sean estas naturales o artificiales.

Esta investigación busca responder a la siguiente pregunta: ¿Cómo afectan las fronteras, particularmente las características del fondo como liso, grava, arena y liso con pendiente al 5%, en el comportamiento de los solitones hidrodinámicos?

La solución de esta situación problemática no solo contribuirá al conocimiento científico en el campo de la hidráulica, sino que también tendrá implicaciones prácticas en la toma de decisiones más eficientes y oportunas.

## **1.2. Formulación del problema**

### ***1.2.1. Problema general***

- ¿Cuál es el efecto de las geometrías de las fronteras en el comportamiento de solitones hidrodinámicos?

### ***1.2.2. Problemas específico***

- a) ¿Cuál es la influencia de un fondo liso en el comportamiento del ancho, amplitud y velocidad de solitones hidrodinámicos?
- b) ¿Cuál es la incidencia de un fondo con grava en el comportamiento del ancho, amplitud y velocidad de solitones hidrodinámicos?
- c) ¿Cuál es el impacto de un fondo de arena en el comportamiento del ancho, amplitud y velocidad de solitones hidrodinámicos?
- d) ¿Cuál es la influencia de la variabilidad de la pendiente con fondo liso del canal en el comportamiento del ancho, amplitud y velocidad de solitones hidrodinámicos?

## **1.3. Objetivos**

### ***1.3.1. Objetivo General***

- Determinar el efecto de las geometrías de las fronteras en el comportamiento de solitones hidrodinámicos.

### **1.3.2. *Objetivos Específicos***

- a) Establecer el efecto de un fondo liso en el comportamiento del ancho, amplitud y velocidad de solitones hidrodinámicos.
- b) Evaluar la incidencia de un fondo con grava en el comportamiento del ancho, amplitud y velocidad de solitones hidrodinámicos.
- c) Calcular el impacto de un fondo de arena en el comportamiento del ancho, amplitud y velocidad de solitones hidrodinámicos.
- d) Determinar la influencia de la variabilidad de la pendiente con fondo liso del canal en el comportamiento del ancho, amplitud y velocidad de solitones hidrodinámicos.

## **1.4. Justificación**

### **1.4.1. *Justificación tecnológica***

El estudio de las diversas geometrías de frontera en el comportamiento de los solitones hidrodinámicos posee una notable relevancia tecnológica, ya que estos fenómenos tienen aplicaciones prácticas en múltiples campos, como la ingeniería civil, la energía renovable y la oceanografía, entre otros.

En la ingeniería civil, la comprensión de los solitones hidrodinámicos puede ser fundamental para el diseño de estructuras capaces de resistir las fuerzas generadas por las olas del mar, tales como diques y rompeolas. Además, el conocimiento sobre la propagación de estos fenómenos facilita la predicción de su impacto sobre las infraestructuras costeras, lo que permite optimizar su diseño y planificación utilizando las tecnologías actuales.

En el ámbito de la energía renovable, los solitones hidrodinámicos tienen el potencial de ser aprovechados para generar energía a partir del movimiento de las olas marinas. El análisis de su comportamiento en distintas geometrías de frontera puede contribuir a mejorar la eficiencia de los dispositivos de generación de energía undimotriz, promoviendo así una transición hacia un futuro más sostenible.

### **1.4.2. *Justificación Social***

El estudio del efecto de las fronteras en el comportamiento de los solitones hidrodinámicos tiene una relevante justificación social, ya que impacta directamente en la seguridad y el bienestar de las comunidades costeras.

En primer lugar, el entendimiento de cómo se propagan los solitones hidrodinámicos en diferentes geometrías de frontera puede ser fundamental para optimizar la planificación y gestión de desastres naturales, como tsunamis e inundaciones costeras. El desarrollo de modelos numéricos precisos, basados en estudios experimentales como el presente, puede facilitar la predicción del comportamiento de estos fenómenos en diversos escenarios, permitiendo una mejor preparación y una respuesta más eficaz ante emergencias.

Además, la investigación sobre los solitones hidrodinámicos puede ser clave en el diseño y construcción de infraestructuras costeras más resistentes y seguras, como diques y rompeolas. Este conocimiento contribuiría a proteger a las comunidades costeras de los efectos devastadores de tormentas e inundaciones, mejorando así su seguridad y calidad de vida.

Asimismo, el estudio de los solitones tiene implicaciones para la preservación de olas con similares características, como las Olas de Chicama, reconocidas por su larga duración y recorrido, ideales para la práctica del surf. Comprender cómo el fondo influye en el perfil del solitón puede facilitar el desarrollo de soluciones artificiales para la conservación y el cuidado de estas olas, contribuyendo tanto a la sostenibilidad del entorno como al fomento de actividades recreativas y turísticas en las zonas costeras.

## **1.5. Limitaciones**

En cuanto a la parte experimental, una de las limitaciones de este estudio radica en que el laboratorio especializado de Hidráulica de la UNAT no dispone de un sistema automático para la generación de olas tipo solitón, sino únicamente de un generador de olas periódicas. Debido a esta restricción, en esta investigación se diseñó un módulo experimental de tipo pistón o empuje para la generación de solitones hidrodinámicos.

El presupuesto disponible para la implementación de un mecanismo más automatizado, como un generador tipo pistón con servo motor, que podría ser controlado mediante un código en Python para lograr un desplazamiento más preciso de la paleta del generador, es limitado. Además, la adquisición de una cámara PIV (Velocimetría de Imágenes de Partículas) para la medición de velocidades en los solitones hidrodinámicos también enfrenta restricciones presupuestarias.

Asimismo, la accesibilidad a equipos especializados en la zona es otro factor limitante para la construcción e implementación de un módulo experimental automatizado tipo pistón, adaptado al tipo y las dimensiones del canal hidráulico utilizado en este estudio.

Además, en esta investigación se consideraron un número limitado de geometrías de frontera debido a las restricciones del canal experimental y los recursos disponibles. Esto limita la generalización de los resultados a otros escenarios con geometrías más complejas o diferentes configuraciones del fondo.

## II. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Antecedentes

#### 2.1.1. A nivel internacional

Booshi & Ketabdari (2021) desarrollaron un modelo numérico para estudiar la interacción entre ondas solitarias y rompeolas porosos emergidos, utilizando el método del Volumen de Fluido (VOF). Para la generación de olas se utilizó un generador tipo pistón ubicado en el extremo del canal. El estudio encontró que el modelo desarrollado es una herramienta poderosa para la modelización de la interacción entre las olas y la estructura del rompeolas. El estudio evaluó los efectos de parámetros importantes como la porosidad, los coeficientes de arrastre e inercia del medio, la sumersión y emersión del rompeolas en la amortiguación y reflexión de las olas. Los resultados mostraron que estos parámetros tienen efectos significativos en la amortiguación y reflexión de las olas. La porosidad del rompeolas ( $n$ ) desempeña un papel importante en su rendimiento hidráulico, ya que una disminución de  $n$  de 0.7 a 0.4 conduce a una reducción del 75% en la altura de la ola transmitida. El valor óptimo de porosidad para maximizar la disipación de energía de las olas incidentes es 0.5. El estudio recomienda investigaciones adicionales para optimizar estos parámetros en el diseño de rompeolas porosos efectivos. La conclusión del estudio es que el modelo numérico desarrollado utilizando el método VOF es una herramienta efectiva para estudiar la interacción entre ondas solitarias y rompeolas porosos emergidos.

Asimismo Ghafari et al. (2021), determinaron la interacción de una onda solitaria con dos obstáculos rectangulares sumergidos a través de un procedimiento experimental y numérica en la cual utilizaron técnicas de luz blanca y velocimetría de imagen de partículas (PIV) para estudiar el perfil de superficie libre de una ola solitaria y el campo de flujo en un

procedimiento experimental. Sus pruebas con PIV revelaron que se generan dos vórtices en el sentido de las agujas del reloj entre los dos obstáculos y después de ellos. Los resultados de las pruebas con luz blanca mostraron que en el paso de la onda solitaria sobre los dos obstáculos se producen tres fenómenos; de rotura de la onda, intercambio cresta-cresta y mezcla aire-agua. Además, utilizaron un modelo numérico bidimensional transitorio para analizar cómo la ola solitaria interactúa con los obstáculos rectangulares, evaluando el efecto de la altura y la separación entre estos. Los resultados numéricos indicaron que el aumento en la altura de los obstáculos incrementa la fuerza de arrastre sobre ellos, la intensidad de los vórtices, la pérdida de energía y reduce la altura de la ola solitaria. Los investigadores concluyeron que la presencia del segundo obstáculo y la rotura de la ola restringen el movimiento de los vórtices, lo que en algunos casos genera un coeficiente de arrastre negativo sobre los obstáculos. A medida que la distancia entre los obstáculos se incrementa hasta  $S/L = 1.5$ , la pérdida de energía, la disminución en la altura de la ola y la fuerza del vórtice generado entre los obstáculos tienden a aumentar. Sin embargo, al aumentar esta distancia, se observó una disminución en la fuerza del vórtice que se forma después del segundo obstáculo.

Tripepi et al. (2023), determinaron la reducción del wave run-up inducido por ondas solitarias en playas inclinadas mediante barreras sumergidas rígidas. Se realizaron 198 pruebas de laboratorio en el canal de ondas de la Universidad de Calabria, adoptando tres pendientes de playa ( $1/10$ ,  $1/8$  y  $1/5.67$ ), tres profundidades de agua  $d$  (0.254 m, 0.181 m y 0.141 m) y barreras rígidas de tipo cuadrado y rectangular con  $a = 0.127$  m y  $b$  iguales a 0.127 m y 0.254 m. por ello la relación  $a/d$  fuese 0.5, 0.7 y 0.9 respectivamente. Para hacer comparaciones sobre el rendimiento de las barreras en la reducción del run-up, se realizaron 99 pruebas considerando los mismos casos experimentales sin las barreras. Entre sus resultados experimentales se muestra que el mayor run-up está relacionado a la mayor pendiente de la playa, es decir para  $s = 1/5.67$ . La mayor reducción del run-up de la ola solitaria está ligado a una mayor altura relativa de la barrera, como  $a/d = 0.9$ , mientras que la menor a un  $a/d = 0.5$ . Respecto al impacto de la extensión de las barreras, se nota que la rectangular tiende a ofrecer una reducción mayor en comparación con la cuadrada. Esta variación se vuelve más pronunciada cuando los valores de  $A/a$  son elevados y para  $a/d = 0.9$ . Entre sus conclusiones se mostró que la disminución del run-up de la onda solitaria debido a los rompeolas rígidos es significativa cuando  $a/d = 0.9$  (variando entre un 25% y un 45%, aproximadamente), mientras que para  $a/d = 0.5$ , la reducción es menor (entre un

4% y un 10%, aproximadamente). Respecto al efecto de la pendiente de la playa, la mayor reducción se logra con  $s = 1/5,67$ , manteniendo la misma altura relativa de la barrera. En cambio, pendientes de  $s = 1/8$  y  $1/10$  producen resultados similares debido a un fenómeno de saturación en el run-up. Además, el uso de barreras rectangulares en lugar de cuadradas también reduce el run-up de la onda solitaria, especialmente en pendientes más pronunciadas.

Jeong et al. (2019), realizaron la predicción numérica de la propagación y el run-up de una onda solitaria sobre fondos marinos no planos con diversos ángulos de pendiente utilizando un método MPS (moving particle simulation) refinado. Sus resultados de la simulación numérica de la propagación y el impacto de una ola solitaria en una serie de pendientes no planas fueron comparadas con resultados experimentales, de la cual obtuvieron la altura de la ola solitaria en función del tiempo en diferentes ángulos de pendiente; así obtuvieron los valores numéricos de la altura máxima de la ola solitaria y la distancia de propagación en cada ángulo de pendiente, y los resultados son que en una pendiente de 1:5, la altura máxima de la ola solitaria fue de 0.66 m y la distancia de propagación fue de 6.8 m. En una pendiente de 1:20, la altura máxima de la ola solitaria fue de 0.26 m y la distancia de propagación fue de 12.4 m. Con sus resultados de la simulación numérica indicaron que el método refinado de simulación de partículas utilizado en el estudio fue capaz de predecir con precisión la propagación y el run-up de una onda solitaria en diferentes geometrías de frontera. Además, los resultados de la simulación fueron comparados con experimentos previos y se encontró que ambos conjuntos de datos presentaban una buena concordancia. Entre sus conclusiones muestran que el método refinado de simulación de partículas utilizado en el estudio es efectivo para predecir el comportamiento de las ondas solitarias en diferentes geometrías de frontera.

Yin et al. (2023), estudiaron las interacciones entre olas solitarias y manglares con raíces. A través de experimentos en laboratorio, evaluaron cómo se disipan las olas al atravesar un bosque de manglares de la especie *Rhizophora* a una escala de 1:10, con el fin de resaltar la importancia de las raíces de los manglares en la atenuación de las olas. Para ello, desarrollaron un modelo numérico de manglar con raíces, representando el tronco como un cilindro y las raíces mediante un término de resistencia y porosidad en la ecuación de momento. Entre sus resultados se muestra que los factores principales que influyen en la atenuación del oleaje son los parámetros de la ola (profundidad del agua en calma y altura de la ola incidente) y un parámetro específico de la vegetación (el área proyectada sumergida

de la vegetación). Asimismo, al incrementarse la altura de las olas incidentes y relativas, también aumentaba el coeficiente de atenuación del oleaje de la vegetación. En cambio, al elevarse la profundidad del agua en calma, dicho coeficiente tendía a disminuir. Además, la influencia de la profundidad del agua en calma sobre el coeficiente de atenuación fue más significativa en el modelo M9 que en el modelo C9. En un contexto de profundidad de agua en calma constante, un mayor tamaño del área proyectada sumergida de la vegetación mejoró la capacidad de la vegetación para atenuar las olas. Finalmente, el modelo de red neuronal BP proporciona una predicción más precisa del coeficiente de atenuación del oleaje en comparación con otros métodos, lo que lo convierte en una herramienta efectiva para prever la disipación de olas solitarias en bosques de manglares.

Christou et al. (2021), estudiaron la interacción de una onda solitaria con una placa finita sumergida y revelar los efectos de la tridimensionalidad de este problema de interacción onda-estructura en los niveles de agua y las cargas de onda en la placa. Además, se visualizó el flujo y se revelaron las estructuras de flujo instantáneas y las variaciones de presión resultantes alrededor de la placa. Ellos mostraron que la presión diferencial entre el lado inferior y superior de la placa genera un flujo en la dirección de la envergadura y crea estructuras de flujo únicas y fluctuaciones de la superficie del agua cerca de la placa debido a la tridimensionalidad del problema. También encontraron que las fuerzas verticales y horizontales se reducen cuando la placa se fija a un ángulo de 45 grados, y aparecen pequeñas fluctuaciones del nivel del agua, reflejando el patrón del flujo de rotación cerca de los bordes de la placa. Se observó que los remolinos más intensos se generan en las esquinas de los bordes delantero y trasero de la placa debido a la separación del flujo en la dirección de la corriente. En conclusión, encontraron una notable reducción en los picos de fuerzas ascendentes y descendentes, que disminuyen en un 40% y un 30% respectivamente, debido a los efectos tridimensionales y del flujo a lo largo del vano en el caso de la placa finita. Además, se analizó cómo el ángulo de ataque influye en la interacción entre la onda y la placa. Las fuerzas se ven modificadas según la dirección de la ola incidente; las fuerzas máximas de sustentación y arrastre sobre la placa rotada disminuyen aproximadamente un 20% en comparación con la placa finita sin rotación (en posición original), mientras que los niveles de agua alrededor de la placa se mantienen casi iguales

Niu et al. (2022), estudiaron la evolución del campo cinemático bidimensional alrededor de una placa rígida suspendida, bajo la influencia de ondas solitarias. La estructura tipo placa fue fijada a 2 cm, 4 cm y 6 cm por encima del agua y la profundidad del agua se

mantuvo en 30 cm, mientras que las ondas solitarias, que simulan tsunamis costeros, fueron generadas por un generador de olas tipo pistón con alturas comprendidas entre 6 cm a 10 cm. Para medir el campo de velocidad en torno a la placa emplearon la técnica de Velocimetría de Imágenes de Partículas (PIV), un método no invasivo basado en el análisis de imágenes. La evolución del flujo se clasificó en tres fases: (A) Generación de la lengua de agua, (B) rebase de agua sobre la placa y (C) separación del flujo de la placa. Sus resultados mostraron que en la fase A se genera una lengua de agua verde que asciende rápidamente sobre la placa luego se vuelca y golpea la zona superior. En la fase B se observó se muestra los efectos del inicio del vuelco de la lengua, el estallido de las burbujas retenidas, el vuelco en el extremo, colisión y generación de vórtices en el extremo frontal. En la C la separación del flujo en la parte delantera y termina en la parte trasera. Asimismo, se concluyó que al elevar la altura de la placa se produce una reducción en las velocidades generales del flujo, con menor cantidad de aire atrapado durante la fase B, aunque se observa una mayor área aireada en la fase C. Por otro lado, incrementar la altura de la ola incidente puede generar un aumento notable en las velocidades generales y provocar una mayor incorporación de aire en el agua.

Lee et al. (2022), menciona que los dispositivos de absorción de oleaje instalados frente a los diques resultan efectivos para mitigar el rebase de las olas y las inundaciones causadas por oleaje periódico. Sin embargo, el mecanismo mediante el cual estos absorbentes reducen el rebase e inundación provocados por olas de largo período, como tsunamis y mareas de tempestad, no está del todo claro. Por lo tanto, llevaron a cabo ensayos de modelado físico junto con un análisis numérico utilizando un modelo de simulación de grandes remolinos y un código interno para analizar las características del rebase e inundación en función del tipo de revestimiento frente a olas solitarias. Sus resultados muestran que con un revestimiento vertical (VR), la velocidad vertical predominante de la ola solitaria no logra cambiar de dirección en ángulo recto durante el rebase, lo que causa separación del flujo en la cresta y genera una mayor resistencia y vorticidad. En cambio, con un revestimiento absorbente de oleaje (WAR), la sección transversal del flujo se reduce a lo largo de la pendiente del absorbente, aumentando la velocidad del flujo de la ola solitaria y haciendo que predomine la velocidad horizontal en el proceso de rebase e inundación. Se sabe que las estructuras WAR son más efectivas que las VR en la reducción de daños por desbordamiento e inundación causados por oleaje periódico. No obstante, sobre olas solitarias ha mostrado resultados experimentales y numéricos que contradicen esa

percepción general. Además, se concluye que, al utilizar un revestimiento inclinado para reducir el rebase e inundación en el caso de olas de largo período como las solitarias, es fundamental contar con una distancia y pendiente adecuadas para permitir una efectiva disipación de energía.

### **2.1.2. A nivel nacional**

Flores & Humberto (1984), con el propósito de resolver la ecuación de Korteweg de Vries, la cual se encuentra en contextos de hidrodinámica (estudio de las ondas en aguas poco profundas), la propagación de ondas en cristales enarmónicos y colisiones de ondas en plasma. Su trabajo se dividió en tres partes distintas. La primera parte proporciona los fundamentos analíticos del Método de Inversión Darboux (M.I.D), la segunda se centra en la resolución de problemas no lineales que se integran en el M.I.D, y finalmente, concluye con una visión general de los eventos más significativos que han contribuido al avance en la comprensión de fenómenos no lineales, como las Ondas Solitónicas.

## **2.2. Bases teóricas o Marco Conceptual**

### **2.2.1. Solitones Hidrodinámicos**

#### **2.2.1.1. Historia de la onda solitaria o solitón**

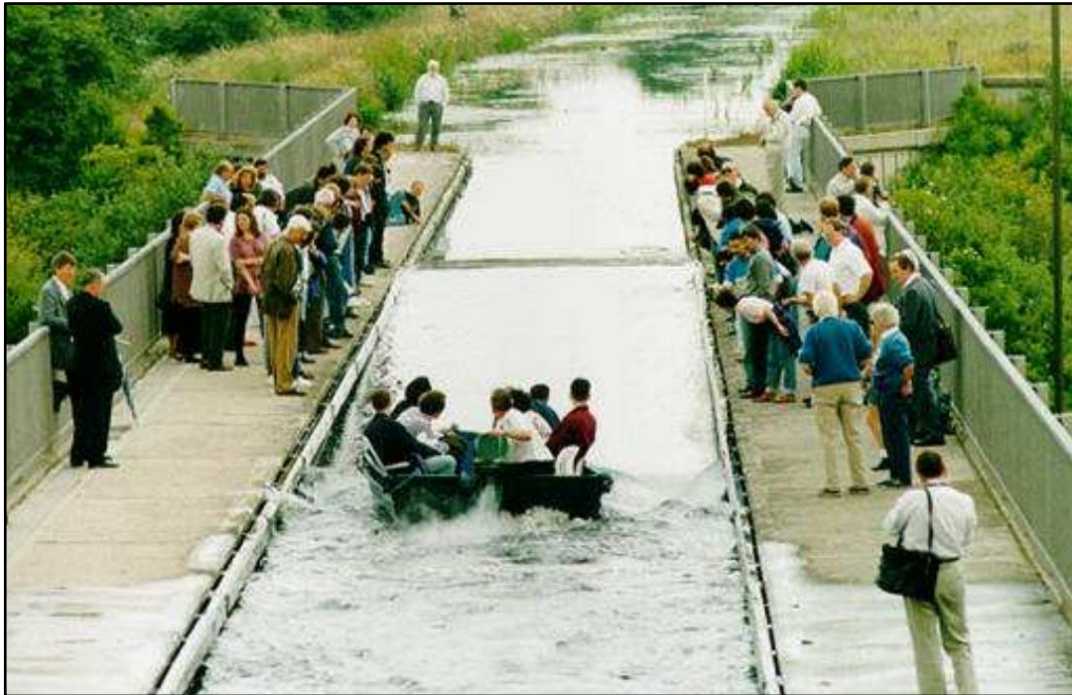
La primera observación experimental de una onda solitaria la realizó en agosto de 1834 un ingeniero escocés llamado John Scott Russell (1808-1882). Scott-Russell informó su observación en los Informes de la Asociación Británica de esta manera:

*“Estaba observando el movimiento de una embarcación que era arrastrada rápidamente a lo largo de un canal estrecho por un par de caballos, cuando la embarcación se detuvo repentinamente, pero no ocurrió lo mismo con la masa de agua en el canal que había puesto en movimiento. Esta masa de agua se acumuló alrededor de la proa de la embarcación en un estado de violenta agitación y luego, de manera súbita, avanzó con gran velocidad, adquiriendo la forma de una gran elevación solitaria, una montaña redonda, suave y bien definida de agua. Continuó su curso a lo largo del canal aparentemente sin cambiar de forma ni disminuir su velocidad. La seguí a caballo y la alcancé mientras seguía avanzando a una velocidad de unas ocho o nueve millas por hora, conservando su figura original de unos treinta pies de longitud y entre uno y medio pies de altura. Su altura disminuyó gradualmente y, después de perseguirla durante una o dos millas, la perdí en las curvas del canal. Así, en el mes de agosto de 1834, tuve mi primer encuentro casual*

con ese fenómeno singular y hermoso al que llamé la “Ola de traslación””(Russell, 1844, p. 311).

### Figura 1

Recreación del solitón en Unión Canal



*Nota.* Recreación del solitón 1995, Unión Canal, cerca de Edimburgo para reproducir el primer avistamiento de una onda solitaria en dicho canal, se muestra varios científicos observando dicho fenómeno. Tomado de *Hydrodynamic Solitons*, por M. Reimossenet, 1999.

Esta onda solitón localizada en forma de joroba que se propaga en una sola dirección espacial con forma no deformada tiene propiedades de estabilidad espectaculares. John Scott Russell llevó a cabo numerosos experimentos para estudiar las propiedades de esta onda las cuales fueron las siguientes (Remoissenet, 1999).

- Estas ondas localizadas tienen forma de campana y se desplazan con forma y velocidad.
- En aguas de profundidad  $h$  inalterada, una ola de elevación  $a_m$ , hacia la cual apunta la cresta se propaga con velocidad, donde  $g$  es la aceleración debida a la gravedad.

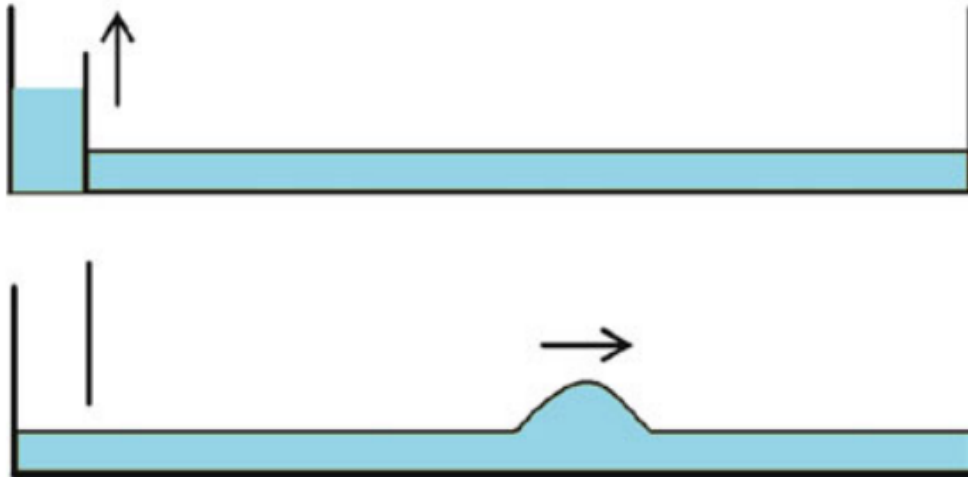
$$V = \sqrt{g(h + a_m)} \quad (1)$$

- Una elevación inicial de agua puede, dependiendo de la relación entre su altura y la longitud, evolucionar hacia una onda solitaria pura, una onda solitaria única

más un tren de ondas residual, o dos o más ondas solitarias con o sin tren de ondas residual, como se representadas en la figura 2 y 3

### Figura 2

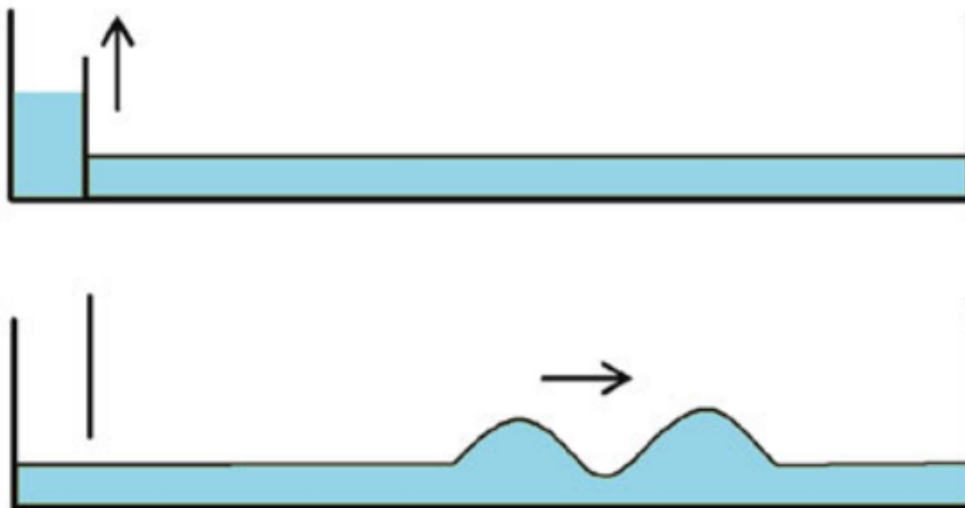
*Evolución de una onda solitaria pura sin tren de ondas residual*



*Nota.* Evolución de una onda. Tomado de *Historical and Physical Introduction*, por Marin, 2002.

### Figura 3

*Evolución de una elevación inicial de agua en dos ondas solitarias*



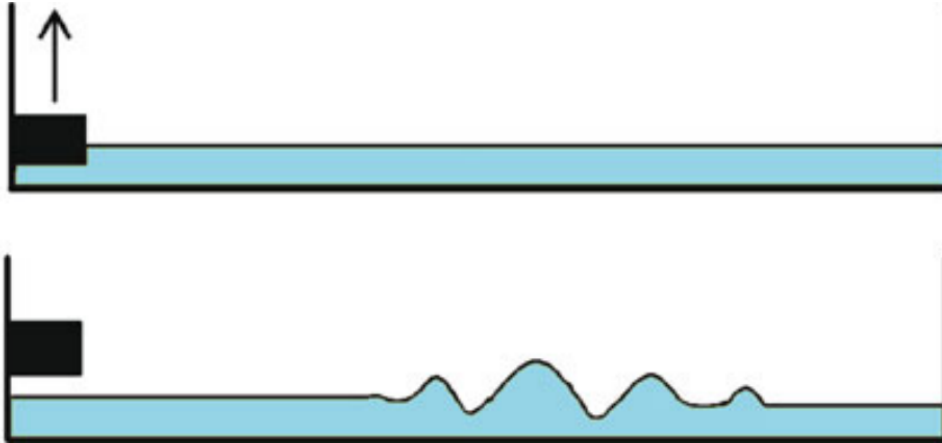
*Nota.* Evolución de 2 ondas solitarias. Tomado de *Historical and Physical Introduction*, por Marin, 2002.

➤ Las ondas solitarias pueden cruzarse entre sí sin cambio de ningún tipo.

- No se observan ondas solitarias de depresión: una depresión inicial se transforma en un tren de ondas oscilatorias de longitud gradualmente creciente y amplitud decreciente, como se muestra en la figura 4.

#### Figura 4

*Evolución en un tren de ondas*



*Nota.* Evolución de una depresión inicial que se transforma en un tren de ondas oscilatorio de longitud creciente y amplitud decreciente. Tomado de *Historical and Physical Introduction*, por Marin, 2002.

En el momento en que fueron publicadas, las observaciones de J. Scott Russell parecían contradecir la teoría no lineal de las olas en aguas poco profundas propuesta por Airy en 1845, la cual sostiene que una ola con una elevación de amplitud finita no puede desplazarse sin modificar su forma: tiende a empinarse y eventualmente a romperse. Esto también porque en un comportamiento de la onda no lineal, no se consideró el término dispersivo, solo se consideró el término no lineal la cual es el causante de que la onda se vaya deformando a medida que se propaga, por ello se esperaba que en una interacción de ondas sea mucho mayor la deformación (Flores & Humberto, 1984).

Tales como Airy y Stokes afirmaron que las conclusiones obtenidas de las observaciones experimentales de Russell debían estar equivocados.

Pero después en un artículo poco conocido, H. Bazin (1865) informó de experimentos, realizados en de Bourgogne, cerca de Dijon (Francia), que confirmaban las observaciones de Russell.

El debate en torno a las observaciones de Russell surge porque la teoría no lineal de las olas en aguas poco profundas no considera la dispersión, que generalmente afecta a las olas. Este dilema fue abordado por Joseph Boussinesq en 1871 y, de manera independiente,

por Lord Rayleigh en 1876. Ambos realizaron contribuciones significativas al estudio de las ondas, mostrando que, en ausencia de disipación, el incremento de la velocidad de la onda local relacionado con una amplitud finita se compensa con la reducción causada por la dispersión, resultando en una onda de forma permanente (Helal, 2022). También se podría decir como Flores & Humberto (1984) que la competencia entre un comportamiento no lineal y un comportamiento dispersivo da como resultado una onda que mantiene su forma y velocidad.

Boussinesq (1871) le dio ese formalismo matemático de las observaciones que hizo Russel, la cual antes, por el poco interés en este tema no se había investigado a fondo.

Sin embargo, más tarde, en 1895, Korteweg y de Vries, dos matemáticos de los Países Bajos, desarrollaron una ecuación modelo que describe la propagación unidireccional de ondas largas en aguas poco profundas. Esta ecuación proporciona una solución localizada, que representa una única joroba, similar a la que fue observada por Russell (Helal, 2022).

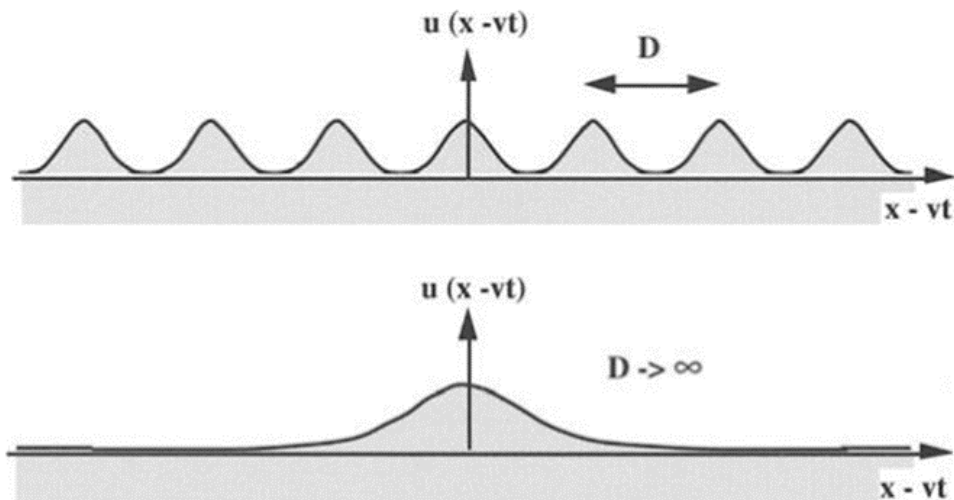
Esta ecuación es comúnmente conocida como la ecuación KdV, que representa una ecuación diferencial parcial no lineal diseñada para modelar el fenómeno que observó Russell. En su tiempo, la resolución de esta ecuación representó un gran desafío debido a su naturaleza no lineal.

Korteweg & De Vries (1895) desarrollaron una ecuación modelo que considera los efectos de la tensión superficial y describe la propagación unidireccional de ondas largas en aguas poco profundas. Esta ecuación ha alcanzado gran notoriedad y se conoce como la ecuación de Korteweg-de Vries, o simplemente ecuación KdV. Los autores demostraron que podían obtener soluciones periódicas, a las que llamaron ondas senoidales, de forma analítica y sin necesidad de realizar más aproximaciones. Asimismo, encontraron una solución localizada que representa una única joroba de elevación positiva, que también se presenta en el límite de longitud de onda infinita  $D$  en el período espacial de la onda senoidal, tal como se ilustra en la Figura 5 (Remoissenet, 1999, p. 120).

Esta joroba es la onda solitaria descubierta experimentalmente por Scott Russell.

## Figura 5

### Onda Senoidal y una Onda Solitaria



Nota. Representación de una onda senoidal y una onda solitaria. Tomado de *Hydrodynamic Solitons*, por M. Reimossenet, 1999.

El año 1965 marcó un hito con el surgimiento de las primeras computadoras, cuando dos físicos matemáticos estadounidenses, Zabusky & Kruskal (1965), realizaron investigaciones pioneras sobre la obtención de soluciones numéricas para la ecuación KdV. En su estudio, evidenciaron la existencia de ondas solitarias que presentaban una evolución constante sin sufrir deformaciones, y denominaron a estas soluciones no lineales como "solitones" (Lopez et al., 2014, p. 125).

A raíz de estos avances, se llevaron a cabo numerosas investigaciones en distintos campos, que no solo incluían canales de agua, sino también fibras ópticas, impulsos eléctricos en neuronas, procesos de condensación de Bose-Einstein, transporte de energía e incluso la formación de tormentas en otros planetas, como la Gran Mancha Roja de Júpiter. El fenómeno de los solitones se estableció como un aspecto recurrente en la física no lineal a gran escala, apareciendo en áreas que van desde el estudio de la gravitación hasta la teoría de cuerdas.

#### 2.2.1.2. Solitón

Es una onda no lineal en forma de pulso que puede existir en ciertos sistemas no lineales. Esta onda solitaria puede propagarse sin dispersar su energía en una amplia región del espacio; la colisión entre dos solitones no altera sus formas; y los solitones también presentan propiedades similares a las de las partículas (Helal, 2022, p. 289)

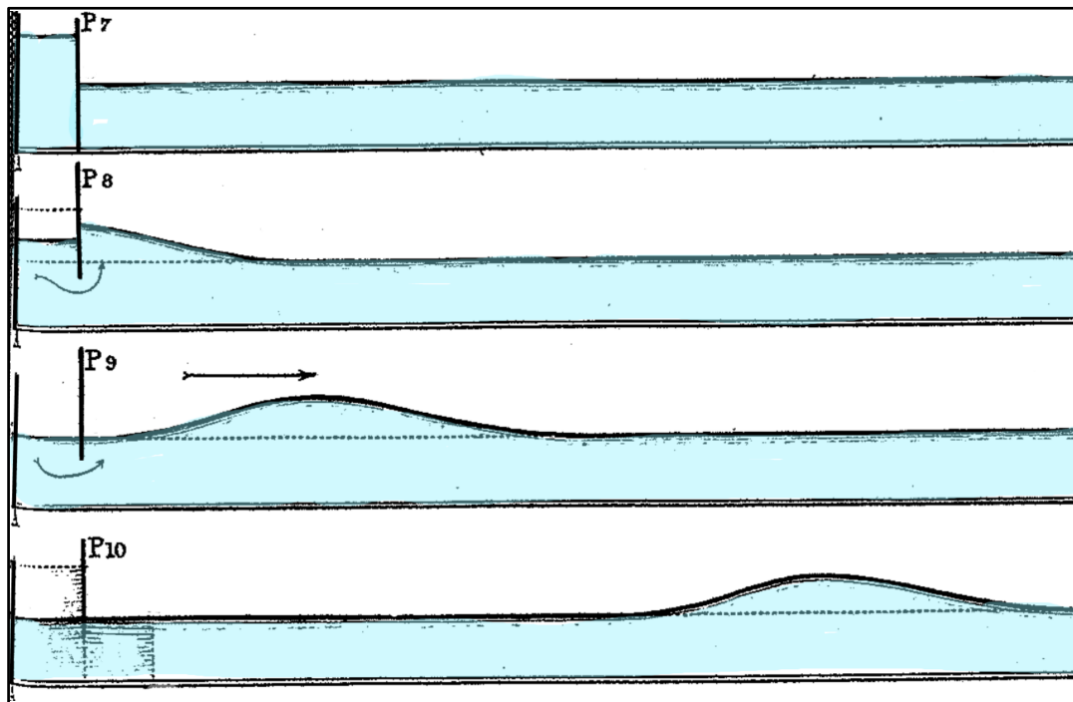
Asimismo, Granados et al. (2002) lo define como “una onda solitaria en forma de un pulso que es capaz de trasladarse sin cambio de forma y sin pérdidas de energía, y además es capaz de conservar su estructura después de un choque con su semejante, es decir, con comportamiento tipo partícula” (p. 198)

Por lo tanto, un solitón hidrodinámico es un tipo de onda que se propaga en un fluido como el agua, sin cambiar de forma ni disiparse en un tiempo largo. A diferencia de las ondas lineales, son dispersivas, y mantienen su forma después de una interacción, recuperando totalmente sus propiedades previas a la interacción.

La propiedad más notable de un solitón es que mantiene su forma, es decir no se dispersan durante una colisión o interacción de dos ondas (Helal, 2022).

### Figura 6

*Experimentos de J. Scott Russell*



*Nota.* Se muestra un sistema de compuertas para la generación de solitones hidrodinámicos, en la cual se puede observar los diferentes instantes de P7 a P10, en la generación del soliton hidrodinámico realizados por J. Scott Russell. Tomado de *Reports on Waves*, J. S. Russell, 1844.

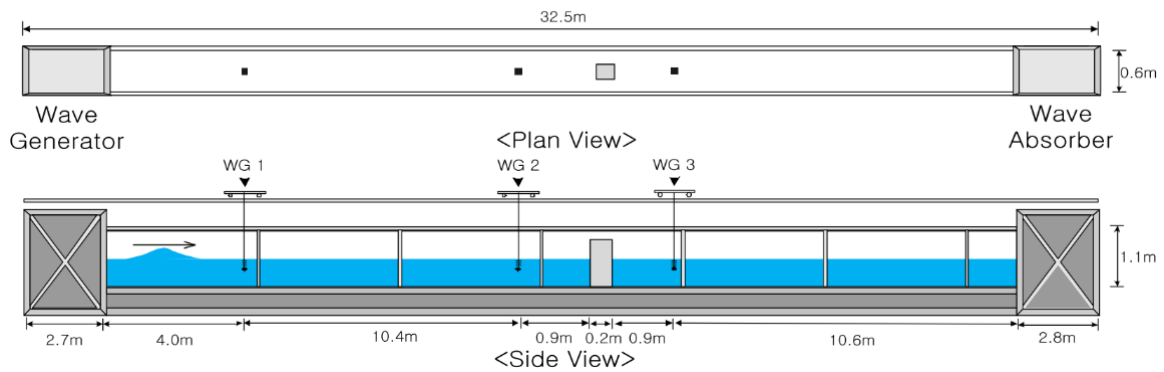
En la figura 6 se muestra los esquemas que realizó Russel para el proceso de generación de solitones hidrodinámicos. Se puede apreciar que este es el método de generación por compuertas donde en P7 se muestra el estado inicial del sistema donde se tienen 2 niveles de agua de diferentes alturas respecto a la base. En el P8 la compuerta se

mueve en dirección vertical con la cual el volumen de agua atrapado pasa a tener una especie de parte de la onda y cuando se termina de elevar por completo la compuerta móvil se genera el solitón hidrodinámico.

Asimismo, en la figura 7 se muestra el sistema de generación de solitones hidrodinámicos con pistón y su configuración en un canal de olas donde WG1 es el Wave Gage o medidor de olas, ubicadas en 3 posiciones estratégicas para la medición de amplitud de onda del solitón, este sistema es el más usado actualmente, pero requiere de una instalación en el canal mismo o hacer algunas variaciones para su ensamblaje.

**Figura 7**

*Esquema para reproducir una onda solitaria*



*Nota.* Esquema para la simulación de una onda solitaria. Tomado de *Historical and Physical Introduction*, por Marín, 2002.

### 2.2.2. Ecuación KdV

Para entender mejor la ecuación de KdV se presentará algunas cuestiones generales del proceso de deducción de esta.

Se consideró ciertas condiciones para su análisis. Se considero un fluido ideal, incompresible y no viscoso ( $\mu = 0$ ) la cual se describe mediante la ecuación de Euler (Dauxois & Peyrard, 2006);

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = -\vec{\nabla}P + \rho\vec{g} \quad (2)$$

En forma extendida se escribe,

$$\rho \left[ \frac{\partial\vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \vec{\nabla})\vec{V} \right] = -\vec{\nabla}P + \rho\vec{g} \quad (3)$$

Donde,  $\rho$  es la densidad del fluido,  $\frac{D\vec{v}}{Dt}$  la aceleración material o derivada material del campo de velocidad,  $\vec{\nabla}P$  es la gradiente de presión,  $P$  es la presión en el fluido y  $\vec{g}$  es el vector de gravedad.

Como podemos ver en la Ecuación de Euler intervienen las Fuerzas debidas a la presión (Normales) y la fuerza debido al efecto gravitatorio, sin embargo, no se considera las fuerzas tangenciales, es decir no se considera las perdidas por fricción en las paredes, ya que las fuerzas netas viscosas son despreciables en comparación con la presión y/o las fuerzas inerciales, pero el fluido en sí, es un fluido viscoso (Çengel & Cimbala, 2018, p. 527).

Además, según Dauxois & Peyrard (2006) para poder describir el fenómeno de las ondas hidrodinámicas superficiales se debe completar con la relación de la conservación de la masa, la cual se reduce para un fluido incompresible

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{v} = 0 \quad (4)$$

en forma extendida en coordenadas cartesianas es,

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

en donde  $\vec{V} = \vec{V}(x, y, z)$ , es el campo de velocidades del flujo.

Asimismo (Dauxois & Peyrard, 2006) menciona que para derivar la ecuación dinámica para las ondas superficie - agua se debe completar con relaciones dadas por las condiciones de contorno como son:

Condición limite cinemática, en la cual se considera la superficie que separa de un líquido de un gas que impone una presión uniforme por encima de ella. Físicamente la superficie está definida por el hecho de que las moléculas no la atraviesan.

Condición física limite, la cual considera el hecho de la tensión superficial de la superficie. Como las moléculas en la superficie no están rodeadas por otras, al contrario que las moléculas en la masa, tienen un exceso de energía. Esto provoca que la superficie actúe como una membrana elástica, que tiende a reducirse para minimizar su energía superficial. La tensión superficial genera una relación entre la curvatura de la superficie y la diferencia de presión entre ambos lados de esta. Este principio explica el movimiento de un fluido en un tubo estrecho comparado con un recipiente más amplio, mediante el fenómeno de la capilaridad. No obstante, en el caso de los solitones hidrodinámicos, el radio de curvatura

suele ser suficientemente amplio para que este efecto sea insignificante. Por ello, se considera que la presión en el fluido cerca de la superficie es equivalente a la presión  $P_A$  del gas sobre ella (Dauxois & Peyrard, 2006).

Luego realizando la formulación matemática al problema específico para ondas solitarias, introduciendo convenientemente variables adimensionales y considerando un fluido no viscoso e incompresible con una profundidad media  $h'$  por encima de un plano horizontal situado a una altura  $z' = 0$ . Suponemos que el movimiento del fluido es bidimensional, es decir, que todas las propiedades del sistema son independientes de la coordenada  $y'$  y que la componente de la velocidad a lo largo de  $y'$  es nula (ver figura 8).

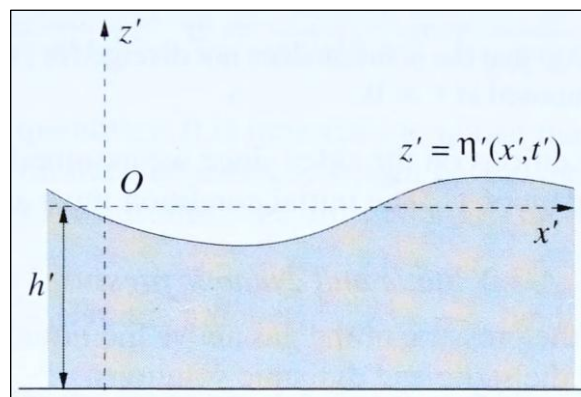
Denotamos la ecuación de la superficie:

$$z' = h' + \eta'(x', t') \quad (6)$$

Asimismo, se considera que encima del fluido hay un gas a presión que es constante y uniforme la cual experimenta la fuerza  $f = \rho \vec{g}$  por unidad de volumen debido a la gravedad.

### Figura 8

*Condición limite cinemática*



*Nota.*  $h'$  es la profundidad media,  $z'$  es la ecuación de la superficie dada por la altura de fondo y de la superficie de la onda, que depende de la posición y el tiempo. Obtenido de *Physics of Solitons* por Dauxois & Peyrard, 2006

Luego aplicando todas las ecuaciones necesarias dadas y descritas en Dauxois & Peyrard (2006) se obtiene una ecuación no lineal en aguas poco profundas en términos de variables adimensionales:

$$\varphi_t + \varphi_x + \frac{3}{2}\varepsilon\varphi\varphi_x + \frac{1}{6}\delta^2\varphi_{xxx} = 0 \quad (7)$$

Así tenemos una ecuación no lineal que describe el movimiento de las olas superficiales en aguas poco profundas que es la ecuación derivada por Korteweg y de Vries en 1895. Asimismo Morales (2008) menciona que la ecuación KdV, no lineal y de tercer orden considera la acción de efectos dispersivos y no-lineales en aguas de poca profundidad.

Es importante mencionar que la ecuación de KdV se logró en base a ciertas hipótesis como  $\varepsilon \cong \delta^2 \ll 1$ . Tal como menciona Dauxois & Peyrard (2006) que esta hipótesis se verifica generalmente bien experimentalmente porque las ondas solitarias que se observan tienen una extensión espacial mucho mayor que su amplitud (este es la condición  $\varepsilon \cong A'/L' \ll 1$ ) y los experimentos se realizan en aguas poco profundas ( $\delta^2 = (A'/L')^2 \ll 1$ ). Esta es la razón por la que la ecuación de KdV ha resultado ser tan fructífera en el análisis de ondas hidrodinámicas de aguas poco profundas. Como también lo menciona Flores & Humberto (1984) en su estudio la cual menciona el parámetro  $\beta = (h_0/L)^2 \ll 1$ .

### 2.2.3. Solución KdV de tipo onda solitaria

Inicialmente se definieron los parámetros adimensionales de acuerdo a Morales (2008).

$$\mu = \frac{h}{L} ; \alpha = \frac{H}{h} \quad \beta = \mu^2 = \frac{h^2}{L^2} \quad (8)$$

En la cual “H” es un valor característico de la amplitud de onda, “h” es la profundidad del agua, “L” es una extensión horizontal típica de la onda (ver figura 9),  $T = L/c_0$  siendo T un tiempo característico en la propagación de ondas y  $c_0$  dado por;

$$c_0 = \sqrt{gh} \quad (9)$$

donde,  $c_0$  es la velocidad de ondas lineales.

Asimismo, también se definen las variables adimensionales  $x^*$ ,  $y^*$ ,  $t^*$ ,  $u^*$  donde:

$$x^* = \frac{x}{L} ; y^* = \frac{y}{h} ; t^* = \frac{t}{T} \quad (10)$$

$$u^* = \frac{u}{a} = \frac{1}{\alpha} \left( \frac{u}{h} \right) \quad (11)$$

Según Morales (2008), la ecuación KdV en términos de variables adimensionales es;

$$u_t + u_x + \frac{3}{2}\alpha u u_x + \frac{1}{6}\beta u_{xxx} = 0 \quad (12)$$

y expresado em términos de variables físicas con dimensiones es;

$$u_t + c_0 \left[ 1 + \frac{3}{2} \left( \frac{u}{h} \right) \right] u_x + \left( \frac{c_0 h^2}{6} \right) u_{xxx} = 0 \quad (13)$$

en donde,  $u(x, t)$  representa la variación de la amplitud de una onda en función del tiempo y la posición,  $t$  es la variable temporal, que representa el tiempo,  $x$  es la variable espacial, que representa la posición a lo largo de la dirección de propagación de la onda,  $u_t$  es la derivada parcial de  $u$  con respecto al tiempo,  $u_x$  es la derivada parcial de  $u$  con respecto a la posición  $x$ ,  $u_{xxx}$  es la tercera derivada parcial de  $u$  con respecto a la posición  $x$ ,  $h$  la profundidad de agua en reposo y  $\alpha$  y  $\beta$  son parámetros adimensionales.

Ahora según Morales (2008), buscamos una solución que tenga la forma:

$$u(x, t) = u(\xi) \quad (14)$$

$$\text{con } \xi = x - ct \quad (15)$$

Asimismo, se supondrá que:

$$\left( \frac{\partial}{\partial x} \right)^j u \xrightarrow{x \rightarrow \mp\infty} 0, \quad j = 0, 1, 2 \dots \quad (16)$$

Se puede ver que  $c$  es la velocidad de propagación de la onda, la cual para este caso es constante.

De la forma  $u(x, t)$ , ecuación (13) se tiene que:

$$\frac{\partial u(x, t)}{\partial x} = \frac{\partial \xi}{\partial x} \frac{du(\xi)}{d\xi} = \frac{du(\xi)}{d\xi} \quad (17)$$

$$\frac{\partial u(x, t)}{\partial t} = \frac{\partial \xi}{\partial t} \frac{du(\xi)}{d\xi} = -c \frac{du(\xi)}{d\xi} \quad (18)$$

Aplicando las relaciones (17) y (18) en la ecuación KdV (13), integrando, y usando las condiciones sobre  $u(x, t)$  y sus derivadas en (14) y demás procedimientos matemáticos dado en Morales (2008) se obtiene:

$$u(\xi) = (\gamma h) \operatorname{sech}^2 \left( \frac{\sqrt{3\gamma}}{2h} \xi \right) \quad (19)$$

Se ve que el máximo valor de  $u(\xi)$  es  $u(0) = \gamma h$ . Se define entonces a:

$$H = \gamma h \quad (20)$$

y al parámetro,

$$\alpha = \frac{H}{h} = \gamma \quad (21)$$

Naturalmente, según Morales (2008), el valor de  $A$  define como la máxima altura o amplitud de la onda solitaria. En contraste, el coeficiente  $b$  define el desvanecimiento del perfil de la onda hacia cero, y puede entenderse como una longitud horizontal característica, cuyo valor es:

$$b = \left(\frac{\sqrt{3\gamma}}{h}\right)^{-1} = \left(\frac{\sqrt{3H}}{h^3}\right)^{-1} = \frac{h}{\sqrt{3\alpha}} \quad (22)$$

De acuerdo a Morales (2008) otros autores llaman  $\beta$  al factor  $1/b$ , sin embargo, no siguió esta convención dado que  $b$  no es adimensional. Por lo tanto, se tiene

$$u(\xi) = u(x - ct) = H \operatorname{sech}^2\left(\frac{1}{2} \frac{(x - ct)}{b}\right) \quad (23)$$

Reescribiendo (23) solo en función de  $H$  y  $h$  podemos obtener la solución como sigue,

$$u(x, t) = H \operatorname{sech}^2\left(\frac{1}{2} \sqrt{\frac{3H}{4h^3}} (x - ct)\right) \quad (24)$$

Donde  $u(x, t)$ , representa la función del perfil de la onda en función de la posición  $x$  y el tiempo  $t$ ,  $H$  la máxima elevación de la onda solitaria (Amplitud),  $c$  La velocidad de propagación de la onda y  $h$  profundidad de agua en reposo del canal.

Para la velocidad de onda  $c$  en esta investigación, se tomará lo utilizado por Niu et al. (2022), Lin et al. (2018) y Ghafari et al. (2021), las cuales también utilizaron la Ec. 24;

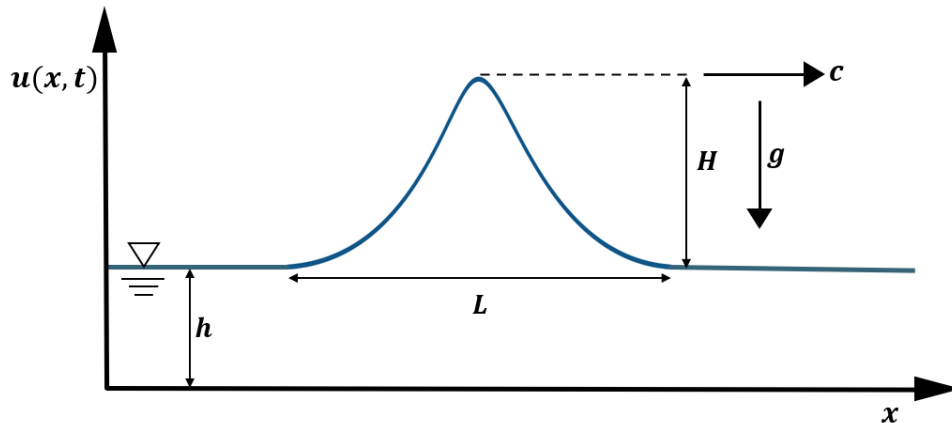
$$c = \sqrt{g(h + H)} \quad (25)$$

en donde  $g$  es la aceleración de la gravedad que es  $9.81 \text{ m/s}^2$  o  $981 \text{ cm/s}^2$ .

En la figura 9 se muestra los parámetros del solitón hidrodinámico en la cual  $H$  es la amplitud, la  $c$  la velocidad,  $g$  la aceleración de la gravedad,  $h$  la profundidad del agua en reposo y  $u(x, t)$  representa la función que define su perfil, la cual depende de la posición  $x$  y el tiempo  $t$ . Además, el  $h$  se considera constante a lo largo del recorrido del solitón hidrodinámico y la aceleración de la gravedad como  $9.81 \text{ m/s}^2$ . Para el caso de mi investigación el parámetro  $L$  ancho de onda de la figura 9 se toma con la nomenclatura  $W$ .

**Figura 9**

*Parámetros de la Onda Solitaria*



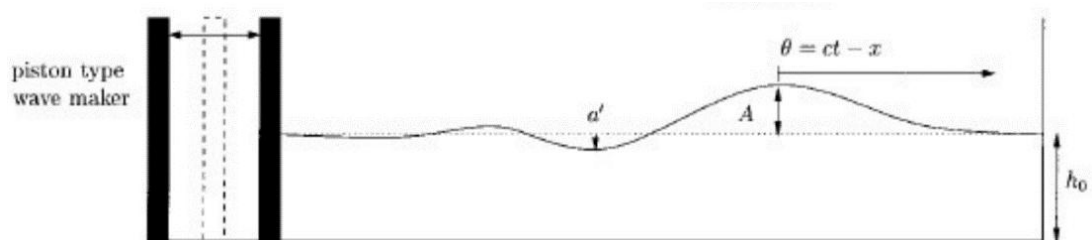
*Nota.* Modelo físico de una onda solitaria típica, donde  $h$  es la profundidad de agua en reposo,  $H$  su amplitud,  $c$  velocidad de onda,  $L$  es el ancho de la onda y  $g$  la aceleración de la gravedad.

De acuerdo con la teoría de KdV, se puede observar que la velocidad de desplazamiento de una onda aumenta de manera lineal con su altura. En relación con la limitación del valor de  $H$ , Whitham (1974), establece que la altura máxima de una onda solitaria se estima en  $H \approx 0.78h$ , sin embargo, experimentalmente esta altura es aproximadamente  $H \approx 0.7h$  (Morales, 2008).

La figura 10 muestra el esquema del diseño experimental realizado por Morales (2008) para la generación de una onda solitaria mediante un sistema de generador de olas tipo pistón. Donde  $S$  es el desplazamiento de la paleta para la generación de la onda solitaria además a ciertas distancias estratégicas fueron ubicados sensores de nivel tipo resistivos para medir la altura de las olas y  $h_0$  es la profundidad del agua en reposo y  $A$  la amplitud de onda del solitón.

**Figura 10**

*Diseño experimental Onda Solitaria (UNAM)*



*Nota.* Diseño experimental de Solitones con un sistema de Pistón. Obtenido de Morales, (2008)

#### **2.2.4. Métodos para resolver la ecuación KdV**

Se presentan de forma general diferentes métodos analíticos para resolver la Ecuación de KdV.

La Transformación de Dispersión Inversa es uno de los métodos analíticos más reconocidos para resolver la ecuación de Korteweg-de Vries (KdV). Este enfoque fue desarrollado por los destacados científicos Gardner, Green, Kruskal y Miura. En 1967, Gardner y su equipo publicaron un artículo innovador y fundamental que abordaba la solución analítica para problemas de valores iniciales causados por perturbaciones de amplitud finita en un dominio infinito. Este método, aunque sistemático, es complejo y exige una serie de pasos extensos para llegar a la solución completa (Helal, 2022).

La ecuación KdV posee varias características algebraicas y geométricas significativas. Más importante aún, muchas soluciones físicamente importantes de la ecuación KdV se pueden presentar explícitamente a través de una forma simple y específica llamada la forma bilineal de Hirota.

Era adecuado buscar un método más sencillo para resolver esta famosa y bien conocida ecuación diferencial parcial no lineal (KdV). Se han desarrollado y utilizado muchos métodos semi-analíticos para resolver la ecuación KdV. El método semi-analítico más popular y famoso que se introdujo para resolver esta ecuación diferencial parcial no lineal (KdV) fue el Método de Descomposición de Adomian (Helal, 2022).

Existen también métodos semi-analíticos, como el método de iteración variacional (VIM), el método de análisis de homotopía (HAM) y el método de perturbación de homotopía (HPM), que resultan útiles para resolver ecuaciones como la de Korteweg-de Vries (KdV), una ecuación diferencial parcial no lineal (NLPDE), así como su versión modificada, la ecuación mKdV.

Es fundamental incorporar métodos alternativos para representar la solución de esta EDP no lineal. Las técnicas numéricas constituyen una herramienta clave y es imprescindible emplear distintos enfoques numéricos para resolver las ecuaciones de KdV y mKdV, así como cualquier ecuación evolutiva (Helal, 2022).

En problemas hidrodinámicos donde se analiza el movimiento de un fluido incompresible bajo una fuerza gravitacional constante en dirección vertical, y con un fondo impermeable en la base y una superficie libre en la parte superior, se deriva el modelo de aguas poco profundas bajo ciertas suposiciones físicas. Las ecuaciones asociadas a ondas en

aguas poco profundas se aplican frecuentemente en el ámbito de la oceanografía y las ciencias atmosféricas. La teoría de esta aproximación lleva a la formulación de la ecuación de KdV, lo que implica que tanto las soluciones solitarias como las ondas solitarias representan soluciones directas para diversos problemas físicos (Helal, 2022).

### **2.2.5. Fronteras**

Las fronteras se refieren a las particularidades del lecho de un cuerpo de agua, como un río, un lago o una costa marina, en la zona donde interactúan los solitones. Esto puede incluir la naturaleza del fondo, como si es de grava, arena u otro material, así como la presencia de obstáculos geomorfológicos. También se refiere a los límites físicos y geométricos que delimitan un sistema de flujo de agua, como un canal o un cauce

#### **2.2.5.1. Tipos de Fronteras en Canales Hidráulicos**

##### **Fronteras Laterales:**

Son las paredes o lados del canal que limitan el flujo de agua. Las características de estas fronteras, como su rugosidad y la distancia entre ellas, pueden influir en la propagación de los solitones. Canales estrechos tienden a generar mayor resistencia, mientras que canales amplios permiten mayor dispersión.

##### **Fronteras Inferiores:**

Son los fondos de los canales, que pueden tener diversas texturas y pendientes. Los materiales y formas de estas fronteras pueden ser:

- **Fondo liso:** Favorece un flujo más uniforme, lo que permite que el solitón mantenga su forma más estable.
- **Fondo de grava o arena:** Causa fricción y resistencia adicional, lo cual puede reducir la velocidad del solitón y provocar deformaciones en su perfil.
- **Pendiente:** Un fondo inclinado afecta el movimiento ascendente o descendente de los solitones y puede incrementar la velocidad si el canal tiene una inclinación descendente.

##### **Fronteras Superiores**

Pueden estar presentes en canales con cubiertas parciales o totales, donde el flujo se ve restringido en la parte superior, afectando la amplitud y propagación de las ondas.

## Figura 11

### *Frontera en la base del canal Hidráulico de fondo liso*

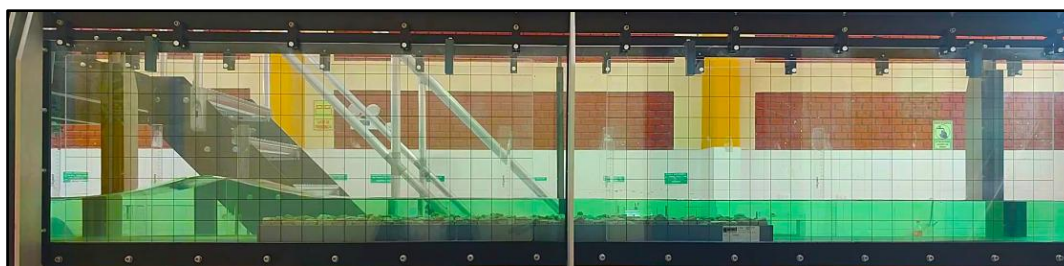


*Nota.* Canal de fondo liso. Se puede mostrar el canal hidráulico del laboratorio de la UNAT, en ella se muestra también el funcionamiento de la paleta del generador de olas periódicas, Asimismo, en la parte derecha de azul se puede observar el caudalímetro digital.

En la figura 11 se muestra la el canal rectangular con una frontera inferior en la base del canal, en este caso de fondo liso horizontal ya que no se agrega ningún tipo de material en el fondo que puede influir en el movimiento.

## Figura 12

### *Frontera en la base del canal Hidráulico - Fondo de grava*



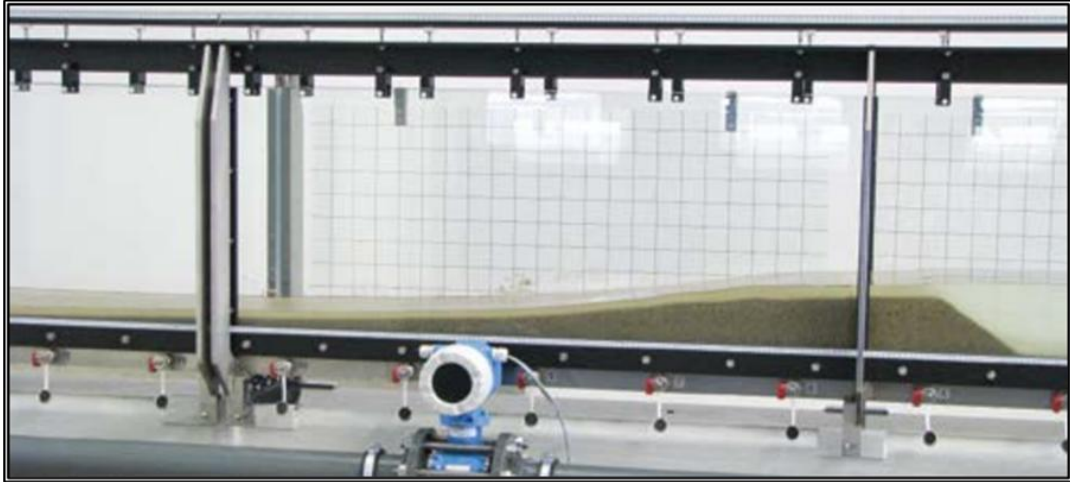
*Nota.* Canal de fondo de grava. En la parte inferior se muestra la estructura de fondo de grava instalada en una sección del canal. La coloración verdosa del líquido se debe a un colorante artificial la cual se utilizó en esta investigación para una mejor observación del perfil de la onda solitaria y no hacer contraste con el fondo.

En la figura 12 se puede observar una frontera inferior en la base del canal con fondo variable de gravilla. Esta estructura es instalada en la base y está fijada mediante tornillos. Además, en la figura podemos notar en la parte inicial antes de la estructura de fondo, se puede ver una onda solitaria.

En la figura 13 se puede observar una frontera inferior en la base del canal con fondo de arena. Como se puede notar la arena es puesta como un tipo de fondo en una sección del canal. Esta arena es especialmente para ensayos de laboratorio.

### **Figura 13**

*Frontera en la base del canal Hidráulico - Fondo de arena*

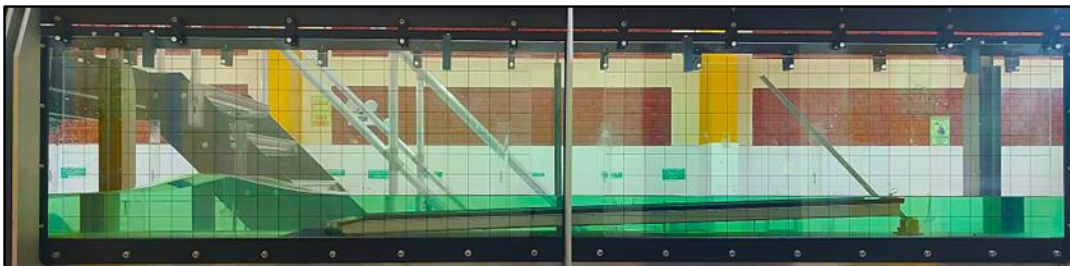


*Nota.* Canal de fondo de arena, esto puede se puede observar como un montículo en la base del canal. Además, se muestra en la parte inferior el caudalímetro digital y adherida a las paredes de canal también se muestra las rejillas de medición. Obtenido de GUNT

En la figura 14 se puede observar una frontera inferior en la base del canal con fondo liso con una pendiente dada. Esto posible con la colocación de un bastidor de acero que permite configurar diferentes pendientes en la base del canal. En la figura se muestra para el caso de una pendiente del 5% con una superficie lisa en una sección del canal.

### **Figura 14**

*Frontera en la base del canal Hidráulico - Fondo liso con pendiente*



*Nota.* Canal con una sección de fondo liso con pendiente. Se muestra la estructura de fondo liso con pendiente, la cual es una estructura de acero que tiene diferentes configuraciones de pendiente, del 5%,10%, 15%, 20% ,25%, 30% y 35%. La coloración verdosa del líquido se debe a un colorante artificial, la cual se utilizó en esta investigación para una mejor observación del perfil de la onda solitaria y no hacer contraste con el fondo blanco.

### **2.2.5.2. Rugosidad de Superficies**

En la realidad, la hidráulica de canales utiliza una amplia gama de materiales, lo que permite la existencia de un sin número de valores de rugosidad en la superficie, lo que permite la investigación y comparación de los valores de rugosidad. En el transporte de caudales elevados, es importante tener en cuenta la rugosidad porque está relacionada con la pérdida de tuberías o canales (Cadavid, 2020).

La rugosidad física se define como el cálculo del coeficiente de rugosidad en un canal abierto, centrándose principalmente en la estimación de la resistencia al flujo. Este cálculo se realiza según dos metodologías: Chezy y Manning, según Carreras (2003). La rugosidad en los canales experimenta cambios notables debido a diversos factores, como el radio hidráulico, el caudal que atraviesa la sección transversal, así como la presencia de sedimentos y vegetación, que causan variaciones en el coeficiente “n”. Además, el número de Reynolds, que diferencia entre los diferentes tipos de flujos, también influye en esta magnitud (Cadavid, 2020).

Los canales hidráulicos tienen una variedad de rugosidades, la mayoría de las cuales se encuentran en ríos o otros recursos hídricos similares. Después de esto, se calcula una rugosidad equivalente para representar adecuadamente el comportamiento de cada sección (Perez, 2002).

## **2.3. Definición de términos básicos**

### **2.3.1. Solitones Hidrodinámicos**

Son fenómenos naturales que se producen en fluidos, como agua o aire, y se caracterizan por ser ondas solitarias no lineales que mantienen su forma y velocidad a medida que se propagan a través del medio.

Asimismo, Granados et al. (2002) lo define como “una onda solitaria en forma de un pulso que es capaz de trasladarse sin cambio de forma y sin pérdidas de energía, y además es capaz de conservar su estructura después de un choque con su semejante, es decir, con comportamiento tipo partícula” (p. 198)

### **2.3.2. Fronteras**

Se refieren a las particularidades del lecho de un cuerpo de agua, como un río, un lago o una costa marina, en la zona donde interactúan los solitones. Esto puede incluir la

naturaleza del fondo, como si es de grava, arena u otro material, así como la presencia de obstáculos geomorfológicos.

### **2.3.3. Ecuación KdV**

La ecuación de Korteweg-de Vries (KdV) es un modelo matemático de las olas en superficies poco profundas. Es especialmente famosa por ser el ejemplo prototípico de un modelo exactamente resoluble, es decir, una ecuación diferencial parcial no lineal parcial no lineal (Helal, 2022).

### **2.3.4. Rugosidad**

Según Cengel & Cimbala (2018) es una medida de la aspereza o irregularidad de la superficie de un material que puede ser el material de una tubería, el fondo de un canal como concreto, con rocas, gravas, o de otro material tendrán diferentes rugosidades. Esto quiere decir que la rugosidad se refiere a las pequeñas protuberancias, surcos o otros defectos en la superficie que pueden afectar el comportamiento del fluido.

## **2.4. Hipótesis**

### **2.4.1. Hipótesis General**

- Las geometrías de las fronteras afectan significativamente en el comportamiento de solitones hidrodinámicos.

### **2.4.2. Hipótesis específicas**

- a) El fondo liso influye significativamente en el comportamiento del ancho, amplitud y velocidad de solitones hidrodinámicos.
- b) El fondo de grava incide significativamente en el comportamiento del ancho, amplitud y velocidad de solitones hidrodinámicos.
- c) El fondo de arena impacta significativamente en el comportamiento del ancho, amplitud y velocidad de solitones hidrodinámicos.
- d) La variabilidad de la pendiente con fondo liso del canal influye significativamente en el comportamiento del ancho, amplitud y velocidad de solitones hidrodinámicos.

## 2.5. Variables, definición conceptual y operacional.

### 2.5.1. Variable independiente

- ✓ Fronteras

### 2.5.2. Variable Dependientes

- ✓ Solitones Hidrodinámicos

### 2.5.3. Matriz de operacionalización de variables

**Tabla 1**

*Matriz de operacionalización de variables*

VARIABLES	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DIMENSIONES	INDICADORES
<b>VI: Variable independiente</b>			
Fronteras	Las “fronteras” se refieren a las particularidades del lecho de un cuerpo de agua, como un río, un lago o una costa marina, en la zona donde interactúan los solitones. Esto puede incluir la naturaleza del fondo, como si es de grava, arena u otro material, así como la presencia de obstáculos geomorfológicos.	D1: Fondo liso	Coefficiente de rugosidad de liso
		D2: Fondo de Grava	Coefficiente de rugosidad Grava
		D3: Fondo de Arena	
		D4: Fondo liso con pendiente $S=5\%$	Coefficiente de rugosidad Arena
<b>VD. Variable dependiente</b>			
Solitones hidrodinámicos	Son fenómenos ondulatorios que se da en líquidos, como el agua y se caracterizan por ser ondas solitarias no lineales que mantienen su forma y velocidad a medida que se propagan a través del medio (Helal, 2022).	D1: Ancho de Onda (W)	Ancho de onda (cm)
		D2: Amplitud de Onda (H)	Distancia de la cresta hasta el punto más bajo de la onda (valle) (cm)
		D3: Velocidad (C)	Velocidad de Propagación (cm/s)
		D4: Tiempo (t)	Duración del solitón (s)

*Nota.* Elaboración Propia

### **III. METODOLOGÍA**

#### **3.1. Diseño Metodológico**

##### ***3.1.1. Tipo de investigación***

Según Tamayo (2003) afirma que la investigación aplicada es el estudio y la aplicación de la investigación a problemas específicos, en situaciones y condiciones particulares. Este tipo de investigación está orientado hacia una aplicación inmediata, en lugar de enfocarse en el desarrollo de teorías.

En esta investigación se va aplicar los conocimientos ya obtenidos de las ecuaciones que modelan los solitones hidrodinámicos con el propósito de analizar el comportamiento de solitones hidrodinámicos con 4 diferentes tipos de frontera (Fondo Liso, Grava, Arena y liso con pendiente), a través de estudios experimentales realizados en el laboratorio de hidráulica de la UNAT, para posteriormente elaborar las conclusiones y discusiones sobre el efecto de estas.

Por lo tanto, según su propósito es de tipo aplicada

##### ***3.1.2. Enfoque de investigación***

Según Hernández et al. (2014) señala que el enfoque cuantitativo se basa en la recolección de datos para probar hipótesis mediante la medición numérica y el análisis estadístico, con el objetivo de establecer patrones de comportamiento y verificar teorías.

En mi investigación para la recolección de datos y las pruebas experimentales realizarse en el laboratorio de hidráulica, se utilizarán herramientas matemáticas, estadísticas e informáticas como medios para medir los resultados. Esto permitirá presentar resultados

que puedan ser proyectados en el tiempo y analizados de manera cuantitativa, lo que es consistente con la naturaleza de la investigación.

Por lo tanto, mi investigación es de enfoque cuantitativo.

### ***3.1.3. Nivel de investigación***

La presente investigación corresponde a un nivel explicativo.

Según Supo (2012) sostiene que en este nivel se busca explicar, comprender e interpretar por qué ocurre un fenómeno, en qué condiciones sucede y se responde a la pregunta de por qué dos o más variables independientes están correlacionadas (existe una relación de causa y efecto).

En mi investigación se plantea ver el efecto que tienen los solitones hidrodinámicos con la intervención de la variable fronteras que son fondo liso, grava, arena y pendiente en la cual se explicara la relación causa y efectos entre estas 2 variables.

### ***3.1.4. Diseño de investigación***

El diseño de la investigación corresponde a un Diseño Cuasi – Experimental.

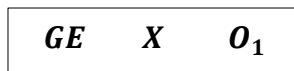
Según Hernández et al. (2014) el diseño cuasi-experiemtnal se manipulan deliberadamente, al menos, una variable independiente para observar su efecto sobre una o más variables dependientes, y en la cual la muestra que se toma es por conveniencia y no de manera aleatorio como es el caso del Experimental Puro (p. 151)

En mi investigación se manipula la variable independiente “fronteras” con 3 tipos fronteras en en el fondo del canal, como fondo liso, grava, arena y liso con pendiente al 5%, para analizar las variaciones que se generen en la variable dependiente “solitones hidrodinámicos”.

Asimismo, la investigación se realizará a través de ensayos de laboratorio de Hidráulica de la UNAT para ver el efecto del comportamiento del solitón con la influencia de las fronteras como son fondo liso, fondo de grava y fondo de arena. Se tendrá un grupo experimental para evaluar el solitón Hidrodinámico (Variable Dependiente) con la influencia de las distintas fronteras (Manipulación de la variable X).

## Figura 15

### *Esquema Diseño Cuasi - experimental*



*Nota.* Diseño cuasiexperimental con un grupo experimental y medición.

Donde, X = Variable Experimental y  $O_1$  = Mediciones de la variable dependiente

Se tendrá un grupo experimental la cual no se toma de manera aleatoria, luego se manipula la variable independiente y se realiza la medición de la variable dependiente.

### **3.2. Diseño muestral**

#### ***3.2.1. Población***

Según Tamayo (2003), ‘La población se define como la totalidad del fenómeno a estudiar donde las unidades de población poseen una característica común la cual se estudia y da origen a los datos para la investigación’ (p. 114).

Asimismo, según Arias (2012) la población puede ser un conjunto finito e infinito de sujetos con características similares o comunes entre sí.

Para mi investigación la población son las pruebas o ensayos de solitones hidrodinámicos en este caso es 15 ensayos por cada caso experimental, por lo tanto, una población total de 60 ensayos.

#### ***3.2.2. Muestra***

Hernández et al. (2014) menciona que: “la muestra es parte de la población donde se busca que este subgrupo sea representativo”.

Para mi investigación la muestra se tomará por conveniencia y no de manera aleatoria o al azar.

Por lo tanto, el tamaño de muestra es 5 ensayos por cada caso experimental y la elección se hará por conveniencia de las pruebas de solitones hidrodinámicos con fronteras: Prueba de solitón con fondo liso, prueba de solitón con fondo de grava, prueba de solitón con fondo de arena y prueba de solitón con fondo liso con pendiente.

#### ***3.2.3. Muestreo***

Se utilizó el muestro no probabilístico por conveniencia.

### **3.3. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.**

#### ***3.3.1. Técnicas de recolección de datos***

En la presente investigación se aplicó la técnica de observación poniendo en énfasis la observación experimental que según lo descrito por Ñaupas et al. (2014), implica un análisis detenido de los efectos que resultan de la manipulación de una variable independiente en relación con una variable dependiente. Además, en este proceso, se examinan las características del comportamiento de los individuos que participan en el experimento. Es importante destacar que, en un experimento, la observación es una parte esencial; de hecho, no puede haber un experimento válido sin la observación.

En mi investigación la observación se realizó de manera directa para analizar el comportamiento de los solitones hidrodinámicos bajo las diferentes condiciones del fondo del canal (liso, grava, arena y pendiente).

Es una técnica clave porque permite identificar las variaciones en ancho, altura y velocidad de los solitones de forma directa.

Medición directa: Esta técnica se aplicó para registrar los parámetros específicos del solitón hidrodinámico en diferentes puntos del canal (antes, durante y después de la zona de fondo variable), asimismo para establecer los niveles  $h$  (nivel de agua en reposo) en el canal

Fotografía o Video: Se utilizó esta técnica con el fin de grabar videos a 60 FPS, que nos permita realizar un análisis más detallado sobre el comportamiento de los solitones hidrodinámicos.

#### ***3.3.2. Instrumentos de recolección de datos***

Se utilizó una ficha de registros de datos de laboratorio para tomar los parámetros de ensayo y otros datos relevantes de cada experimento, además se registró los cambios producidos en la amplitud, velocidad, según las variables independientes con fondo liso, grava, arena y liso con pendiente al 5%.

Rejillas de medición: Esto con el fin de medir la amplitud el ancho de los solitones en la zona de medición del canal en la fase de procesamiento con Image J.

Una cámara de alta calidad que graba a 60 FPS con resolución (1920x1080) pixeles que nos permitió capturar el movimiento del solitón en el canal, para analizar fotograma a fotograma en cualquier instante de tiempo las variaciones en sus características.

Software de procesamiento de videos e imágenes: Primeramente, se utilizó la herramienta de Python para realizar un código que nos permita hacer recortes de video y la extracción de fotogramas en intervalos de tiempo dados, se tomó esta opción por la necesidad de mantener la calidad de las imágenes y evitar gastos en softwares de pago.

Luego se usó el Image J, que es un software de procesamiento de imágenes de código abierto, esto se realizó para el procesamiento de los fotogramas, con el fin de extraer los puntos del perfil experimental del solitón hidrodinámico.

### **3.4. Procedimiento de recolección de datos**

Fase de Implementación y pruebas del sistema de generación de olas tipo solitón:

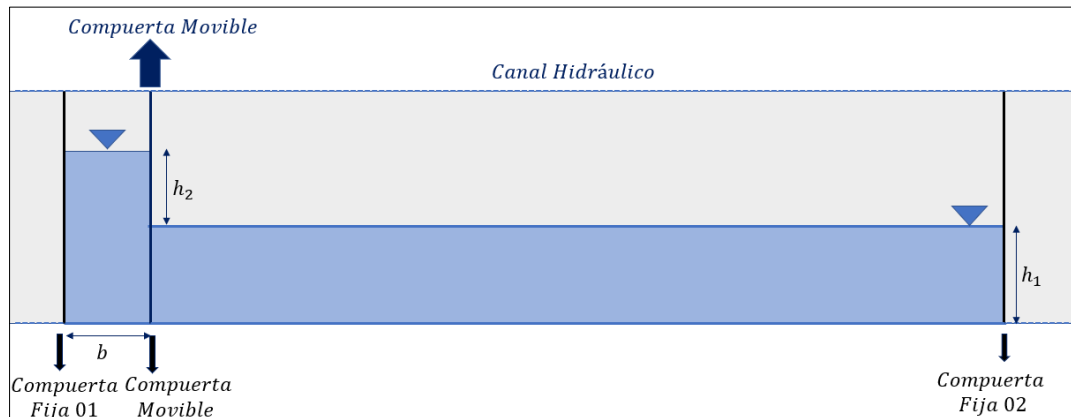
- 1) Se realizó la implementación de un módulo generador de olas tipo compuerta (MGOC), para la generación del sistema de olas tipo solitón en el laboratorio de hidráulica de la UNAT.
- 2) Se hizo una evaluación preliminar de este primer módulo experimental, en la cual se consideraron las mejoras y ajustes para plantear un módulo generador de tipo pistón mecánico para generar olas tipo solitón.

Para la evaluación preliminar del prototipo se realizó la prueba en el laboratorio de la siguiente manera:

- Primero se acumula agua en canal, para lo cual previamente al canal se pone en el nivel 0 (Pendiente 0%) y activamos la bomba de agua a  $20 \text{ m}^3/\text{s}$  cuando el flujo en el canal llega a los 20 cm apagamos la bomba y se cierre la llave de esta para que el agua no pueda retornar al tanque sino quede almacenada en el canal hasta una altura de 20 cm.
- Una vez realizado ese paso procedió a colocar el mecanismo de generación de olas tipo solitón que comprende de 2 compuertas fijas de vidrio y una compuerta movable. Las 2 compuertas fijas estarán ubicadas en los extremos del canal y la tercera que es movable estará ubicado a 20 cm de la primera compuerta.
- Luego de haber colocado la tercera compuerta movable se llena con agua entre la compuerta 01 y la movable hasta 15 cm desde el nivel de agua inicial. (Ver figura 16) (Estas medidas son solo para la prueba).

**Figura 16**

*Sistema de generación solitones hidrodinámico tipo compuerta*



*Nota.* Representación esquemática del ensayo con el módulo generador de olas tipo compuerta (MGOC). Donde  $h_1$  es la profundidad de agua en reposo o el nivel inicial y  $h_2$  es la altura sobre el nivel inicial y  $b$  el ancho entre la compuerta fija 01 y la compuerta móvil.

- 3) Con los datos más relevantes de las pruebas con el módulo generador de olas tipo compuerta y de las mejoras planteadas, se implementó el módulo generador tipo pistón mecánico, para la generación de olas tipo solitón. Los 2 sistemas son descritos a detalle en el subcapítulo de configuración experimental.
- 4) Implementación de todos los equipos de medición en el laboratorio de Hidráulica de la UNAT, como son las 2 rejillas de medición, regla graduada para establecer el nivel  $h$  (altura de agua en reposo) y la ubicación estratégica de la cámara de 60 FPS.

Fase Experimental:

- 1) Reproducir de manera experimental la onda de solitón típica conocida con canal de fondo liso, para tener un sistema de control
- 2) Se realizó la medición del sistema control para simular una onda tipo solitón típica
- 3) Validación del sistema de control con las soluciones teóricas.
- 4) Una vez validado realizamos las mediciones de una onda tipo solitón con la influencia de las geometrías de frontera (1ero fondo liso, 2do fondo de grava, 3ero fondo de arena y 4to liso con pendiente al 5%).
- 5) Se verificó la modificación de las variables como velocidad, amplitud, ancho de solitón con respecto al sistema de control, para ver las variaciones de estos parámetros muy importantes.
- 6) En cada experimento se utilizó una cámara de video de 60fps con resolución de 1920 x 1080 pixeles para registrar visualmente la propagación de solitones en el canal.

Estos registros fueron importantes para el análisis posterior y la documentación visual. Además, se registró el tiempo en que ocurren eventos importantes, como la llegada o la salida de solitones, para evaluar la duración de estos fenómenos.

- 7) También, se coloreo el agua de color verde con colorante alimentario especial, utilizando una mínima cantidad, solo para capturar mejor el perfil del solitón.

### **3.5. Técnicas de Análisis y procesamiento de datos.**

La información recolectada de los ensayos en el laboratorio de hidráulica a través de la cámara de 60 FPS en formato de video se guardó para su procesamiento y análisis respectivo con los instrumentos pertinentes. Se utilizó un código en Python para el procesamiento del video y la extracción de los fotogramas; el software Image J para el análisis y procesamiento de los fotogramas.

#### **3.5.1. Técnicas**

Se hará uso de un análisis cuantitativo siguiendo este proceso

➤ Preparación de Datos:

En esta etapa, se recolectó y organizó meticulosamente todos los datos que se obtuvieron en el laboratorio de hidráulica de la UNAT. Me aseguré de eliminar cualquier valor atípico o dato incorrecto y verifiqué que todos los datos estén completos.

➤ Interpretación de Resultados:

Se cálculo la media para el ancho, amplitud y velocidad de solitón. Además, se calculó las medidas de dispersión (desviación estándar) para evaluar la variabilidad. Se analizó los resultados de las pruebas para responder a mis preguntas de investigación.

#### **3.5.2. Procesamiento**

Se hará uso de los siguientes softwares para el procesamiento de datos:

- ✓ Código en Python desarrollado en Spyder
- ✓ Image J
- ✓ Microsoft Excel

### 3.6. Configuración Experimental

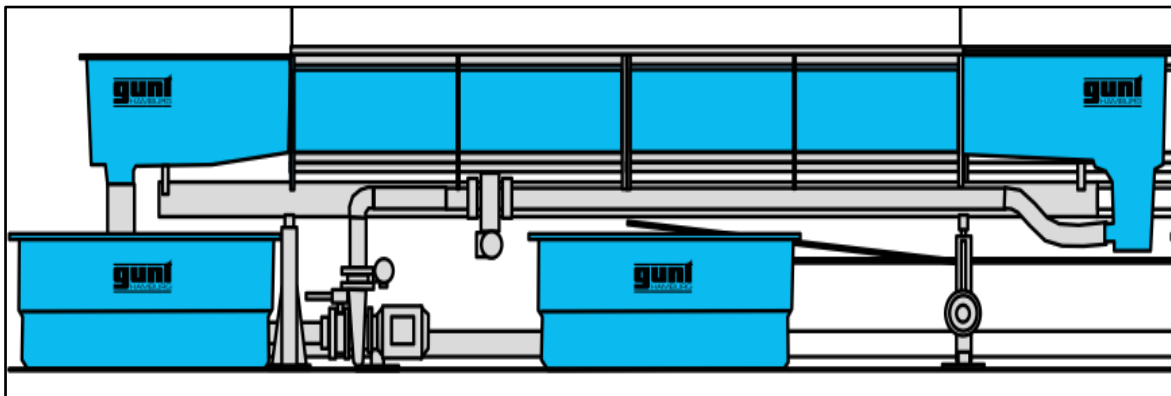
#### 3.6.1. Canal Hidráulico

El canal de ensayo HM 162, de 309 x 450 mm, es un equipo básico diseñado para realizar una amplia gama de ensayos relacionados con de flujo en canales, así como para realizar diversas investigaciones en el ámbito de la hidráulica.

Los experimentos se realizaron en el canal de ensayo de circuito de agua cerrado tipo HM 162, de la marca G.U.N.T, con una sección transversal de ensayo de 309 mm de ancho x 450 mm de altura, una longitud de recorrido de medición de 7.5 m y paredes laterales de vidrio templado.

**Figura 17**

*Vista Esquemática del canal hidráulico HM 162*

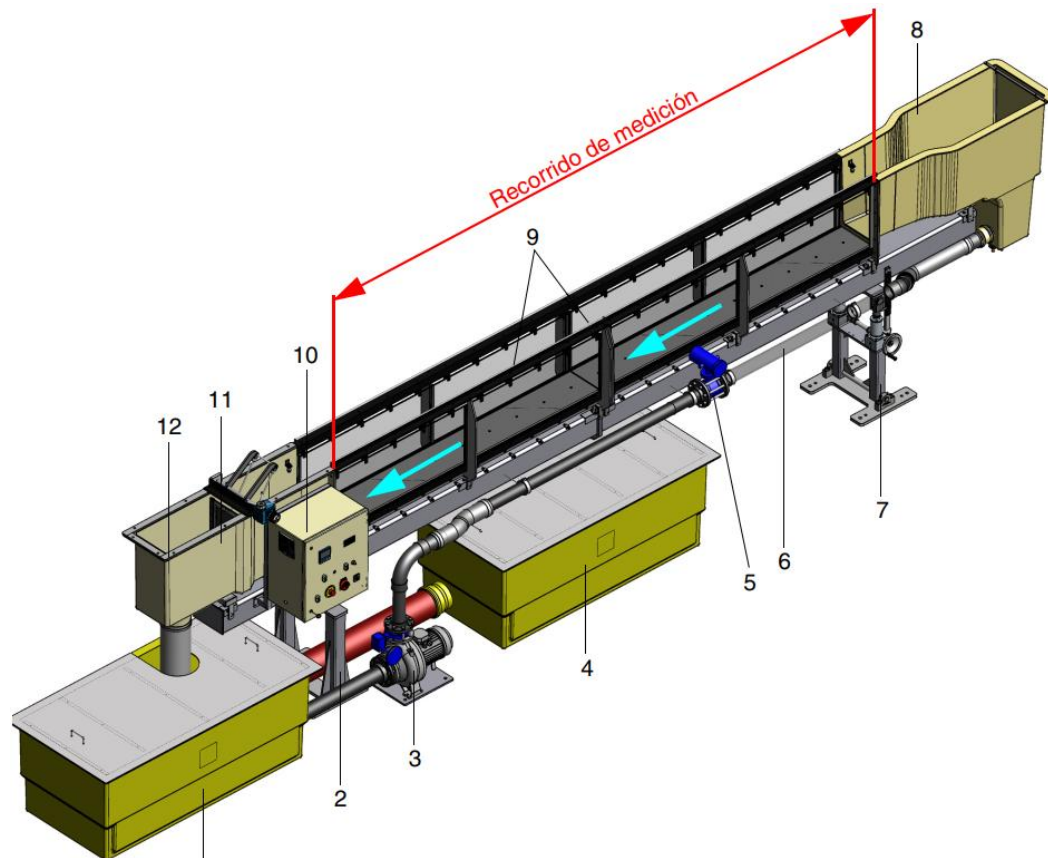


*Nota.* Canal de Ensayo HM 162 de 309x450 mm con sección de ensayo de 7.5 m. En esta se puede observar también sus diferentes componentes de manera esquemática, como es la bomba de agua, tanques y otros. Adaptado de *Canal de ensayo 309x450mm*, de G.U.N.T (2019a), [https://www.gunt.de/images/content/Aktuelles/Flumes-Gerinne/HM162\\_ohne\\_Schrift\\_breit.png](https://www.gunt.de/images/content/Aktuelles/Flumes-Gerinne/HM162_ohne_Schrift_breit.png).

En la figura 17 y 18 se muestran la vista esquemática 3D de todo el canal en la cual se puede apreciar los distintos elementos que conforman el sistema; como los 2 tanques de agua, la bomba, el canal rectangular de vidrio templado, el ajuste de inclinación eléctrica, el caudalímetro, el panel de control y entre otros elementos.

## Figura 18

### Vista General del Canal Hidráulico



*Nota.* Canal de Ensayo HM 162 de 309 x 450 mm con sección de ensayo de 7.5 m. Se puede observar con una flecha celeste la dirección del flujo que va de derecha a izquierda, asimismo sus diferentes componentes más relevantes: 3. Bomba, 4. Tanque, 5. Caudalímetro, 7. Ajuste de inclinación eléctrico, 10. Panel de control (PLC) y otros. Adaptado de *Manual de Experimentos* – G.U.N.T (2019).

En las figuras 19, 20 y 21 se muestra las fotos reales del canal de ensayo instalado en el laboratorio de hidráulica de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional Autónoma de Tayacaja. En ellas se puede apreciar los distintos elementos que componen el canal, como el panel de control o PLC (Controlador lógico programable), la bomba de agua, 2 depósitos de agua, el caudalímetro, el ajuste de inclinación eléctrico, la trampa de sedimentos y entre otros equipos necesarios para los diversos ensayos.

Además, es importante mencionar las estructuras de fondos con la que se contó en el canal, tales como es el de grava, liso con pendiente y arena especial de experimentos.

### **Figura 19**

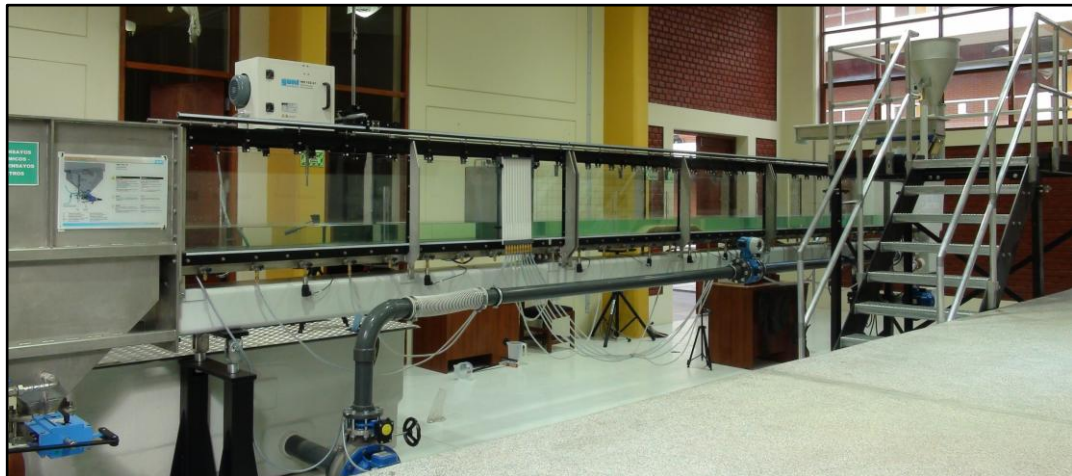
*Vista real 01 – Canal Hidráulico HM 162*



*Nota.* Canal de Ensayo HM 162 de 309x450 mm con sección de ensayo de 7.5 m de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil – UNAT, en la cual se muestra la vista lateral del canal de vidrio templado.

### **Figura 20**

*Vista real 02 – Canal Hidráulico HM 162*



*Nota.* Canal de Ensayo HM 162 de 309x450 mm con sección de ensayo de 7.5 m de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil – UNAT en la cual se muestra la vista panorámica del canal, observándose el caudalímetro digital y parte de la bomba de agua.

## Figura 21

*Vista real 03 – Canal Hidráulico HM 162*



*Nota.* Canal de Ensayo HM 162 de 309x450 mm con sección de ensayo de 7.5 m de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil – UNAT en la cual se observa el PLC y los 2 depósitos de agua.

A continuación, pasaremos a detallar los distintos componentes del canal que fueron utilizados en mi investigación.

### 3.6.1.1. Panel de control o PLC

El controlador lógico programable (PLC) es el sistema mediante el cual se controla los accesorios del canal de ensayo HM 162 a través de una pantalla táctil, como se muestra en la figura 22.

## Figura 22

*Controlador lógico programable (PLC) del canal de ensayo*



*Nota.* Panel de control del canal de ensayo HM 162, es un panel digital de la cual se controla todos los elementos que compone el canal, como la bomba, la pendiente, generador de olas, circuito de sedimentos, y entre otros.

En la figura 23 se muestra el interfaz del PLC, con los 6 accesorios o componentes conectados como son:

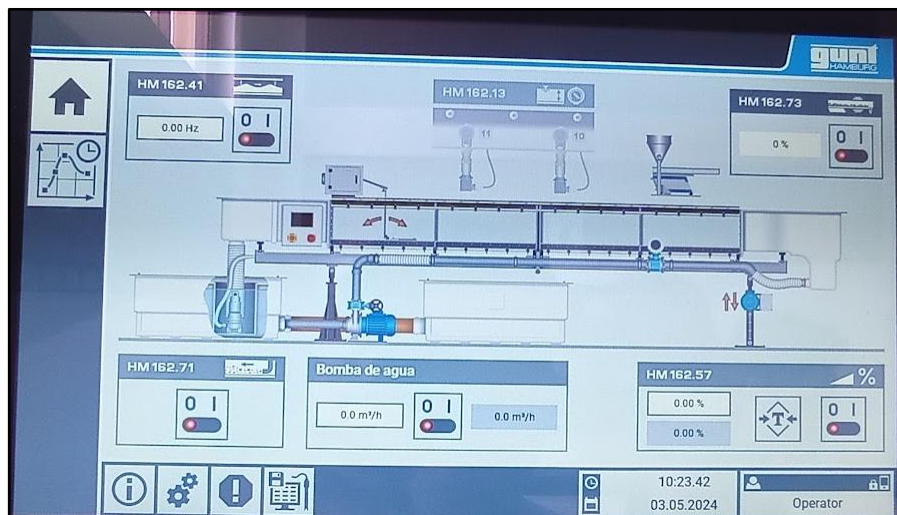
- Generador de olas HM 162.41.
- Alimentador de sedimentos HM 162.73.
- Circuito cerrado de sedimentos HM 162.7.
- Ajuste de la inclinación eléctrico HM 162.57 y entre otros.

Para el caso de mi investigación, se utilizó la bomba de agua y el sistema de inclinación electrónica HM 162.57, configurado con pendiente  $S=0\%$ .

Desde este panel, se puede insertar un caudal y un pendiente determinado, la cual se puede encender y apagar según se requiera.

**Figura 23**

*Interfaz del controlador lógico programable (PLC)*



*Nota.* Se muestra la interfaz del panel de control, de la cual se puede controlar la bomba, la pendiente del canal y otros accesorios del canal.

En la figura también se puede ver que la bomba no está encendida, ya que aparece con un botón rojo, por lo cual primero se inserta un caudal, luego se enciende tocando el botón rojo a la derecha y automáticamente cambia a color verde. Este mismo procedimiento se aplica para la pendiente del canal, se asigna un valor y luego se activa.

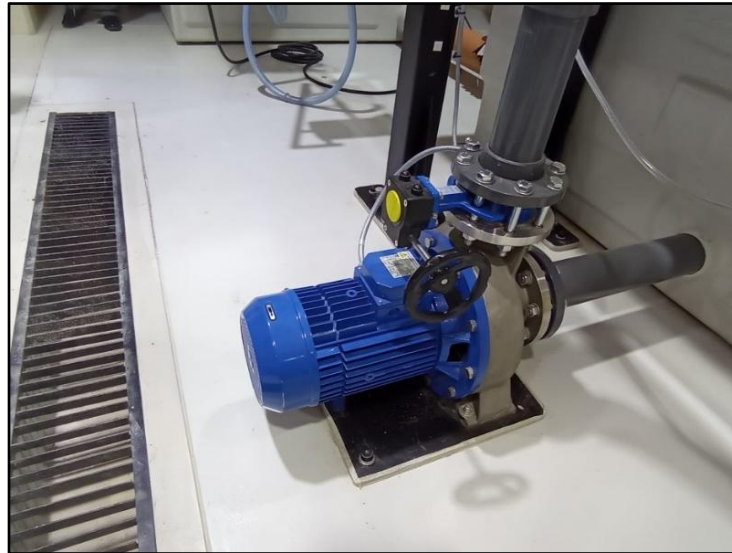
### 3.6.1.2. Bomba de agua

La función principal de la bomba es generar un flujo constante y controlado de agua a través del canal. La bomba toma agua de una fuente en este caso del depósito de agua y la

impulsa hacia el canal a un caudal requerido o dado en el panel de control para el experimento.

**Figura 24**

*Bomba de agua*



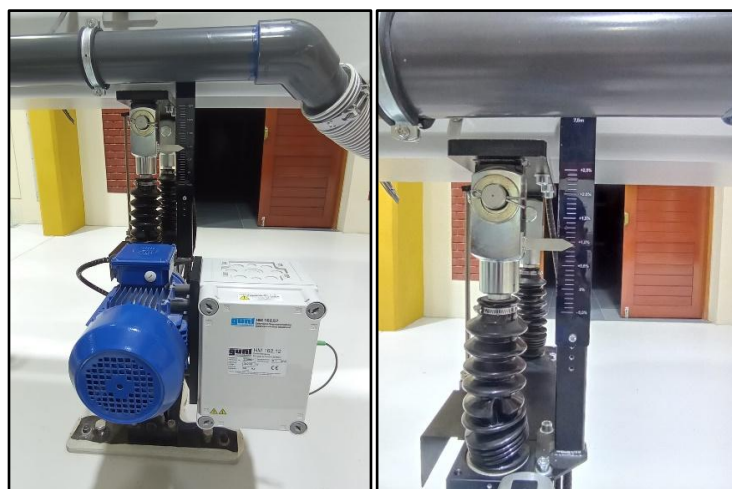
*Nota:* Bomba de Agua del Canal Hidráulico con aporte de caudal máximo de  $132 \text{ m}^3/\text{h}$

### 3.6.1.3. Ajuste de Inclinación Eléctrico

El ajuste de inclinación eléctrico (HM 162.57) compuesta principalmente por un motor de accionamiento eléctrico y una caja de distribución. Este dispositivo nos permitió controlar la pendiente requerida del canal, para el caso de mi investigación al 0%, la cual se maneja a través de la pantalla táctil del PLC del canal HM 162.

**Figura 25**

*Ajuste de la inclinación eléctrico HM 162.57*



*Nota:* Sistema de inclinación eléctrica para el cambio de pendientes, que va del -0.5 % al 2.5 %.

#### 3.6.1.4. Depósito de agua

El depósito de agua está fabricado de plástico reforzado con fibra de vidrio y dotado con tapa de aluminio. La tapa tiene una superficie antideslizante con lo que el depósito es transitable.

La conexión a la red existente depósitos de agua del canal experimental HM 162 se realiza con la ayuda de dos piezas de conexión. Además, el depósito de agua está equipado con una salida de agua, con una ubicación céntrica (G.U.N.T, 2019b).

El canal hidráulico de la UNAT cuenta con 2 depósito de agua de contenido útil de 1000 litros como se muestra en la figura 26.

#### Figura 26

*Depósito de agua 1000 l del canal de ensayo*



*Nota:* Depósito de agua del canal hidráulico con capacidad de 1000 l.

#### 3.6.1.5. El caudalímetro

Este equipo nos permite obtener el valor real del flujo que se está aportando al canal, lo que nos permite verificar el caudal que se le dio desde el PLC (Ver figura 27).

Un caudalímetro electrónico en un canal hidráulico tiene como función principal medir y monitorear el flujo de agua de manera precisa y en tiempo real. Esto permite gestionar eficientemente el flujo del fluido, optimizar la distribución del agua y detectar posibles fugas o irregularidades en el sistema. Además, puede integrarse con sistemas automatizados para regular el caudal según las necesidades operativas y facilitar estudios hidráulicos mediante el registro de datos para análisis posteriores.

**Figura 27**

*Caudalímetro electrónico.*



*Nota.* Caudalímetro electrónico de marca GUNT

### **3.6.1.6. El dissipador de olas y las rejillas graduadas para medición**

En la figura 28 se observa las rejillas graduadas colocadas en el canal, estas fueron necesarias para realizar las mediciones de solitones hidrodinámicos en el canal de ensayo HM 162.

**Figura 28**

*2 rejillas graduadas para mediciones*



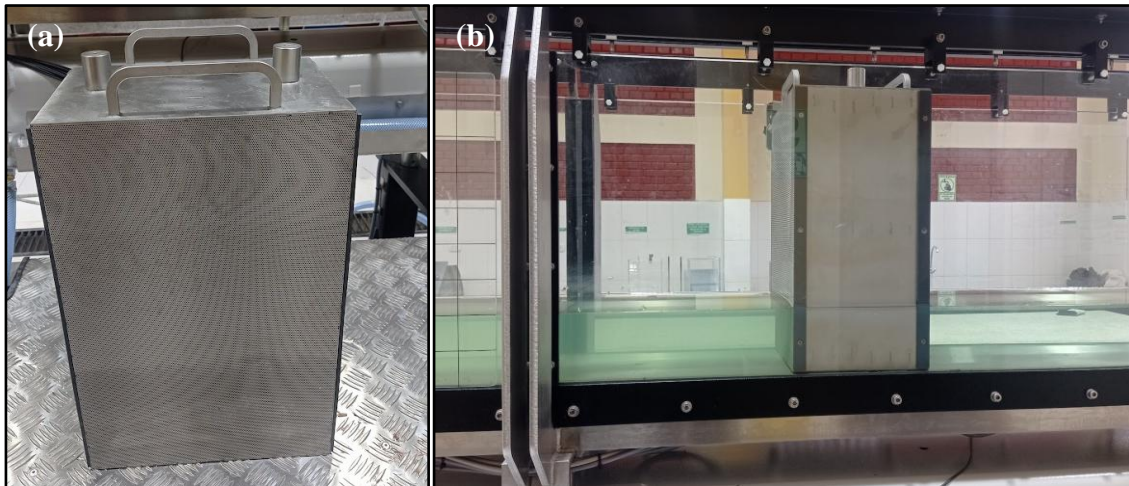
*Nota.* Rejillas graduadas de medición, con cuadrículas de 5 cm x 5 cm cada una. Estos están ubicados mediante un soporte en la parte superior del canal.

En la figura 29 se puede observar el dissipador de olas, que es un accesorio que permite la disipación de la energía de las olas solitarias. Este equipo permite una rápida estabilización del agua y evita que las olas se reflejen después del choque, sino que estas se

disipen rápidamente. Consta de una capa principal de agujeros mayores y otra capa con agujeros menores y tiene un ancho de 20 cm (Ver figura 29).

**Figura 29**

*Disipador de olas*



*Nota:* Disipador de olas; (a) Vista frontal del disipador de olas, (b) Disipador de olas colocado en el canal hidráulico.

### **3.6.2. Módulos Generadores de Solitones Hidrodinámico**

En esta investigación, como parte del proceso de ejecución, se probaron 2 módulos experimentales para generar los solitones hidrodinámicos: el de tipo compuerta y el de tipo pistón mecánico.

#### **3.6.2.1. Módulo generador de olas tipo compuerta (MGOC)**

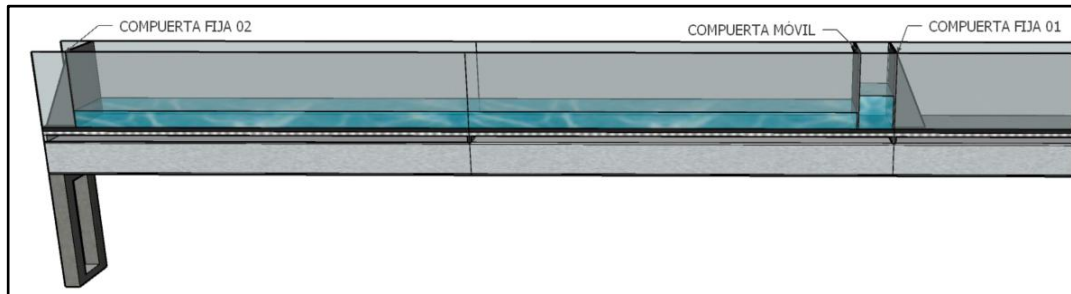
El módulo de compuerta consiste en un sistema de 3 elementos necesarios para la generación del solitón hidrodinámico.

- 2 compuertas fijas,
- 1 compuerta móvil de vidrio,

En la figura 30 se puede ver el modelo en 3D de este sistema, mencionar que este modelo fue similar a lo utilizado por Russell (1844) en sus experimentos iniciales y como lo hecho por Remoissenet (1999).

### Figura 30

Vista 3d esquemático del sistema generador tipo 1 en el canal de ensayo.

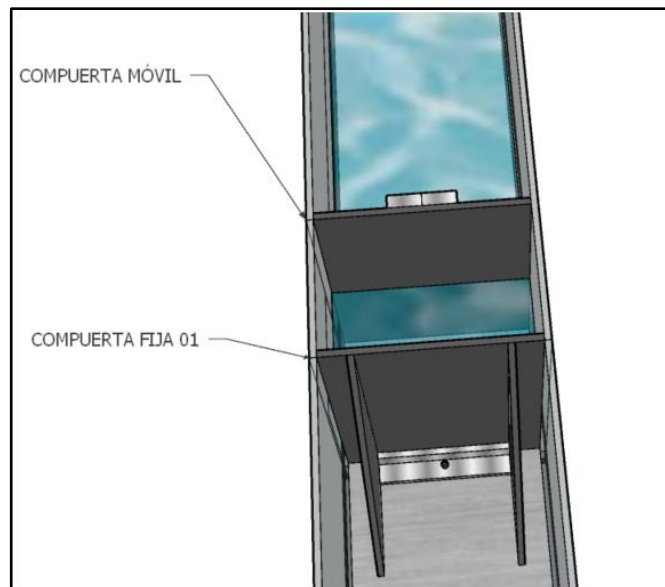


*Nota.* Se muestra en un extremo del canal la compuerta fija 02 y en la parte derecha la compuerta fija 01 y a una distancia de 20 cm la compuerta móvil.

En la figura 31 se puede ver la vista en detalla de la compuerta fija 01 la cual estaba fijada por un perno en la base del canal con un perno de rosca y a 20 cm de distancia de esta, se ubicó la compuerta móvil.

### Figura 31

Vista Esquemático superior de la compuerta fija 01 y la compuerta móvil



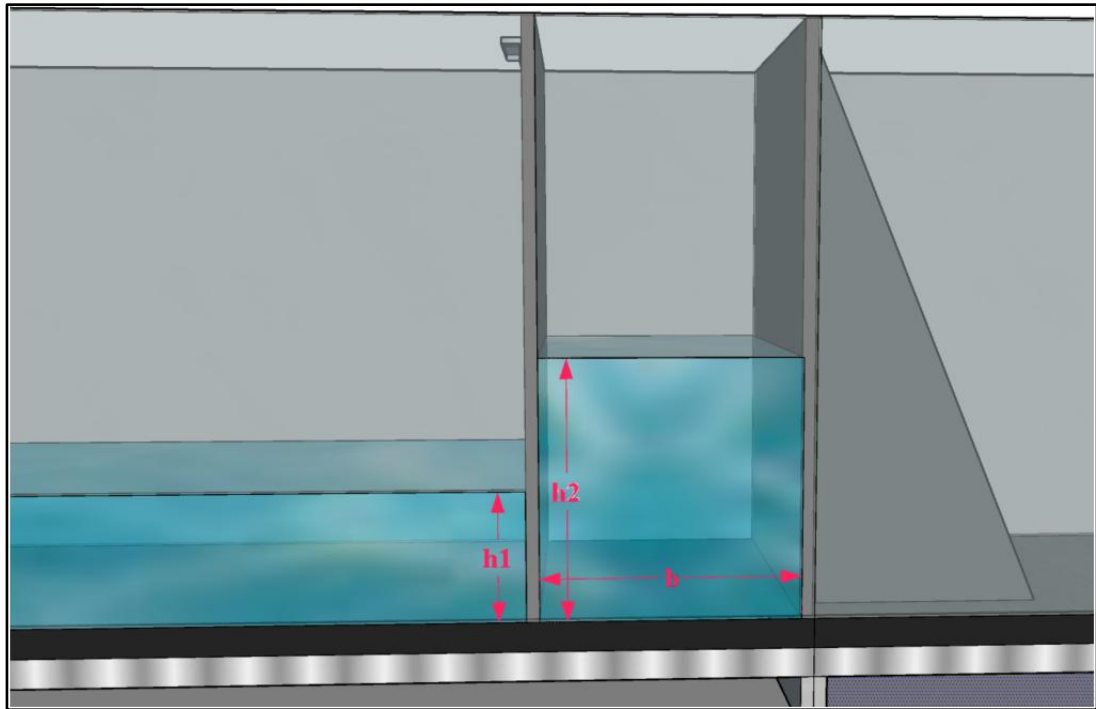
*Nota.* Se muestra la compuerta fija 01 y la compuerta móvil en 3D.

Para el análisis del flujo de los solitones hidrodinámicos, las compuertas fijas fueron ubicadas en los extremos del canal hidráulico de 7.5 m de longitud. Entre estas compuertas, se llenó un volumen de agua hasta un nivel inicial ( $h_1$ ) de 5 o 8 cm y la compuerta móvil se ubicó a una distancia ( $b$ ) de 20 cm de la primera compuerta fija 01. Luego, se llenó con agua

entre la compuerta 1 y la compuerta móvil hasta un nivel ( $h_2$ ) de 7 o 12 desde la base del canal respectivamente, como se puede apreciar en la figura 32.

### Figura 32

Vista 3d de la compuerta móvil y compuerta fija



*Nota.* Se muestra los parámetros de ensayo  $h_1$ ,  $h_2$  y  $b$  para la generación de solitón hidrodinámico con el sistema tipo compuerta, Se tomo  $b = 20$  cm para todos los casos de ensayo. Las compuertas fijas y 2 son fijadas con tornillos en la base del canal y el móvil se coloca de manera manual y se mantiene presionada en esa posición para evitar un vuelco.

Para generar el solitón hidrodinámico con este sistema, primero se movió la compuerta movable de manera manual en dirección vertical hacia arriba, de este modo se reprodujo los solitones hidrodinámicos.

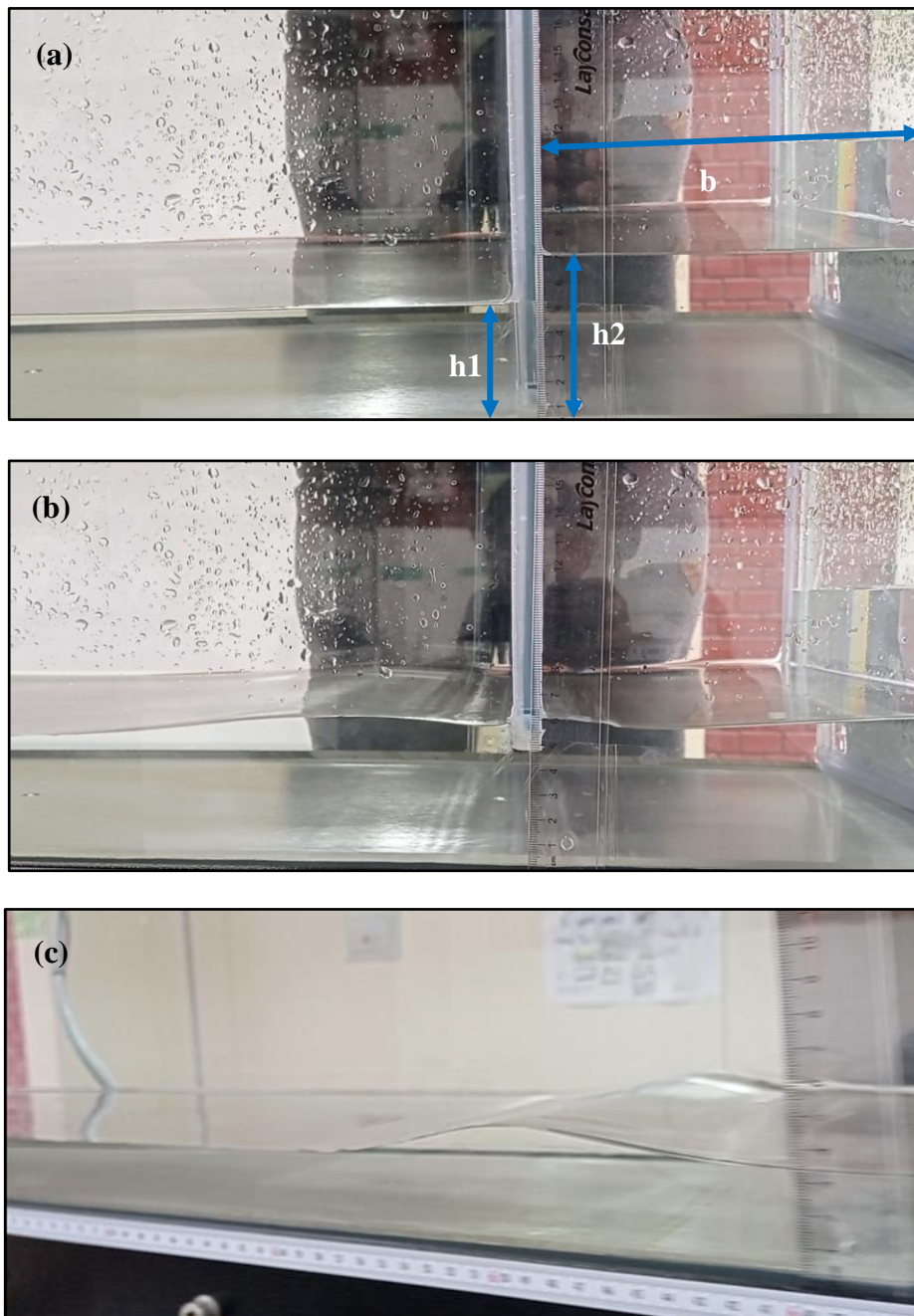
En la figura 33a se observa cómo se tuvo que mantener los niveles de agua de  $h_1$  y  $h_2$  y el ancho  $b$  para realizar los ensayos. En la figura 33b se muestra cómo, de manera manual, se jaló la compuerta móvil en dirección vertical hacia arriba. Con esta diferencia de niveles de agua, se generó el solitón hidrodinámico, tal como se puede mostrar en la figura 33c.

Pero es importante mencionar que, con este sistema se tuvo que controlar 4 variables para generar un solitón hidrodinámico adecuado: el nivel de agua inicial en reposo ( $h_1$ ), el nivel de agua entre la compuerta fija 1 y la compuerta móvil ( $h_2$ ), la velocidad de jalado de

la compuerta móvil y el ancho  $b$ ; es por ello que se tuvo que realizar varios ensayos y encontrar una relación óptima de  $h_2/h_1$ , verificándose que para una relación de  $h_2/h_1=1.4$  y 1.5 con un ancho ( $b$ ) de 20 cm, se puede generar un solitón hidrodinámico sin perturbaciones a lo largo de su recorrido. Sin embargo, esta relación es válida solo para este tipo de sistema de generación de solitón hidrodinámico, el de compuertas.

**Figura 33**

*Ensayo de solitón hidrodinámico con el generador tipo compuerta*



*Nota.* Ensayo con  $h_1=5$  cm y  $h_2=7$  cm y  $b = 20$  cm; (a) Parámetros iniciales de ensayo, (b) Jalado de la compuerta móvil, y (c) Generación y recorrido del solitón hidrodinámico.

Por ende, para este tipo de sistema, se sugiere realizar una serie de combinaciones en futuras investigaciones, en las cuales se puede variar el ancho ( $b$ ) o  $h_2$ ,  $h_1$ , y buscar relaciones óptimas de  $h_2/h_1$  y  $b$  para la generación de solitón hidrodinámico.

### 3.6.2.2. Módulo generador de olas tipo pistón (MGOP)

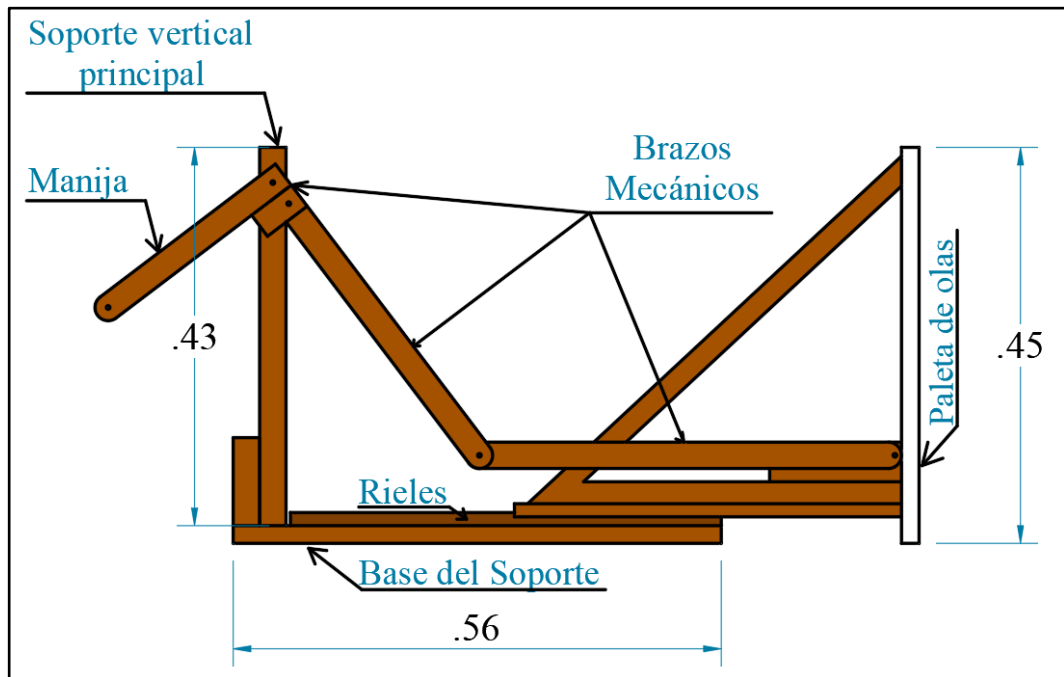
Para esta investigación, se realizó un sistema modificado a lo realizado por Hall & Watts (1953) la cual consiste en un sistema de olas tipo pistón mecánico o de empuje que genera un movimiento horizontal mediante el accionamiento de una manija. Esta manija, unida por unos por unos brazos mecánicos, impulsa la paleta de olas.

El módulo generador de ola tipo pistón de accionamiento mecánico, está compuesto por 3 partes principales, como se puede apreciar en la figura 34: 1) La parte de los soportes y los rieles, 2) La manija y los brazos mecánicos y 3) La estructura de la paleta de olas.

- 1) El soporte está conformado de una base de 56 cm de largo y 29.5 cm de ancho y la estructura de soporte vertical que este ensamblado encima de la base tiene una altura de 43 cm con un espesor de 3 cm, la cual tiene un soporte trasero para una mayor estabilidad. Además, en la base se colocaron 2 rieles de madera para que la estructura de la paleta puede desplazarse de manera suave y controlada.
- 2) La manija es aquella que este ensamblado conjuntamente con el brazo en el soporte vertical, esto sirve para generar el movimiento de empuje horizontal de la paleta. Los brazos mecánicos de madera son las que permiten unir el soporte vertical con la estructura de la paleta de olas, y están unidas con tornillos roscados.
- 3) La estructura de la paleta de olas es aquella que permite generar un desplazamiento horizontal ( $S$ ) de un volumen de agua, generando así el solitón hidrodinámico. Su estructura triangular, está hecha de madera pintada de color rojizo y la paleta de olas es de color blanco con un grosor de 1.5 cm, un ancho de 30.9 cm y altura de 45 cm. La paleta de olas está hecha de polietileno esto con el fin de solucionar el problema de hinchamiento que se generaba con una paleta de madera. El polietileno fue elegido como material para la paleta debido a que, la paleta de madera al tener las dimensiones de la sección transversal del canal (30.9 cm x 45 cm), pasado un tiempo se hinchaba, lo que requería que se secaran periódicamente. En el caso de los demás accesorios de madera, no había problemas, ya que se tenía un margen de hinchamiento de 0.5 cm, por lo cual no se requirió cambiar el material.

**Figura 34**

*Esquema de partes del sistema generador olas tipo pistón*



*Nota.* Se observa las partes del sistema generador de solitones hidrodinámicos 1) Base del soporte, soporte vertical y rieles. 2) Manija y brazos mecánicos. 3) Estructura de la paleta de olas. Las medidas están dadas en metros.

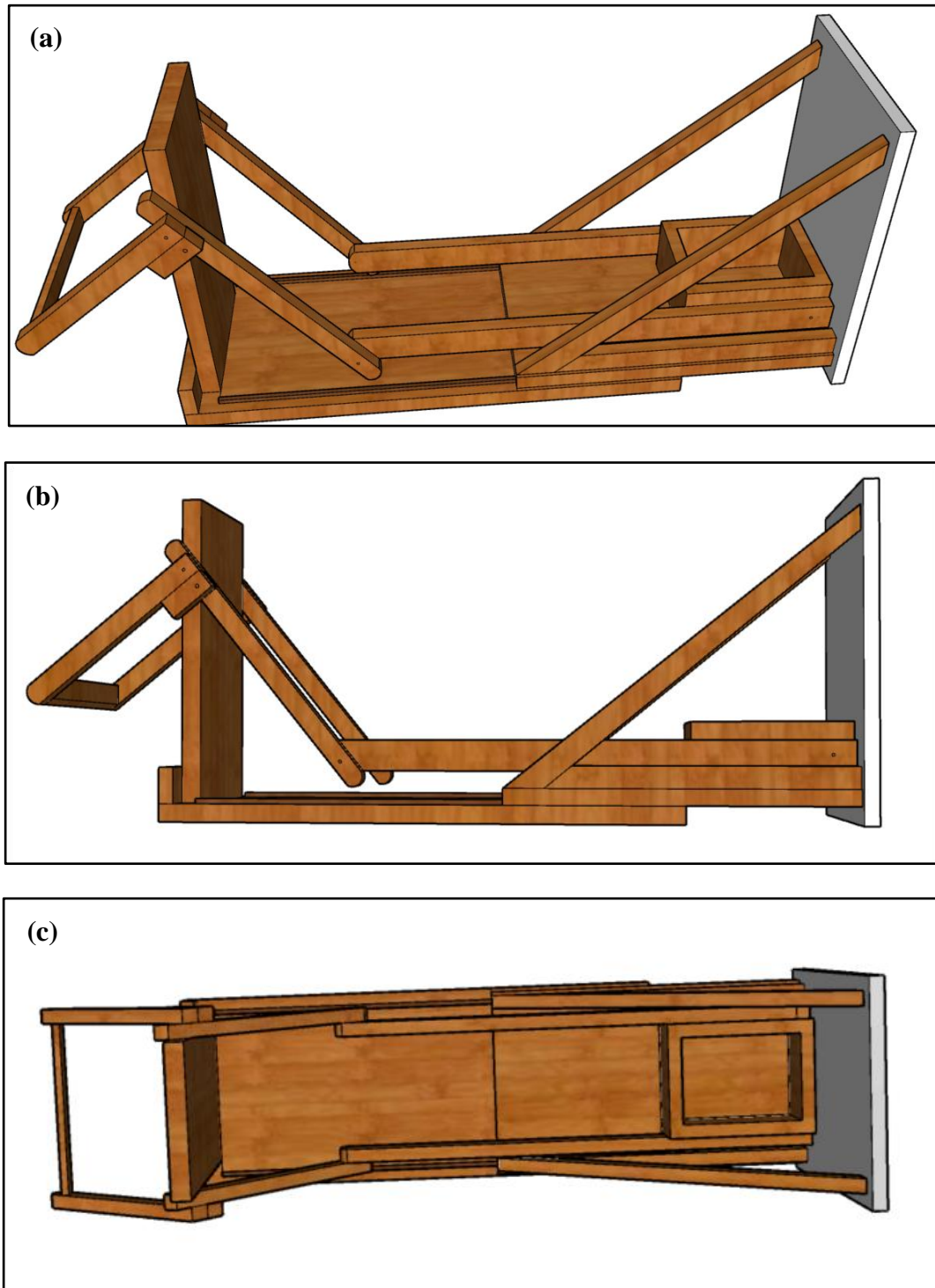
En la figura 35a se puede apreciar la vista general del modelo 3d realizado para la construcción del generador de solitones tipo pistón mecánico. En la figura 35b se puede ver la vista de perfil de modulo y en la 36c la vista de planta del módulo experimental.

Asimismo, en las figuras 36a, 36b y 36c se puede ver las diferentes vistas reales del módulo experimental, construido con las especificaciones antes dadas. Este módulo fue utilizado durante los ensayos de la investigación.

Como se puede apreciar en la figura 36, los brazos y los diferentes elementos del módulo fueron ensamblados utilizando pernos de rosca, lo que permitió construir el sistema generador de solitones hidrodinámicos de forma eficiente.

### Figura 35

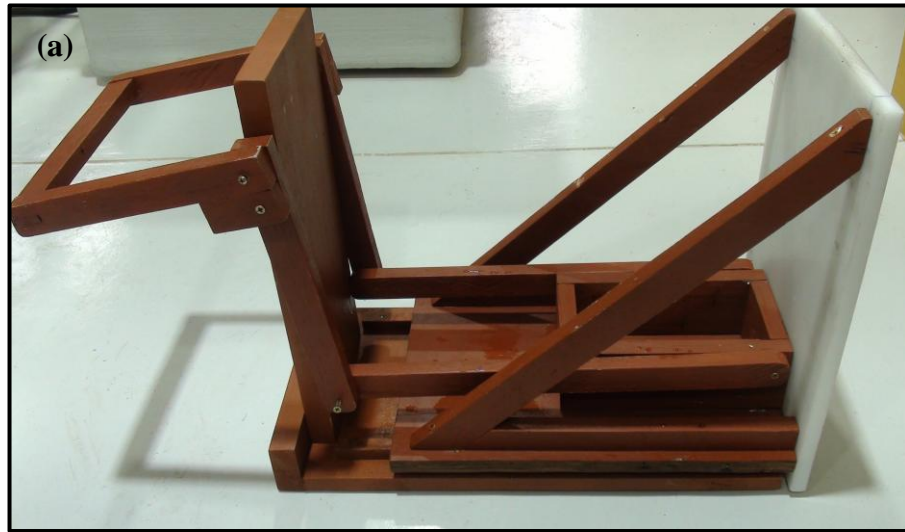
Vista de modelo 3d generador tipo empujador



*Nota.* Se muestra el modelo 3D realizado del generador de olas tipo solitón; (a) Vista general 3d, (b) vista de perfil (c) vista de planta del módulo experimental.

**Figura 36**

*Generador tipo empuje de solitón hidrodinámico – Vistas reales*



*Nota.* Se muestra la foto del módulo experimental tipo pistón mecánico para la generación de solitones hidrodinámicos. En las figuras, se puede observar la paleta del generador, de color blanco, fabricada de polietileno y toda la estructura del generador, de color marrón rojizo, hecho de madera.

### **Selección del módulo experimental tipo pistón forma mecánica:**

En mi investigación se utilizó el módulo generador de olas tipo pistón mecánico o empuje, en lugar del módulo generador tipo compuerta, por las siguientes razones:

Para el caso del módulo experimental v1 tipo compuerta, para generar los solitones hidrodinámicos de manera adecuada fue necesario controlar varias variables, tales como: El ancho ( $b$ ), profundidad de agua en reposo ( $h_1$ ), nivel de agua de la base hasta el nivel 2 ( $h_2$ ), la presión de empuje del agua que se generada al momento de llenar un volumen de agua entre la compuerta fija y la compuerta móvil, y la velocidad de jalado de la compuerta móvil. Si bien estas variables se lograron controlar, el tiempo requerido para realizar cada ensayo era mucho mayor, ya que se tenía que llenar 2 niveles de agua  $h_1$  y  $h_2$  asimismo tener que agarrar manualmente la compuerta móvil, lo cual dificultaba la generación del solitón. Por todo ello, se identificó que este sistema no era tan eficiente. Por esta razón, se buscó alternativas de solución para encontrar un mecanismo más factible y eficiente de generación de solitones hidrodinámicos, como el módulo de tipo pistón.

Para el módulo experimental v2, generador de olas tipo pistón, solo era necesario controlar la variable de la fuerza de empuje, que se daba al desplazar la manija, generando el movimiento horizontal de la paleta hasta una distancia  $S$  de desplazamiento horizontal, para lo cual se encontró una ecuación que permitió aproximar un desplazamiento horizontal de la paleta ( $S$ ) descrita más adelante. También, la profundidad de agua en reposo ( $h$ ) fue controlado con un tapón, el cual se cerró de manera más hermética para evitar que el agua no pueda fluir hacia los depósitos de agua.

Asimismo, hacemos mención que existe un sistema de generador de olas a base de pistón y servomotor controlable mediante un código para generar ondas tipo solitarias, como se hizo en estudios previos de Jeong et al. (2019) y Han et al. (2015). Este sistema permite realizar los ensayos de manera más automatizada, pero también los costos de instalación acorde al canal de ensayo, el sistema eléctrico y la programación, son mucho mayores en comparación con el sistema mecánico tipo pistón.

#### ***3.6.3. Sistema Experimental y estructuras de Fondo***

Los experimentos se llevaron a cabo en un canal hidráulico de 7.5 m, con paredes de cristal de vidrio templado. La sección transversal del canal tiene un ancho de 0.309 m y 0.45 m de altura. En la figura 37 se muestra el diagrama esquemático del canal hidráulico, con el generador de solitones hidrodinámicos instalado.

En la figura 37 además se muestra la configuración general de los experimentos, la cual está compuesta por:

- 1 generador de solitones hidrodinámicos.
- 2 rejillas graduadas de medición.
- 1 dissipador o absorbedor de olas.

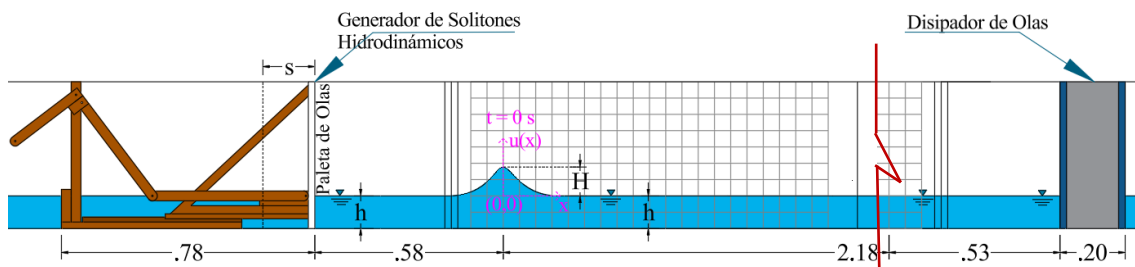
El generador de solitones hidrodinámicos tipo pistón nos permitió generar las ondas solitarias mediante un pulso generado, al accionar la manija del módulo experimental. Este movimiento genera un movimiento horizontal de la paleta, que, en una fracción de segundo, desplazó un volumen de agua para generar la onda solitaria de estudio.

Las rejillas graduadas nos permitieron realizar el escalamiento de los fotogramas obtenidas de los videos experimentales. En total, se utilizaron 2 laminas con rejillas de medición colocadas estratégicamente en la zona de medición.

El dissipador de olas fue ubicado a 2.71 m de las coordenadas de origen  $t=0$  s, este accesorio nos permitió disipar o absorber la energía de los solitones hidrodinámicos para una rápida y mejor estabilización del agua para cada ensayo.

**Figura 37**

*Montaje general de experimento*

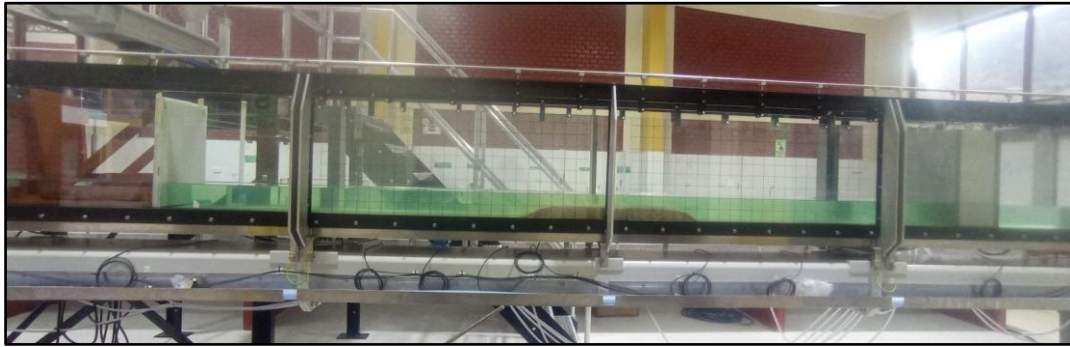


*Nota:* Vista General del Canal Hidráulico con el Generador de Olas, en la cual se puede observar el generador de solitón tipo pistón de forma mecánica, la rejilla graduada de medición, el dissipador de olas, la profundidad de agua en reposo ( $h$ ) y Amplitud del solitón ( $H$ ).

A continuación, en la figura 38 se puede apreciar la vista real de la configuración experimental. A la izquierda se muestra el generador de solitones hidrodinámicos, mientras que en el extremo derecho está ubicado el dissipador de olas. Entre estas, se sitúan las 2 rejillas graduadas de medición y la configuración de fondo para cada ensayo.

### Figura 38

#### Montaje General de Experimento – Vista general real

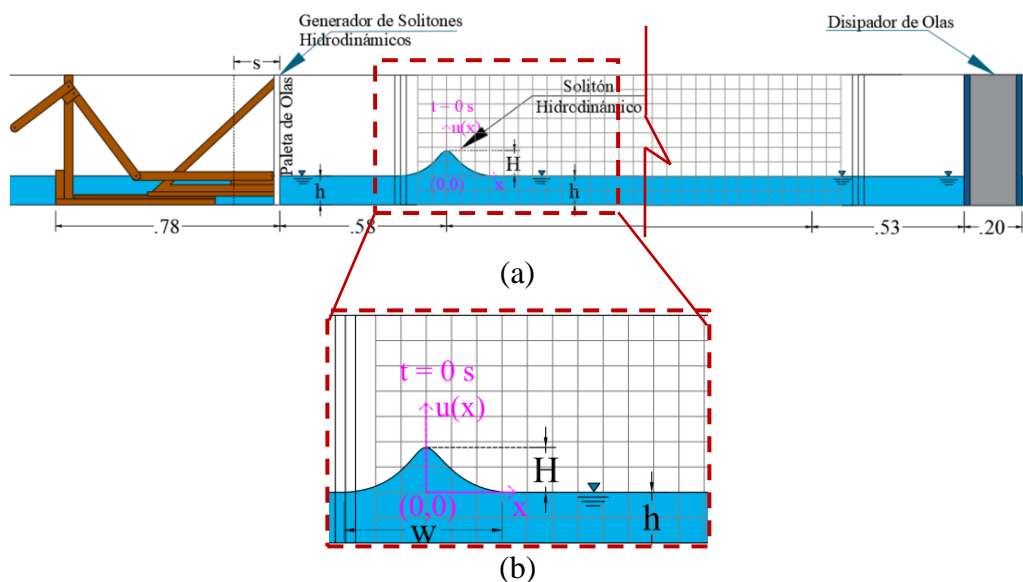


*Nota:* Vista real general del Canal Hidráulico con el Generador de Olas donde se puede observar el generador de solitones en la parte izquierda, el dissipador de olas y las rejillas de medición.

En la figura 39a y 39b, se muestra el origen de coordenadas (0.0) del solitón hidrodinámico, ubicado a una distancia de 58 cm del movimiento horizontal de la paleta (S). Se tendrá una sección para medición de 2.18 m, en la cual se colocaron las estructuras de fondo para el análisis. A 2.71 m del origen está ubicado el dissipador de olas, mientras que las 2 rejillas graduadas fueron ubicadas en las 2 partes de la sección de medición de las ondas solitarias.

### Figura 39

#### Vista general y definición de coordenadas de origen



*Nota:* Vista general y definición de coordenadas de origen; (a) Esquema general de experimentos, (b) Definición de origen temporal ( $t = 0$  s) y de las coordenadas espaciales (0,0) de origen descritas en color rosado.  $h$  es la profundidad de agua en reposo,  $H$  es la amplitud del solitón hidrodinámico y  $W$  ancho del solitón.

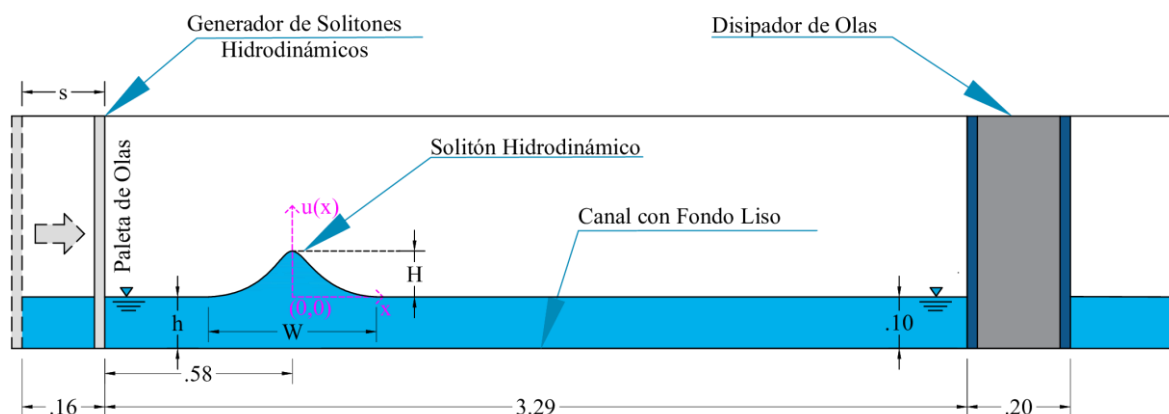
A continuación, se muestran los 4 escenarios experimentales de nuestra investigación por lo cual se realizó esquemas según a cada configuración.

### A. Configuración experimental con fondo liso

En la figura 40 se muestra el esquema experimental, mientras que en la figura 41 se presenta la configuración real en el laboratorio del canal hidráulico con un fondo liso. En esta figura, se muestra la paleta de olas con un desplazamiento  $S$  para la generación del solitón hidrodinámico, el dissipador de olas y el tipo de fondo, en este caso liso. Asimismo, se tiene una profundidad de agua en reposo ( $h=10$  cm) y  $H$ , que es la amplitud máxima del solitón hidrodinámico. También se aprecia el origen de coordenadas, ubicada a 58 cm de la paleta de olas desplazada.

**Figura 40**

*Esquema experimental con fondo liso*



*Nota:* Vista esquemática de canal con fondo liso. Donde ( $h$ ) representa la profundidad de agua en reposo, ( $H$ ) la amplitud del solitón hidrodinámico, ( $W$ ) el ancho del solitón y ( $S$ ) desplazamiento horizontal de la paleta de olas.

En la figura 40 también se muestra las coordenadas de origen del solitón hidrodinámico, representadas de color rosado, la cual está a 58 cm del desplazamiento horizontal de la paleta. Estas coordenadas marcan desde donde se tomará el inicio del recorrido del solitón, que se graba mediante una cámara a 60 FPS, desde el instante  $t = 0$  s hasta todo el recorrido del solitón hidrodinámico.

**Figura 41**

*Configuración experimental real con fondo liso*



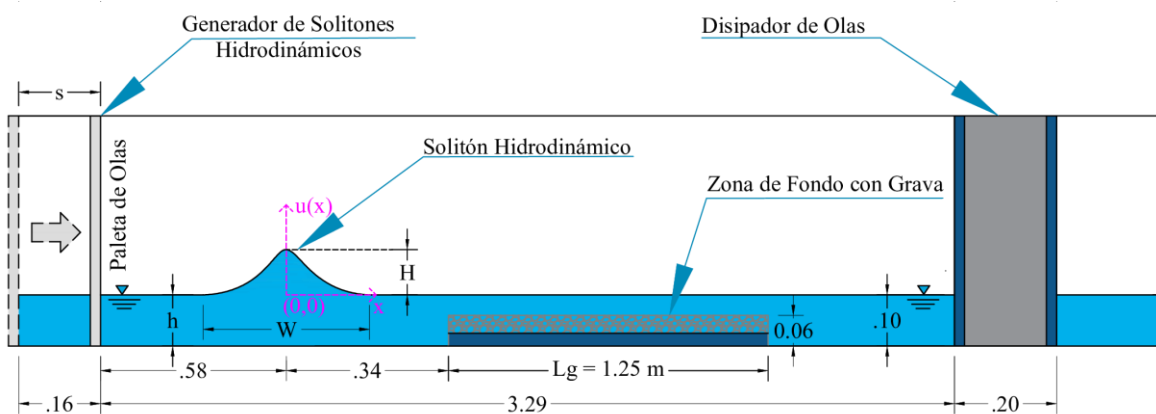
*Nota:* Configuración experimental real de canal hidráulico con fondo liso. Se puede observar al solitón en un medio líquido de coloración verdosa.

### **B. Configuración experimental con fondo de grava**

El segundo caso experimental es el del canal con fondo de grava, la cual está ubicada a 34 cm del origen de coordenadas (0,0). La estructura de fondo de grava, tiene una longitud de 1.25 m y espesor de aproximadamente de 5.5 cm a 6 cm, esto debido las protuberancias de la grava, ver figura 41 y 42.

**Figura 42**

*Esquema experimental con fondo de grava*



*Nota:* Vista esquemática de canal con Fondo de Grava. Donde ( $h$ ) representa la profundidad de agua en reposo, ( $H$ ) la amplitud del solitón hidrodinámico, ( $W$ ) su ancho del solitón, ( $Lg$ ) Longitud de grava y ( $S$ ) desplazamiento horizontal de la paleta de olas.

### Figura 43

#### Configuración experimental real con fondo de grava

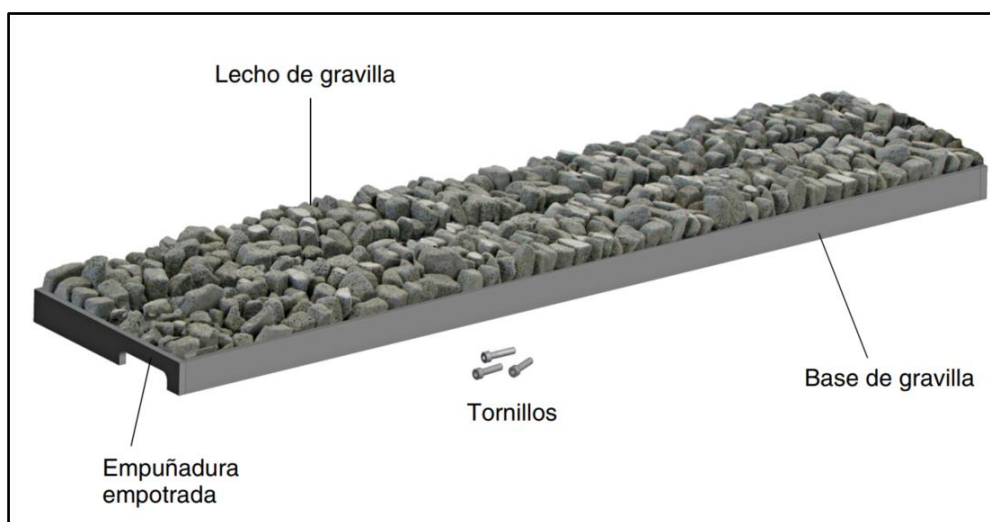


*Nota:* Configuración experimental real de canal hidráulico con fondo de Grava. Se puede observar al solitón de coloración verdosa, en el inicio de la estructura de fondo variable.

En la figura 44 se puede apreciar en detalle la estructura del fondo de grava, que tiene una base de material de PVC con un lecho de gravilla.

### Figura 44

#### Configuración experimental real con fondo de grava



*Nota:* Estructura de la base de canal de gravilla. Adaptado de *Manual de Experimentos – HM 162.77 Base del canal con gravilla* de G.U.N.T (2019b).

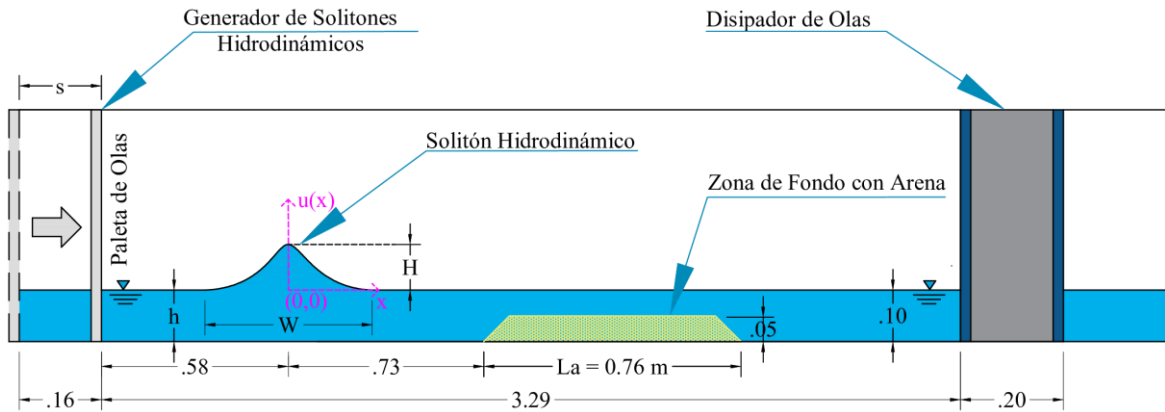
### C. Configuración experimental con fondo de arena

Para el tercer caso, se agrega en una sección de 0.76 m de longitud, un espesor de arena especial de experimentos de 5 cm, la cual está ubicado a 73 cm del origen de

coordenadas. La arena se colocó de manera manual con una configuración como la que se muestra en el esquema, ver la figura 45.

**Figura 45**

*Esquema experimental con fondo de arena*



*Nota:* Vista esquemática de canal con Fondo de Arena. Donde ( $h$ ) representa la profundidad de agua en reposo, ( $H$ ) la amplitud del solitón hidrodinámico, ( $W$ ) el ancho del solitón, ( $La$ ) Longitud de arena y ( $S$ ) desplazamiento horizontal de la paleta de olas.

**Figura 46**

*Configuración experimental real con fondo de arena*



*Nota:* Configuración experimental real de canal hidráulico con Fondo de Arena. Se puede observar al solitón de coloración verdosa, en el inicio de la sección de fondo de arena.

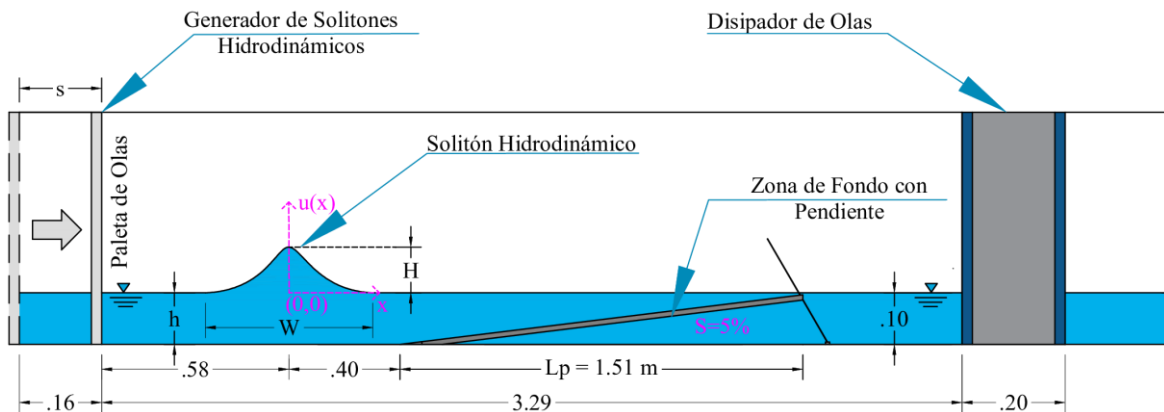
#### **D. Configuración experimental con fondo liso con pendiente**

Por último, el cuarto caso experimental corresponde al canal con una sección de fondo liso con pendiente  $S$  del 5%. Como se observa en el esquema, se colocó un bastidor sobre el cual se ajusta el fondo liso a una pendiente mínima dada por el riel de bloqueo a  $S=5\%$ , ver figura 47.

La estructura de fondo liso con pendiente está ubicado a 40 cm del origen de coordenadas (0,0), tiene una longitud de 1.51 m y ancho de 30.4 cm.

**Figura 47**

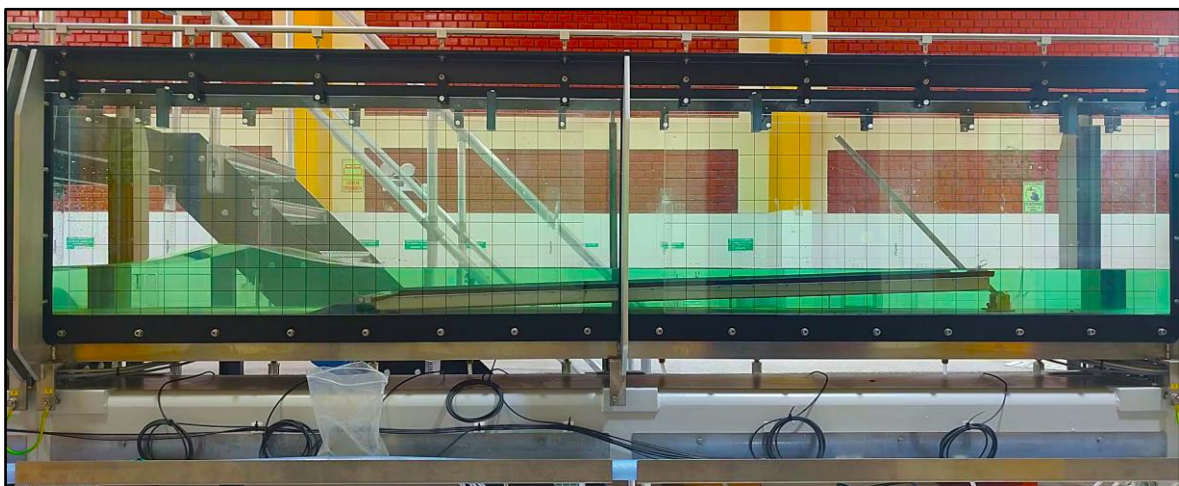
*Esquema experimental con fondo liso con pendiente  $s=5\%$*



*Nota:* Vista esquemática de canal con fondo liso con pendiente del  $S=5\%$ . Donde ( $h$ ) representa la profundidad de agua en reposo, ( $H$ ) la amplitud del solitón hidrodinámico, ( $W$ ) su ancho del solitón y ( $L_p$ ) Longitud de fondo liso con pendiente  $S=5\%$  y ( $S$ ) es el desplazamiento horizontal de la paleta de olas.

**Figura 48**

*Configuración experimental real con fondo liso con pendiente  $S=5\%$*



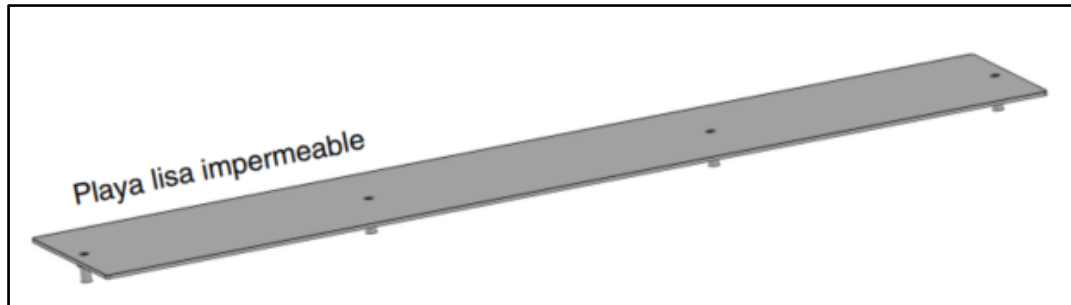
*Nota:* Configuración experimental real de canal hidráulico con fondo liso con pendiente  $S=5\%$ . Se puede observar al solitón de coloración verdosa, en el inicio de la sección de fondo con pendiente.

La playa de fondo liso se ajusta en el bastidor por pernos de fijación para evitar que el agua haga flotar este elemento. Asimismo, el bastidor se fija con 2 pernos en la base del canal de ensayo.

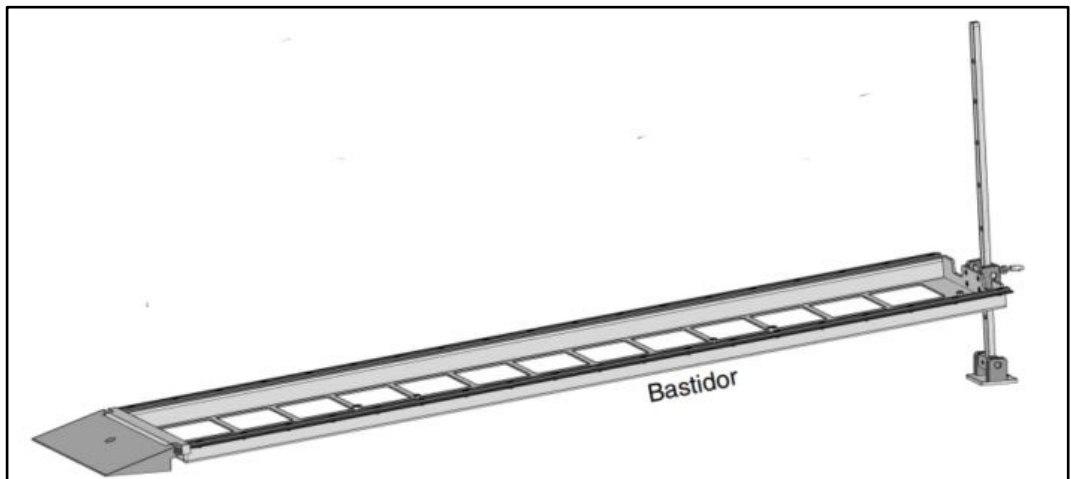
En la figura 49 en (a) se muestra la playa lisa y (b) el bastidor, que son los componentes del sistema de fondo liso con pendiente al 5%.

**Figura 49**

*Estructura de fondo liso con pendiente variable*



(a)



(b)

*Nota:* Estructura de pendiente con fondo liso; (a) Playa lisa impermeable, (b) Bastidor y riel de bloqueo para una pendiente  $S$  (%). Adaptado de *Manual de Experimentos – HM 162.80 Juego de playas* de G.U.N.T (2019b).

A continuación, en la figura 50 se muestra la foto real del fondo liso con riel, con la cual el bastidor es ajustable a  $S=5\%$ ,  $S=10\%$ ,  $S=15\%$ ,  $S=25\%$ ,  $S=30\%$  y  $S=35\%$  para nuestra investigación solo se tomó  $S=5\%$  para mi investigación.

Esta pendiente se definió, porque era una baja pendiente y esta podría quedar sumergido, ya que nuestro objetivo es evaluar el efecto de fondo liso con pendiente en una profundidad de  $h = 10$  cm, la cual es el parámetro inicial para todos nuestros ensayos. Pero se recomienda que se evalúe diferentes pendientes en futuras investigaciones y evaluar su comportamiento con esas variaciones.

## Figura 50

*Estructura de pendiente con fondo liso – Vista real*



*Nota:* Estructura real del sistema de fondo liso con pendiente en la cual se observa el bastidor con el elemento de playa lisa. El bastidor tiene 7 agujeros para fijar una pendiente deseada del 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30% y 35%.

### 3.6.4. Cámara de alta resolución full HD a 60 fps

Para capturar las imágenes o fotogramas se grabaron videos por cada ensayo a una tasa de 60 FPS con una resolución de full HD (1920 x 1080 pixeles), para capturar de una manera más óptima el paso de los solitones hidrodinámicos por la zona de medición.

La cámara se ubicó en una zona estratégica para tener un ángulo que pueda abarcar la zona de medición de 2.5 m del recorrido del solitón hidrodinámico. En la figura 51 se muestra la zona de ubicación de la cámara de 60 fps.

## Figura 51

*Ubicación de la cámara con trípode para los ensayos experimentales*



*Nota.* Ubicación de la cámara de alta resolución de 60 FPS para los ensayos de solitones hidrodinámicos. Este está ubicado a unos 2 m del canal para tener un ángulo de visión óptimo.

### 3.6.5. Condiciones Experimentales

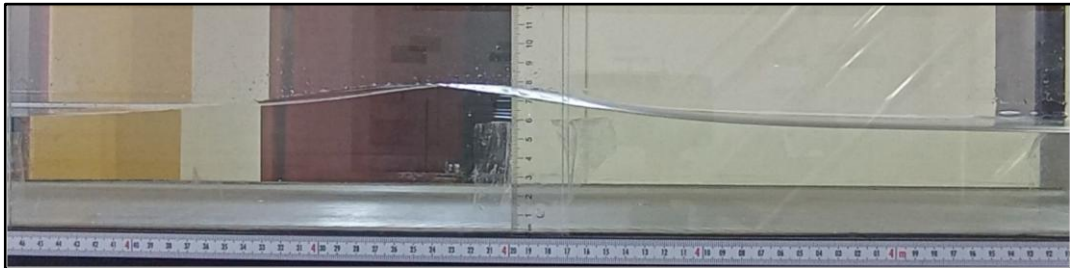
#### 3.6.5.1. Pruebas preexperimentales para definir el $h=10$ cm

Una variable que se tuvo que analizar fue el  $h$  (profundidad de agua en reposo) ya que a mayor profundidad  $h$  se puede generar mayor amplitud de solitón hidrodinámico. Sin embargo, esto también dependía de la fuerza aplicada al generador y el desplazamiento  $S$ . Por ello, se realizaron pruebas iniciales para encontrar un  $h$  que permitiera realizar los ensayos de manera más óptima y eficiente a la hora de la generación del solitón.

En la figura 52 se puede mostrar un ensayo realizado con  $h=5.8$  y  $6$  cm, con la cual se obtuvo un  $H=2$  cm. Como se puede apreciar, se genera un solitón hidrodinámico con una baja amplitud. En muchos de los casos, fue difícil generar un adecuado solitón hidrodinámico, ya que se hacía difícil controlar esa fuerza aplicada a la manija para generar el desplazamiento  $S$  con la paleta de olas y estaba propensa a las perturbaciones.

**Figura 52**

*Solitón hidrodinámico con  $h=5.8$  cm*



*Nota:* Solitón hidrodinámico con  $h=5.8$  cm. Se aprecia el perfil de un solitón hidrodinámico.

En la siguiente figura 53 y 54 se puede apreciar el solitón hidrodinámico generado. Sin embargo, en la mitad de su recorrido, tiende a perturbarse debido a que no se tenía un desplazamiento  $S$  controlado para un  $h=5.8$  o  $6$  cm, además la dificultad para controlar la fuerza aplicada al generador para el empuje de la paleta.

**Figura 53**

*Solitón hidrodinámico con  $h=5.8$  cm*



*Nota:* Solitón hidrodinámico con forma ligeramente deformada en su recorrido con  $h=5.8$  cm.

### Figura 54

#### *Solitón hidrodinámico perturbado*

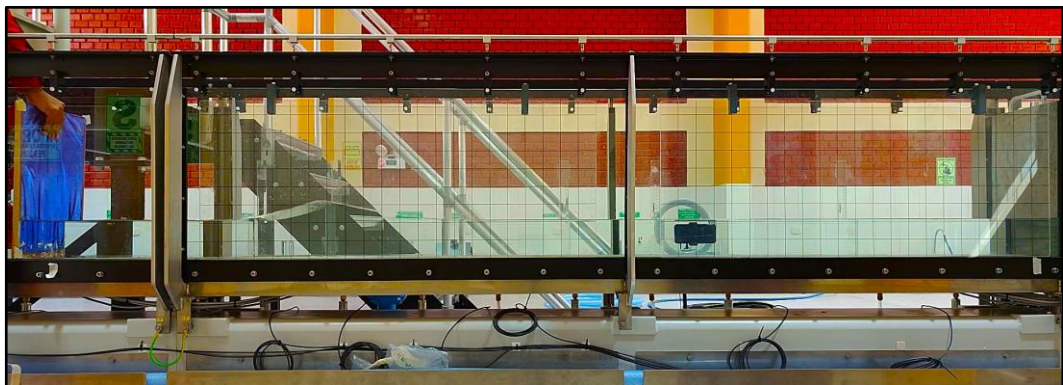


*Nota:* Solitón hidrodinámico que tiende a perturbarse en la mitad de su recorrido.

En las figuras 55, 56 y 57 se muestra la generación de solitones hidrodinámicos con una amplitud mayor, aproximadamente 5 cm, con una profundidad de agua en reposo de  $h=10\text{cm}$ . Se puede observar que el solitón presenta una forma más estable y definida. Esto se atribuye en parte al empuje aplicado y la profundidad del agua. Sin embargo, para garantizar un control más preciso en la generación de solitones con las mismas características similares, fue necesario calcular el desplazamiento  $S$  con la Ec. 26.

### Figura 55

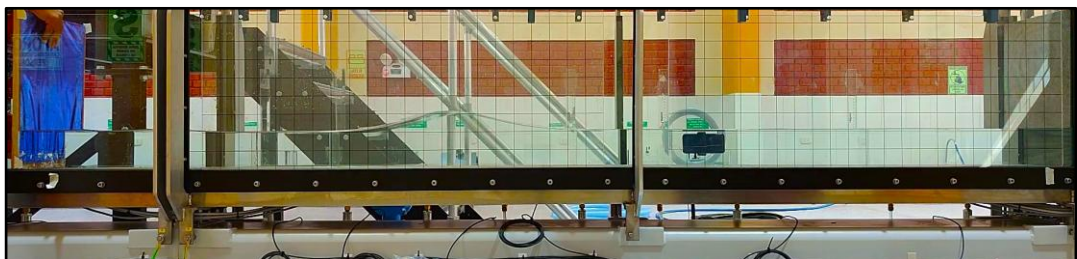
#### *Solitón hidrodinámico con un $h=10\text{ cm}$*



*Nota:* Solitón hidrodinámico con una amplitud mayor de aproximadamente 5 cm

### Figura 56

#### *Recorrido del solitón hidrodinámico*



*Nota:* Se muestra un solitón hidrodinámico en el canal rectangular de fondo liso.

## Figura 57

*Recorrido del solitón hidrodinámico en canal con  $h=10$  cm*



*Nota:* Se observa un solitón hidrodinámico con una amplitud mayor y forma más estable.

No obstante, se recomienda realizar más pruebas con diferentes valores de  $h$  para un análisis más detallado de la influencia de la profundidad de agua en reposo sobre la estabilidad y la amplitud de los solitones generados.

### **Selección de $h=10$ cm (Profundidad de agua en reposo):**

Para el caso específico de mi investigación se tomó como  $h=10$  cm por las siguientes razones:

- Se logró una amplitud óptima para realizar las mediciones, alcanzando una amplitud objetivo de aproximadamente 5 cm a más, según las pruebas preliminares realizadas.
- Los espesores de las estructuras de fondo, que varían entre 5 y 6 cm, hacían inviable realizar ensayos con profundidades menores a 6 cm.
- En la mayoría de los ensayos preliminares con  $h=10$  cm, los solitones hidrodinámicos generados presentaron una forma estable y sin perturbaciones significativas.
- Se logró un mayor control de  $h = 10$  cm gracias al uso de las rejillas de medición, el correcto aseguramiento del tapón del canal, y la paleta de olas de polietileno, lo que permitió un control adecuado en la generación de los solitones.
- La elección de  $h=10$  esta respaldada por estudios de Jeong et al. (2019) y Lin et al. (2018), quienes también utilizaron esta profundidad para generar solitones hidrodinámicos óptimos.

### **3.6.5.2. Condiciones experimentales**

Por lo tanto, para nuestra investigación se realizaron en total 4 casos experimentales; caso 1 concerniente a los experimentos con fondo liso, caso 2 con adición de fondo de grava, caso 3 con fondo de arena y por último el caso 4 con fondo liso con pendiente.

En la tabla 2 de muestra los principales parámetros experimentales, entre ellos, la profundidad de agua en reposo ( $h$ ), que fue constante para los 4 casos, con un valor de 10 cm. Esta profundidad fue seleccionada con base a justificaciones expuestas en el apartado anterior, así como en los análisis realizados y en los resultados obtenidos por Jeong et al. (2019) y Lin et al. (2018), que utilizó una profundidad de agua de 8 a 16 cm, la cual va depender de la altura de ola objetivo. En nuestro caso, se buscó generar olas de aproximadamente 5 cm, por eso se eligió  $h=10$  cm. Además, los análisis realizados en el laboratorio, junto con las pruebas preliminares, confirmaron que esta profundidad permitiría obtener resultados óptimos para la generación y medición de los solitones.

**Tabla 2**

*Parámetros Experimentales Generales*

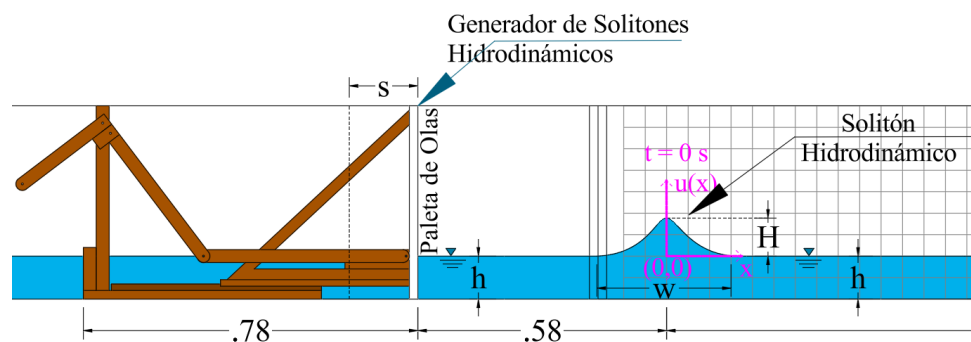
Casos Experimentales	Profundidad del agua	Amplitud de Ola objetivo	Tipo de Fondo del Canal	Pendiente
N°	$h$ (cm)	$H$ (cm)		$S$ (%)
1	10	5	Liso	0.00
2	10	5	Grava	0.00
3	10	5	Arena	0.00
4	10	5	Liso con Pendiente	5%

*Nota:* Condiciones Experimentales según el tipo de Geometría del fondo de la base del canal.

Para realizar los experimentos se tendrá para los 4 casos  $h=10$  cm, para la cual se tendrá una zona de medición con una longitud de 2.18 m, dada desde el origen de coordenadas, ubicada a 0.58 m del desplazamiento horizontal de la paleta de olas (S).

**Figura 58**

*Parámetros experimentales en el canal hidráulico*



*Nota:* Condiciones experimentales de ensayo;  $h = 10$  cm es la profundidad de agua en reposo,  $H$  es la amplitud máxima alcanzada por el solitón hidrodinámico y  $W$  su ancho. El origen de coordenadas está ubicada a 58 cm del desplazamiento horizontal de la paleta de olas ( $S = 16$  cm)

La tabla 3 muestra las dimensiones y características principales de la estructura de fondo para cada caso experimental. Para el primer caso, con fondo liso, se considera una longitud de 2.18 m (Longitud de recorrido del solitón hidrodinámico en fondo liso). En el segundo caso, con fondo de grava, se ubica una estructura de altura de 6 cm con una longitud de 1.25 m (Longitud de recorrido del solitón hidrodinámico con fondo de grava). En el caso con fondo de arena, se tiene a una altura de 5 cm distribuidos de manera uniforme en una longitud de 0.76 m. Finalmente, para el caso experimental 4, con fondo liso y pendiente  $S=5\%$ , se considera una longitud de ese tipo de fondo de 1.51 m en el canal hidráulico.

**Tabla 3**

*Parámetros Experimentales del Fondo*

<b>Casos Experimentales</b>	<b>Tipo de Fondo del Canal</b>	<b>Longitud de Zona de tipo de fondo</b>	<b>Espesor de tipo de Fondo</b>
<b>N°</b>		<b><i>l</i> (m)</b>	<b><i>e</i> (cm)</b>
1	Liso	2.18	0
2	Grava	1.25	6
3	Arena	0.76	5
4	Liso con Pendiente $S=5\%$	1.51	2

*Nota:* Condiciones experimentales sobre la geometría de fondo en la zona de recorrido del solitón hidrodinámico.

### 3.7. Procedimiento Experimental con modulo generador tipo pistón

#### 3.7.1. Instalación del Generador de Ondas Solitón

##### a) Configuraciones y procedimiento previos

- Primero, se procedió a retirar los pernos de fijación del vidrio, las cuales son los soportes al canal hidráulico (4 pernos). Estos se retiran solo de la zona donde se va a colocar el sistema de generador de solitones hidrodinámicos tipo pistón o empuje.
- Luego, se procedió a colocar el tapón en el extremo derecho del canal para evitar que el agua retorne hacia el depósito de agua.
- Posteriormente, se encendió el canal y se configuró, en el panel de control (PLC), un caudal de bombeo de  $20 \text{ m}^3/\text{h}$  y una pendiente  $S=0.00 \%$ . Luego, se procede a encender la bomba con los parámetros previamente ingresados.
- Se esperó que el agua alcanzara un nivel  $h=10 \text{ cm}$  y procedemos a apagar la bomba desde el panel de control e inmediatamente cerramos de manera manual la válvula, para mantener el nivel requerido de  $h=10 \text{ cm}$ .

**b) Instalación de Sistema de Generador de Solitones Hidrodinámicos y colocación del Disipador de Olas en el Canal Hidráulico.**

- Se verificó que los pernos de fijación estuvieran retirados de la zona destinada para la colocación del generador de solitones hidrodinámicos tipo pistón o empuje. Una vez colocado el generador, se vuelve a asegurar con los pernos.
- A continuación, se instaló el generador de solitones hidrodinámicos dentro del canal hidráulico, fijándolo con un perno en la base del canal para aumentar su estabilidad.
- Se verificó el correcto funcionamiento del sistema y se añadió un colorante especial al agua para darle un tono verdoso.
- Finalmente, se colocó dentro del canal el disipador de olas a una distancia de 5.70 m. Esto se realizó con el fin de evitar la reflexión de las ondas solitarias y estabilizar rápidamente el agua después de cada ensayo.

**3.7.2. Procedimiento de Ensayos**

Primero, se verificó el nivel de agua ( $h$ ) o la profundidad de agua en reposo, según la condición experimental del ensayo, que es  $h=10$  cm, y se esperó la estabilización de esta.

Se colocó una marca de desplazamiento horizontal de la paleta de olas ( $S$ ) para tener un movimiento controlado. Este desplazamiento depende de la amplitud del solitón ( $H$ ) que se deseó generar y de la profundidad de agua en reposo ( $h$ ).

Para generar los Solitones Hidrodinámicos, el generador de olas cuenta con una paleta de olas la cual se mueve de manera horizontal con un desplazamiento horizontal ( $S$ ). De acuerdo con Jeong et al. (2019) está dada por la siguiente ecuación;

$$S = \sqrt{\frac{16Hh}{3}} \quad (26)$$

donde,  $S$  = desplazamiento horizontal de la paleta de olas (cm);  $H$  = amplitud de onda (cm);  $h$  = profundidad de agua en reposo (cm).

De acuerdo con la condición experimental de ensayo, se procedió a generar los solitones hidrodinámicos para un solitón con una amplitud objetivo de aproximadamente

$H=5\text{cm}$  y  $h=10\text{ cm}$ . Usando la Ec. (22), el desplazamiento horizontal que se debe hacer con la paleta es de:

$$S = \sqrt{\frac{16 (5)(10)}{3}} \quad S = 16.33 \text{ cm}$$

Por lo tanto, se realizó un desplazamiento con la paleta en dirección horizontal dentro del rango de 16 a 16.33 cm para generar los solitones hidrodinámicos.

Por cada ensayo se utilizó una cámara profesional Full HD grabado a 60 FPS.

El proceso para generar las ondas solitarias es:

1. Inicio de grabación del video experimental con cámara Profesional a 60 FPS.
2. Luego, se procede a ejercer una fuerza sobre la manija del generador para que, mediante los brazos mecánicos, se genere un empuje y el desplazamiento horizontal de la paleta hasta una distancia  $S$  de aproximadamente 16 cm.
3. Luego de terminar el ensayo, se procede a finalizar y guardar el video.
4. De esta manera, se logró generar el solitón hidrodinámico. Este mismo proceso se repite para cada uno de los ensayos.

Posteriormente, se realizó el procesamiento de los videos experimentales para la obtención de los fotogramas.

### 3.8. Procesamiento de datos experimentales

Se realizó los ensayos experimentales y se guardaron los videos con una codificación de acuerdo a la tabla:

**Tabla 4**

*Parámetros Experimentales del Fondo*

<b>Código de Ensayo</b>	<b>Descripción</b>
E"n" _L	Ensayo "n" con Fondo Liso
E"n" _G	Ensayo "n" con Fondo Grava
E"n" _A	Ensayo "n" con Fondo Arena
E"n" _LP	Ensayo "n" con Fondo Liso con Pendiente

*Nota.* Condiciones Experimentales sobre la geometría de Fondo en la zona de recorrido del solitón hidrodinámico. Donde “n” representa el número de ensayo por cada caso.

En total se realizaron 60 ensayos y por cada caso experimenta 15 ensayos de acuerdo a la siguiente tabla y de esos 15 se tomó una muestra de 5 ensayos para el análisis detallado de los fotogramas del ensayo.

**Tabla 5***Numero de ensayos por cada caso experimental*

<b>Experimentos</b>	<b>N° de Ensayos</b>	<b>Descripción</b>
EXP_01_L	15	Ensayos con Fondo Liso
EXP_02_G	15	Ensayos con Fondo de Grava
EXP_03_A	15	Ensayos con Fondo de Arena
EXP_04_LP	15	Ensayos con Fondo Liso con Pendiente

*Nota:* Número de ensayos según la variabilidad de los fondos. Donde EXP\_01\_L significa Experimento caso 01 de fondo liso y respectivamente con las demás codificaciones.

Una vez que se obtuvo los datos experimentales, como son los videos en bruto.

### **3.8.1. Recorte de videos y extracción de fotogramas**

Primero, se realizó recortes de videos para extraer los fotogramas de interés del recorrido del solitón. Los recortes de video se realizaron a 4 s; por lo tanto, por cada video, dado que se grabó a 60 FPS, se obtuvieron un total de 240 fotogramas por video recortado.

Para el recorte de los videos y extracción de los fotogramas, se utilizó un código en Python, la cual se ejecutó a través del terminal de Windows. Estos códigos se adjuntan en los anexos 2 y 3.

### **3.8.2. Selección de fotogramas o frames**

Primero, se selecciona el fotograma de la coordenada de origen (0,0) y del tiempo  $t=0$  s para establecer nuestras coordenadas de referencia. De acuerdo a la tabla 6, por ejemplo, el fotograma 102 corresponde al tiempo  $t=0$  s y a la coordenada  $x=0$  cm.

Luego, para la selección de fotogramas por ensayo, se seleccionó de acuerdo al tiempo de análisis, como se puede apreciar en la tabla. El análisis para el ensayo E01 con fondo Liso se hizo a cada 0.30 s, por lo tanto, el fotograma N° 120 corresponde al  $t=0.30$  s y eso se calculó de acuerdo a la siguiente formula:

$$t_{(s)} = \text{Número de Fotograma} \times \left( \frac{1 \text{ segundo}}{60 \text{ Fotogramas}} \right) \quad (27)$$

El tiempo para el fotograma N° 120 se obtiene de la siguiente forma,

$$t_{(s)} = (120 - 102) \text{ Fotogramas} \times \left( \frac{1 \text{ segundo}}{60 \text{ Fotogramas}} \right)$$

$$t_{(s)} = 0.30 \text{ s}$$

Entonces el fotograma N°120 le corresponde al  $t=0.30$  s.

Este mismo proceso se realiza para los siguientes tiempos como se puede apreciar en la tabla 6. Para el caso de fondo liso se analizaron 5 tiempos, mientras que para el fondo de grava, arena y liso con pendiente se analizaron 6 tiempos.

**Tabla 6**

*Selección de Frames por cada ensayo*

<b>E01_L</b>		
<b>Tiempos</b>	<b>N° Frame</b>	<b>t (s)</b>
t inicial	102	0.00
t1	120	0.30
t2	138	0.60
t3	156	0.90
t4	174	1.20
t5	192	1.50
t final	211	1.82

*Nota:* Frames correspondientes de acuerdo al tiempo de análisis, en este caso 5 tiempos para el ensayo 01 con fondo liso.

De manera similar, para el ensayo E02\_L que se muestra en la tabla 7 con fondo liso, se toma el fotograma de coordenadas origen y  $t=0$  s, y a partir de este punto, se selecciona los fotogramas en los tiempos de interés. Este mismo proceso se realiza para los 4 casos.

**Tabla 7**

*Selección de Frames por cada ensayo*

<b>E02_L</b>		
<b>Tiempos</b>	<b>N° Frame</b>	<b>t (s)</b>
t inicial	81	0.00
t1	99	0.30
t2	117	0.60
t3	135	0.90
t4	153	1.20
t5	171	1.50
t final	192	1.85

*Nota:* Frames correspondientes de acuerdo al tiempo de análisis, en este caso 5 tiempos sin contar el t inicial y el t final para el ensayo 02 con fondo liso.

### **3.8.3. Extracción de puntos con Image J.**

Image J es un programa Java de procesamiento y análisis de imágenes, desarrollado en los Institutos Nacionales de Salud y el Laboratorio de Instrumentación Óptica y

Computacional (LOCI, Universidad de Wisconsin), y es de dominio público. Entre sus funciones principales se tiene.

El software permite mostrar, editar, analizar, procesar, guardar e imprimir imágenes en formatos de 8, 16 y 32 bits. Es compatible con una amplia variedad de formatos de imagen, incluyendo TIFF, GIF, JPEG, BMP, DICOM, FITS y 'raw'. Además, puede calcular estadísticas de área y valores de píxeles en selecciones definidas por el usuario, medir distancias y ángulos, y generar histogramas de densidad y gráficos de perfil de línea (Ferreira & Rasband, 2012).

También realiza transformaciones geométricas como escalado, rotación y volteo, y permite ampliar la imagen hasta 32:1 o reducirla hasta 1:32. Todas las funciones de análisis y procesamiento están disponibles en cualquier nivel de aumento y la calibración espacial está disponible para proporcionar mediciones dimensionales en unidades del mundo real, como milímetros, y también se puede calibrar la densidad o la escala de grises (Ferreira & Rasband, 2012).

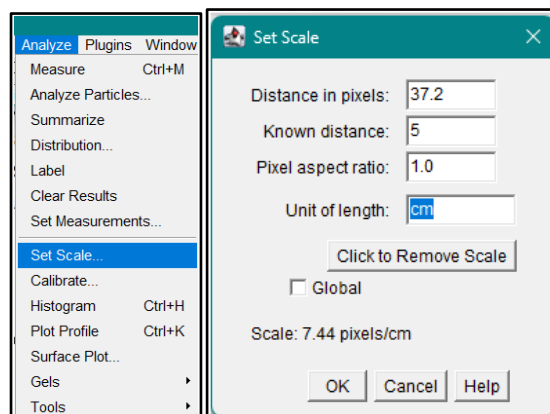
### **Procedimiento de extracción de puntos con Image J:**

El procedimiento que se siguió para extraer los puntos del perfil del solitón hidrodinámico es lo siguiente:

Primero, se abrió la imagen con Image J se procedió a escalar la imagen con la opción de "Set Scale", mediante una línea de referencia para lo cual se utilizó las grillas graduadas del canal, por lo cual se dibujó una línea en la cuadrícula de 5 cm, para nuestros ensayos se escaló con 37.2 píxeles igual 5 cm por lo tanto 1 cm equivale a 7.44 píxeles, (ver figura 59).

### **Figura 59**

*Escalamiento de Imagen con Image J*

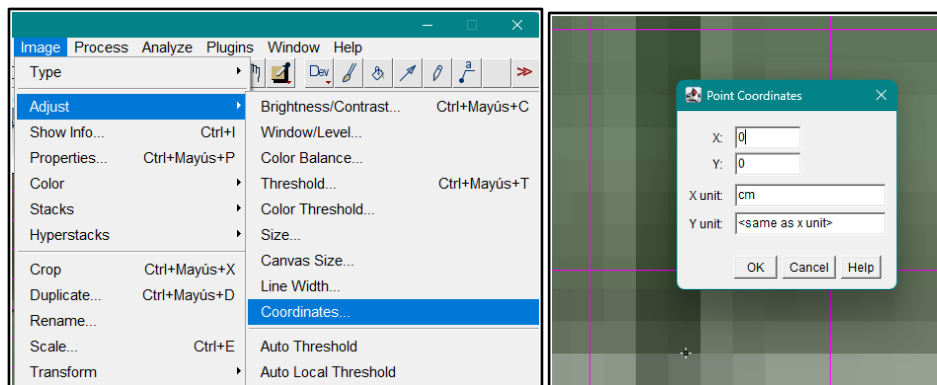


*Nota:* Escalamiento de Imagen en Image J con la opción de Analyze – Set Scale

Luego una vez escalado la imagen, se definió las coordenadas (0, 0) mediante un punto con la opción Image – Adjust – Coordinates, configurando x=0 y en y=0. Se insertó un punto en la zona de origen de coordenadas en la imagen y se le asignó el valor origen (0,0) (ver figura 60).

**Figura 60**

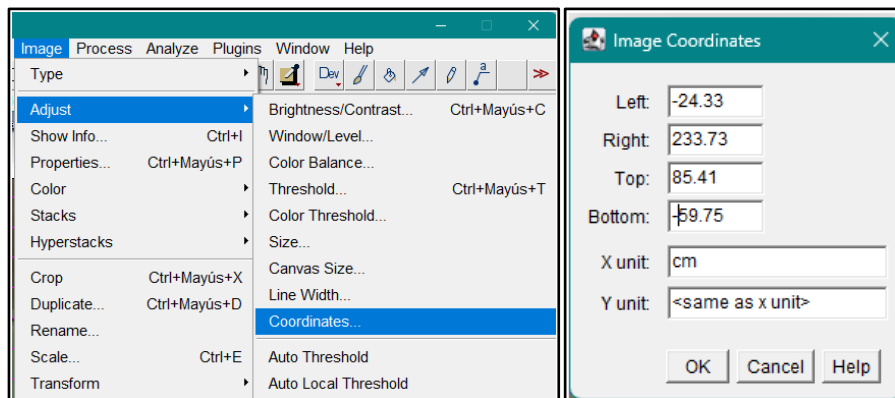
*Asignación de coordenadas de origen*



*Nota:* Asignación de coordenada x=0 y y=0. Image J

**Figura 61**

*Corrección de dirección del eje y*



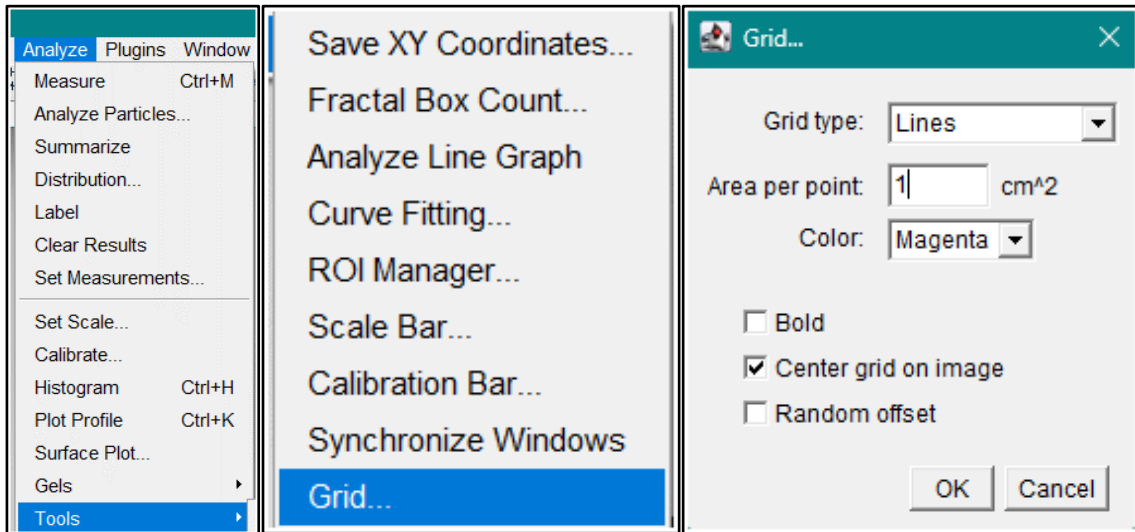
*Nota:* Corrección de dirección del eje “y”.

Posteriormente, dado que Image J, por defecto, toma el eje “y” positivo por debajo del punto de origen, se procedió a cambiar esa dirección. Primero, se eliminó el punto de origen e ingresamos nuevamente a la misma ruta, de acuerdo a la figura 61. En este paso, se eliminó el signo negativo en la opción top y ponemos el negativo en la opción bottom.

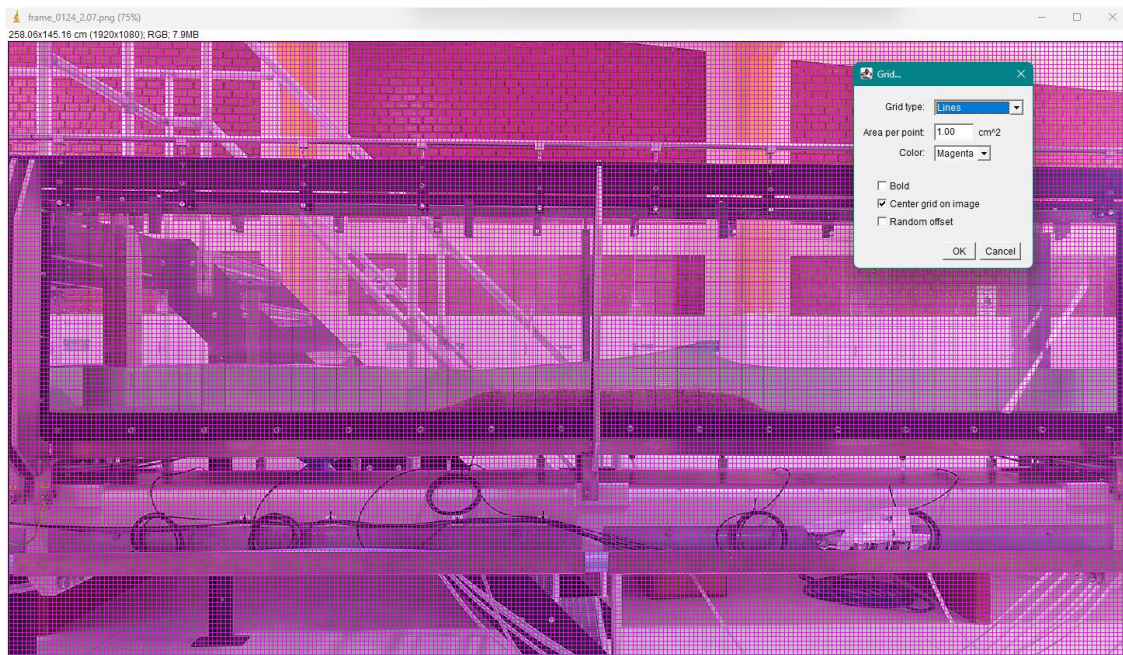
Luego, se insertaron las grillas de Image J a cada 1 cm, esto se realizó con el fin de insertar los puntos a este intervalo, siguiendo el siguiente procedimiento de la figura 62.

**Figura 62**

*Insertado de grillas a la imagen*



(a)



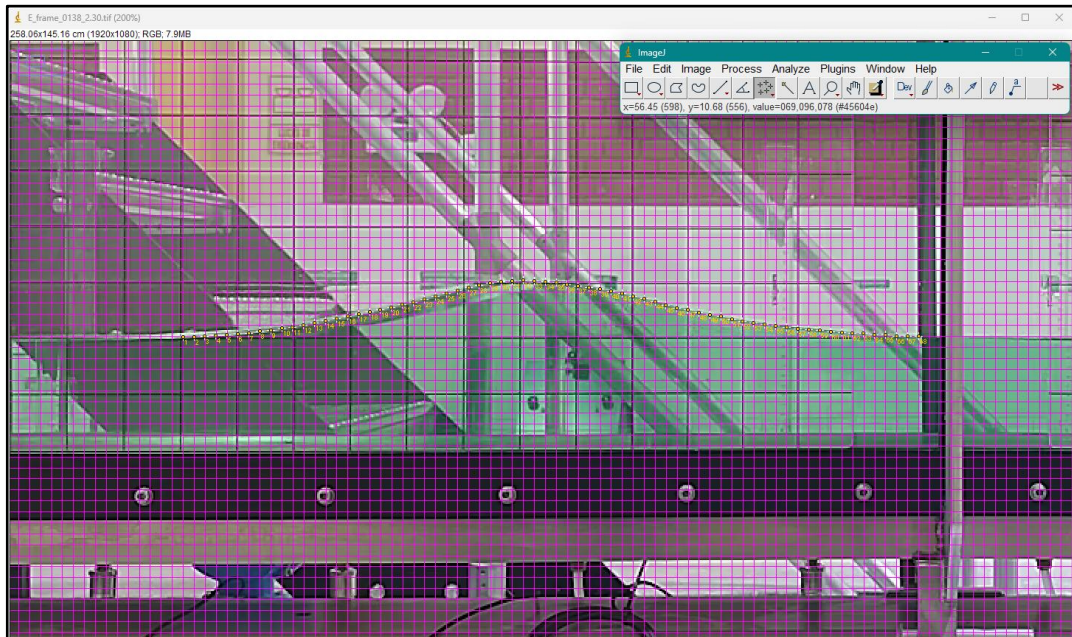
(b)

*Nota:* (a) Procedimiento de insertado de grillas de 1cm x 1cm en la imagen, (b) imagen con grillas.

Una vez realizado este proceso, se procedió a insertar los puntos en el contorno del perfil del solitón hidrodinámico, a intervalos de 1 cm, de manera ordenada (ver figura 63).

**Figura 63**

*Insertado de puntos en el borde del perfil del solitón hidrodinámico*

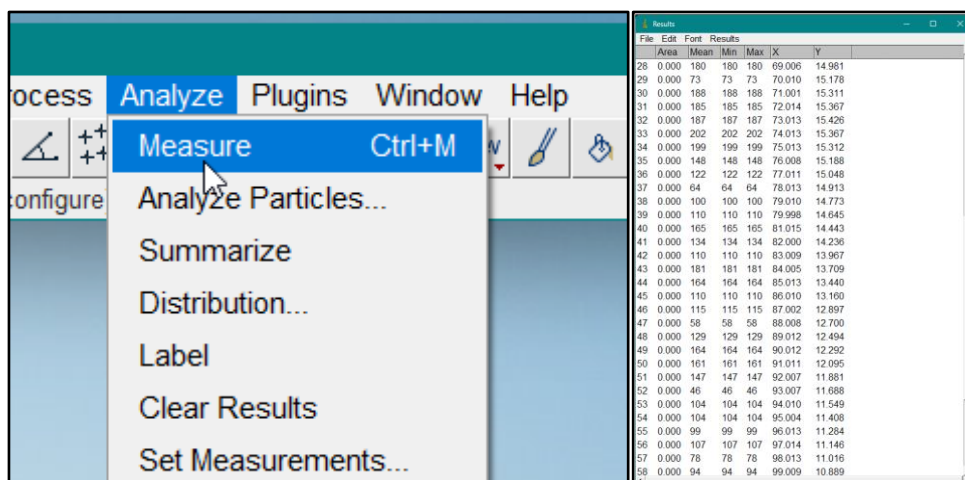


*Nota:* Insertado de Puntos en el perfil experimental del solitón hidrodinámico de color naranja con la ayuda de las grillas a cada 1 cm (color morado).

Una vez realizado el insertado de los puntos necesarios para definir el perfil experimental del solitón hidrodinámico, se procedió a importar las coordenadas de esos puntos con la opción *Analyze - Measure* y guardarlo en formato csv para obtener las coordenadas.

**Figura 64**

*Exportación de puntos del image J a formato Csv*



*Nota:* Se extrajeron los puntos con la opción *measure* en formato csv por defecto.

De esta manera, se obtuvieron las coordenadas de los puntos que definían el perfil del solitón hidrodinámico. El procedimiento fue el mismo para todos los fotogramas analizados. En total se procesaron 115 fotogramas obteniéndose más de 9200 puntos.

### **3.9. Aspectos éticos y regulatorios.**

La presente investigación se llevó a cabo bajo un firme compromiso moral, guiado por principios éticos fundamentales como el respeto, la honestidad, la integridad y la humildad. Se actuó con plena conciencia de que los resultados y el contenido de este estudio tienen un propósito social y buscan beneficiar a una comunidad. Por ello, la información presentada es veraz y responsable, reflejándose en las conclusiones alcanzadas como fruto del rigor y la transparencia durante todo el proceso.

El desarrollo del estudio se basó en experimentos realizados en el Laboratorio de Hidráulica de la UNAT, complementados con una exhaustiva recopilación de información proveniente de investigaciones previas relacionadas. Todas las fuentes utilizadas fueron debidamente reconocidas y destacadas, en estricto cumplimiento de los estándares académicos, lo cual se puede verificar en la sección de bibliografía.

Además, se garantizaron el respeto y cumplimiento de las normativas éticas establecidas tanto por la universidad como por instituciones como el Concytec, alineándose a las directrices específicas del área de investigación de la UNAT.

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Efecto de las geometrías de fondo en el solitón hidrodinámico

Una vez procesados los fotogramas con ImageJ y obtenidos todos los puntos necesarios para definir el perfil del solitón, se realizó el análisis correspondiente y se generó la gráfica del perfil experimental. Esta fue comparada con la gráfica del perfil teórico del solitón en un fondo liso horizontal.

Para la comparación con la solución analítica del solitón hidrodinámico en fondo liso horizontal, dado por Morales (2008), Niu et al. (2022) , Ghafari et al. (2021) y Lin et al. (2018), según la Ec. 24 es,

$$u(x, t) = H \operatorname{sech}^2 \left[ \sqrt{\frac{3H}{4h^3}} (x - ct) \right]$$

en donde,  $H$  es la amplitud máxima del solitón hidrodinámico (cm),  $h$  la profundidad de agua en reposo (cm),  $x$  es la posición del solitón hidrodinámico (cm),  $c$  la velocidad teórica de la onda (cm/s),  $t$  es el tiempo (s) y  $W$  el ancho de onda (cm).

El único dato de entrada en esta ecuación es la amplitud de la onda ( $H$ ), que se obtiene a partir de los datos del perfil experimental correspondiente a la amplitud máxima.

Además, la velocidad teórica según la Ec. 25, está dada por;

$$c = \sqrt{g(h + H)}$$

en donde  $g$  es la aceleración de la gravedad, cuyo valor es  $9.81 \text{ m/s}^2$  o  $981 \text{ cm/s}^2$

La velocidad experimental  $C_e$  se calculó con la distancia de recorrido de un punto a otro punto del solitón, sobre el tiempo de recorrido en ese tramo.

#### 4.1.1. Fondo liso

De acuerdo al caso experimental 01 que concierne a los ensayos realizados en un canal rectangular de 30.9 cm de ancho y una altura de 45 cm con paredes de vidrio templado, con una pendiente  $S= 0.00 \%$  y con una profundidad de agua en reposo  $h=10$  cm.

En la Figura 65 se observa la evolución temporal del solitón hidrodinámico en cinco instantes diferentes dentro de un canal con fondo liso horizontal. La línea continua azul representa el perfil de la solución analítica para un fondo liso horizontal (Ecuación KdV), mientras que los círculos vacíos en color rosado corresponden a los puntos obtenidos experimentalmente, según los ensayos realizados en el canal hidráulico. Se aprecia una notable concordancia entre el perfil experimental y la curva de la solución analítica, evidenciando una aproximación bastante confiable, con una desviación estándar máxima registrada de 0.24.

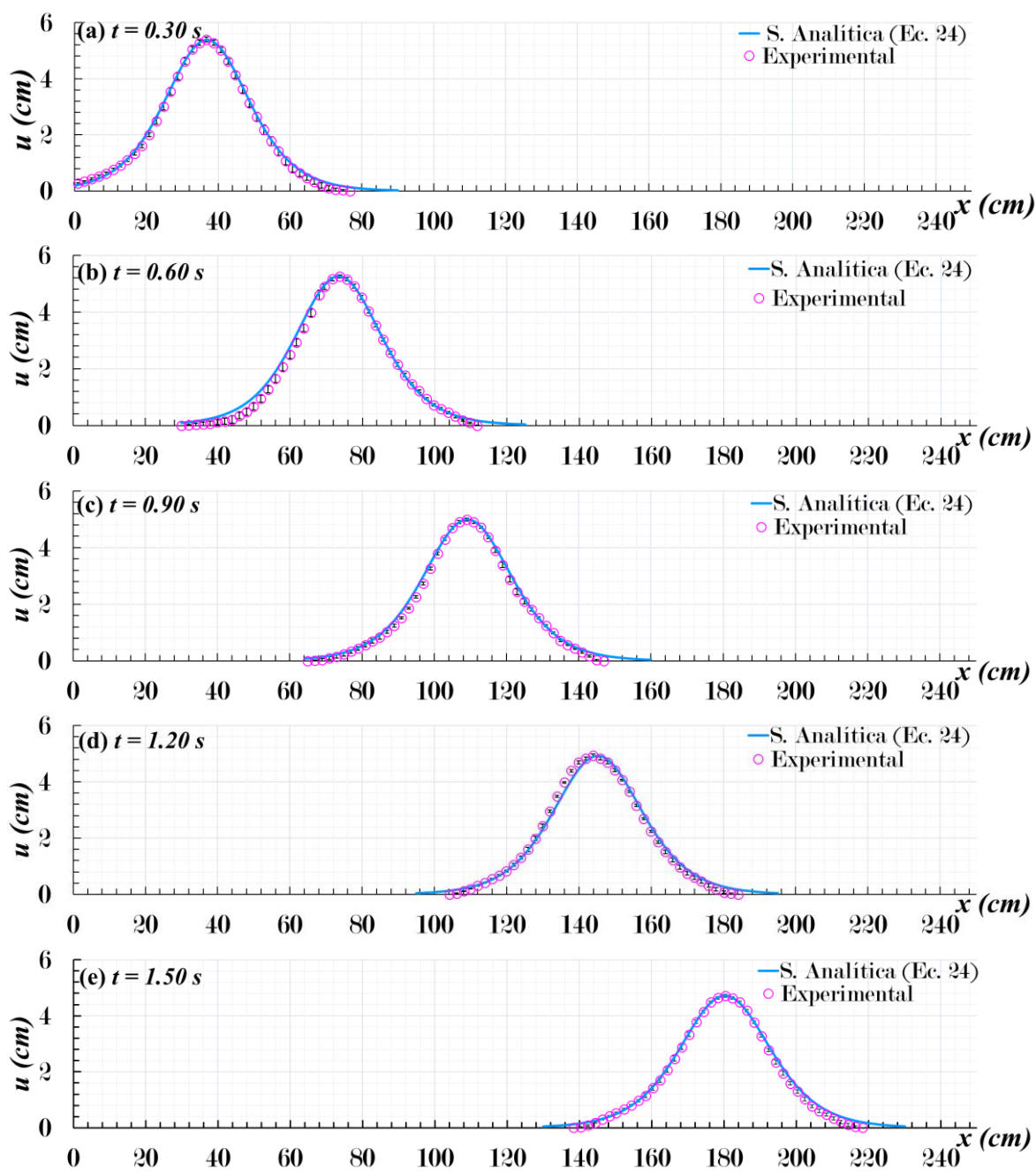
En la figura 65 (a), correspondiente a  $t = 0.30$  s, se puede apreciar que, en las zonas de la cola derecha e izquierda del perfil de la onda solitaria, las diferencias entre la solución analítica y el perfil experimental son mínimas. Sin embargo, en general, el perfil de la solución analítica de la ecuación de Korteweg y de Vries (KdV) muestra una excelente concordancia con el perfil experimental de los solitones hidrodinámicos.

Por otro lado, en la figura 66 se muestra la evolución temporal experimental del solitón, tomadas en el canal hidráulico del laboratorio de la EPIC – UNAT. El perfil experimental del solitón es claramente visible gracias a una coloración verdosa aplicada con colorante alimentario especial, lo que facilita el análisis y la visualización. En los cinco instantes de tiempo analizados, se aprecia que el perfil experimental conserva la forma típica de un solitón hidrodinámico.

Además, es importante mencionar que el perfil experimental y teórico comparan muy bien, manteniendo su forma en los 5 instantes de tiempo analizados. Asimismo, el generador tipo empuje para la generación de solitones funciona adecuadamente durante los ensayos, teniendo la mayoría de los parámetros controlados. El único solo el factor variable fue el empuje manual, pero este error se minimizó con el cálculo del desplazamiento de la paleta ( $S$ ), el cual se determinó como  $S=16$  cm. Este valor permitió definir el límite del desplazamiento de la paleta, logrando así un mayor control sobre el proceso de generación.

**Figura 65**

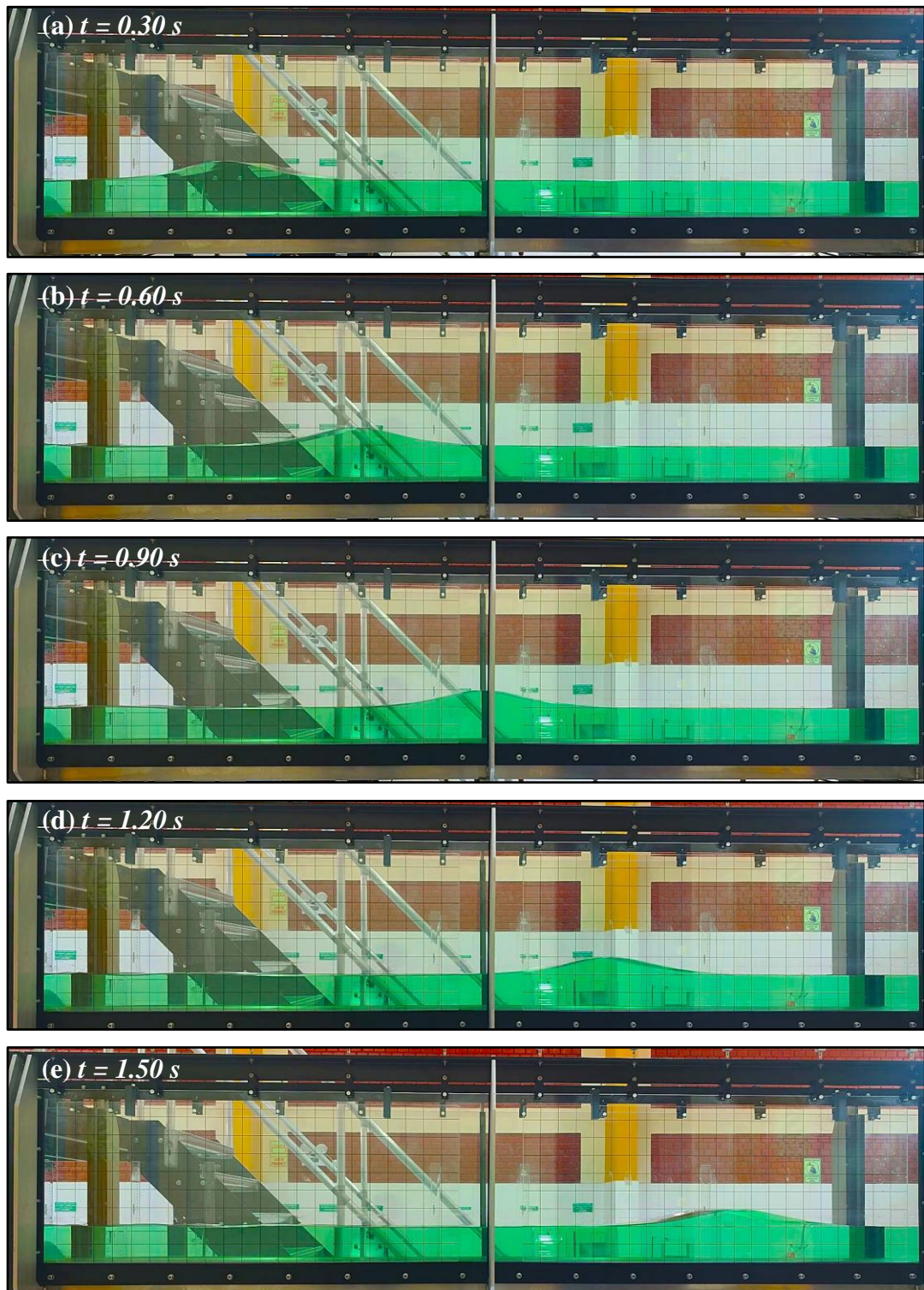
*Evolución temporal experimental del solitón en canal con fondo liso horizontal*



*Nota.* Evolución temporal de un solitón hidrodinámico unidireccional. Se muestra diferentes instantes de tiempo observados: (a)  $t = 0.30$  s, (b)  $t = 0.60$  s, (c)  $t = 0.90$  s, (d)  $t = 1.20$  s, y (e)  $t = 1.50$  s. La línea continua en azul representa el perfil de la Solución Analítica KdV (Ec. 24) y los círculos de color rosado representa los puntos del perfil experimental con fondo liso horizontal. Las barras de error verticales se muestran de color negro.

**Figura 66**

*Evolución temporal experimental del solitón en canal con fondo liso*



*Nota.* Evolución temporal de un solitón hidrodinámico unidireccional. Se muestra los fotogramas en diferentes instantes de tiempo observados en el laboratorio de hidráulica: (a)  $t = 0.30\text{ s}$ , (b)  $t = 0.60\text{ s}$ , (c)  $t = 0.90\text{ s}$ , (d)  $t = 1.20\text{ s}$  y (e)  $t = 1.50\text{ s}$ .

En la tabla 8 se muestra los resultados obtenidos de 5 ensayos para cada instante de tiempo  $t$ , donde  $t$  es el tiempo de análisis,  $x$  la posición del solitón hidrodinámico,  $H$  es la amplitud media experimental y  $Ce$  la velocidad media experimental del solitón y por último,  $W$  es el ancho del solitón hidrodinámico.

**Tabla 8**

*Resultados de solitón hidrodinámico en fondo liso*

$t$ (s)	Fondo Liso			
	$x$ (cm)	$H$ (cm)	$Ce$ (cm/s)	$W$ (cm)
0.30	36.73	5.39	122.43	81.51
0.60	73.73	5.25	122.89	82.60
0.90	108.94	4.99	121.04	83.80
1.20	143.93	4.93	119.94	80.01
1.50	180.33	4.72	120.22	80.00
<b>Media</b>		<b>5.06</b>	<b>121.30</b>	<b>81.58</b>
<b>Desv. Estandar</b>		<b>0.27</b>	<b>1.31</b>	<b>1.65</b>

*Nota:* La tabla muestra los resultados obtenidos de la Amplitud ( $H$ ), velocidad experimental ( $Ce$ ) y el Ancho ( $W$ ) del Solitón Hidrodinámico para fondo liso. Elaboración propia

La amplitud media experimental ( $H$ ) del solitón hidrodinámico en el canal rectangular con fondo liso horizontal es de 5.06 cm con una desviación estándar de 0.27.

En cuanto a la velocidad media experimental ( $Ce$ ) del solitón hidrodinámico en el canal rectangular con fondo liso horizontal es de 121.30 cm/s y la velocidad teórica ( $c$ ) es de 121.53 cm /s calculada con la Ec. 25. Esto resulta en un desfase de 0.23 cm/s y un error del 0.19% entre  $Ce$  y  $c$ .

Finalmente, el ancho promedio experimental ( $W$ ) es de 81.58 cm con una desviación estándar de 1.31.

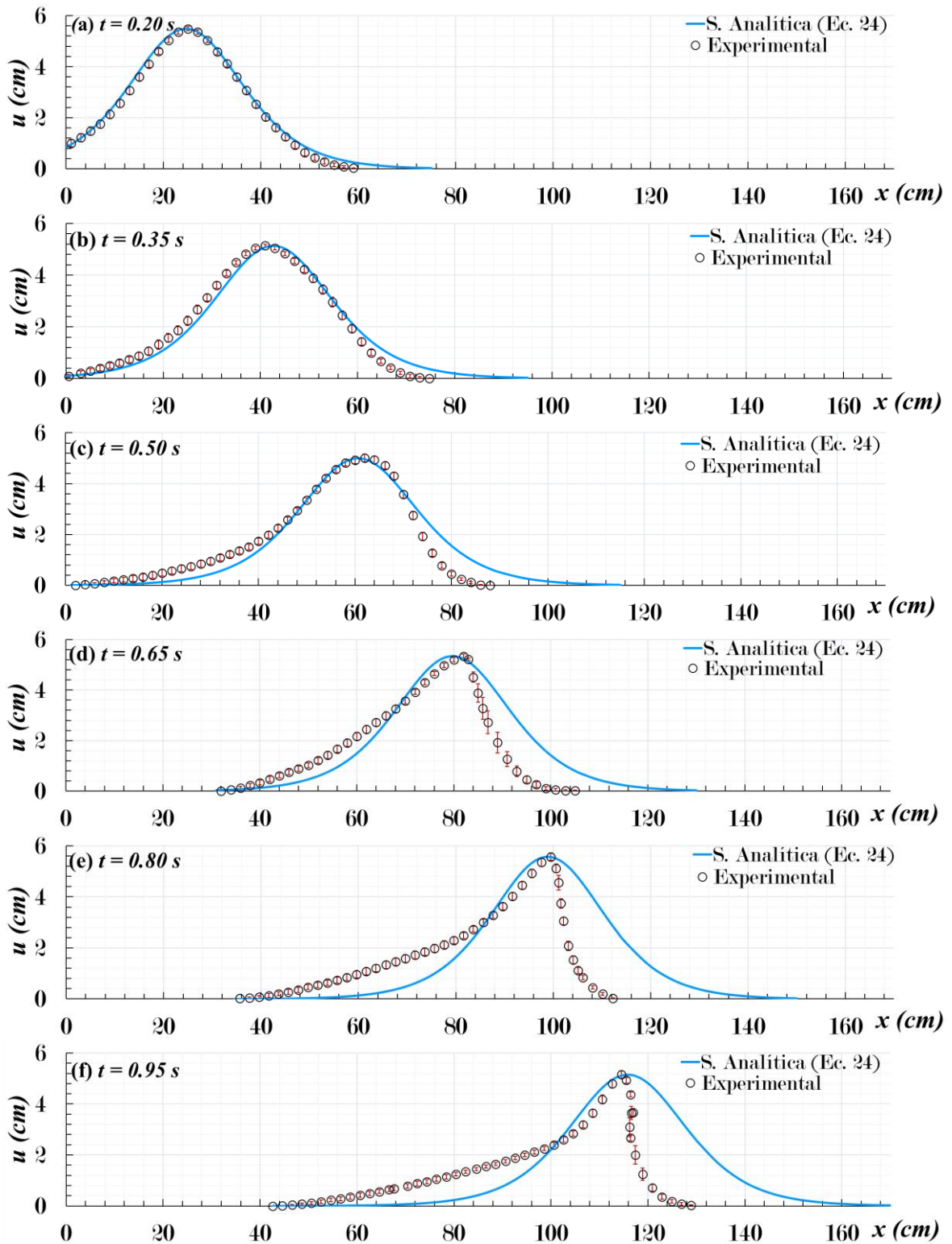
#### **4.1.2. Fondo de Grava**

De acuerdo al caso experimental 2 que concierne a los ensayos realizados en un canal rectangular de 30.9 cm de ancho y una altura de 45 cm con paredes de vidrio templado, con una pendiente  $S= 0.00 \%$  y con una profundidad de agua en reposo  $h=10$  cm.

En la figura 67 se aprecia la evolución temporal del solitón hidrodinámico en un canal rectangular con fondo de grava, comparada con la solución analítica de fondo liso horizontal. La solución analítica está representada por la línea continua azul, mientras que los puntos del perfil experimental con fondo de grava están indicados por círculos vacíos de color negro. En la figura  $u(x)$  representa la elevación del perfil en la posición  $x$ , en cm.

**Figura 67**

*Evolución temporal experimental del solitón en canal de fondo de grava horizontal*



*Nota.* Evolución temporal de un solitón hidrodinámico unidireccional en un canal rectangular. Se muestra diferentes instantes de tiempo observados: (a)  $t=0.20$  s, (b)  $t=0.35$  s, (c)  $t=0.50$  s, (d)  $t=0.65$  s, (e)  $t=0.80$  s, y (f)  $t=0.95$  s. La línea continua en azul representa el perfil de la Solución Analítica KdV (Ec. 24) y los círculos de color negro son los puntos del perfil experimental de fondo de grava.

En la figura 67 de manera general se puede apreciar la evolución del solitón. Al inicio, el solitón se encuentra en una zona sin fondo de grava, luego ingresa a una zona con fondo de grava, lo que provoca una perturbación en su forma debido al efecto de frenado, el cual se hace evidente. En el instante  $t=0.95$  s, se nota un curvamiento de la cresta, seguido posteriormente de la caída y rompimiento del solitón hidrodinámico. Para esta última fase se requiere equipos más especializados que puedan capturar mejor y con mayor precisión el fenómeno de rompimiento y las turbulencias generadas.

En el instante  $t=0.20$  s, la curva de la solución analítica para un fondo de grava se aproxima ligeramente al experimental, lo cual es lógico, ya que en ese momento y posición el solitón aún no ha ingresado a la zona con fondo de grava, ubicada a 34 cm del origen (0,0). Para este instante, la velocidad media experimental es de 125.03 cm/s, la amplitud media es de 5.49 cm y el ancho promedio es de 81.91 cm.

En el instante  $t=0.35$  s, se puede apreciar un ligero desfase en la forma de la onda experimental con respecto al perfil de la solución analítica de fondo liso horizontal. Además, se observa un efecto de retraso en la cola derecha de la onda, ya que el solitón ha ingresado a la zona con fondo de grava, ubicada a 34 cm del origen. Este cambio en el fondo provoca una modificación en la forma de la onda, lo que resulta en un ancho promedio de 80.50 cm.

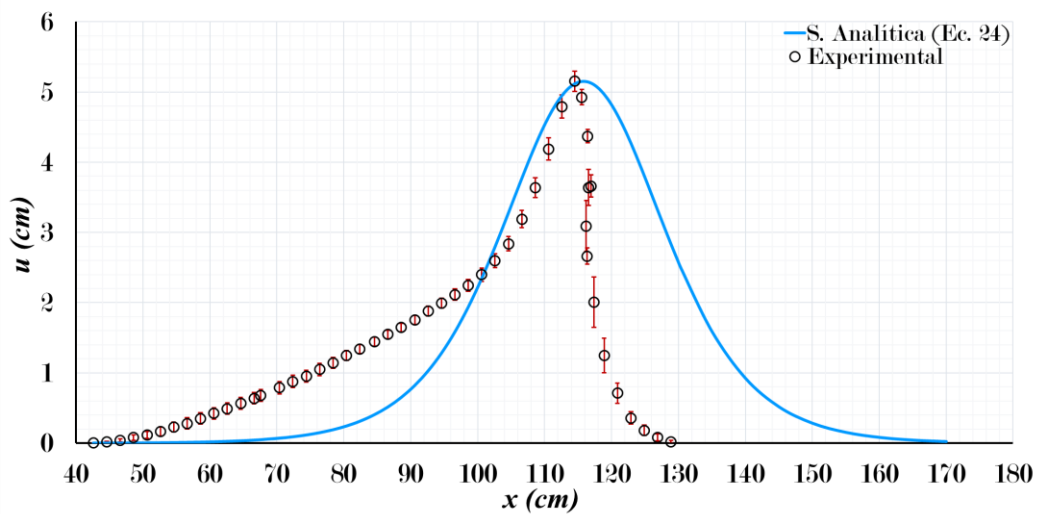
En el instante  $t=0.50$  s, la forma del solitón hidrodinámico muestra una perturbación significativa, generándose un alargamiento y ensanchamiento en el perfil de la cola izquierda, y una tendencia de empinado más vertical en la cola derecha. El alargamiento y ensanchamiento de la cola izquierda provoca un aumento considerable del ancho promedio del solitón hidrodinámico a 86.91 cm.

En el instante  $t=0.65$  s, el solitón hidrodinámico presenta una forma más ensanchada en la cola izquierda, mientras que la cola derecha sigue una tendencia más empinada. Además, se observa que la cresta comienza a curvarse mínimamente.

En el instante  $t=0.80$  s, el solitón hidrodinámico se encuentra completamente en la zona con fondo de grava. En este instante, el solitón alcanza su pico más alto a 99.51 cm del origen, con una amplitud media de 5.57 cm, con un ancho de 78.17 cm y una velocidad media experimental de 124.39 cm/s. Se aprecia un cambio en la forma del solitón, por ende, ya no se muestra una onda gaussiana bien definida, sino una onda más empinada, con la cola izquierda más alargada y ensanchada. También se puede observar una disminución en su velocidad media experimental, pasando de 125.03 cm/s a 124.39 cm/s.

## Figura 68

*Solitón Hidrodinámico en  $t=0.95$  s – Fondo Grava*



*Nota.* Solitón Hidrodinámico en un canal rectangular con fondo de Grava en un instante  $t=0.95$  s. La línea continua en azul representa el perfil de la Solución Analítica (KdV) de fondo liso horizontal y los círculos de color negro son los puntos del perfil experimental con barras de error de color rojo.

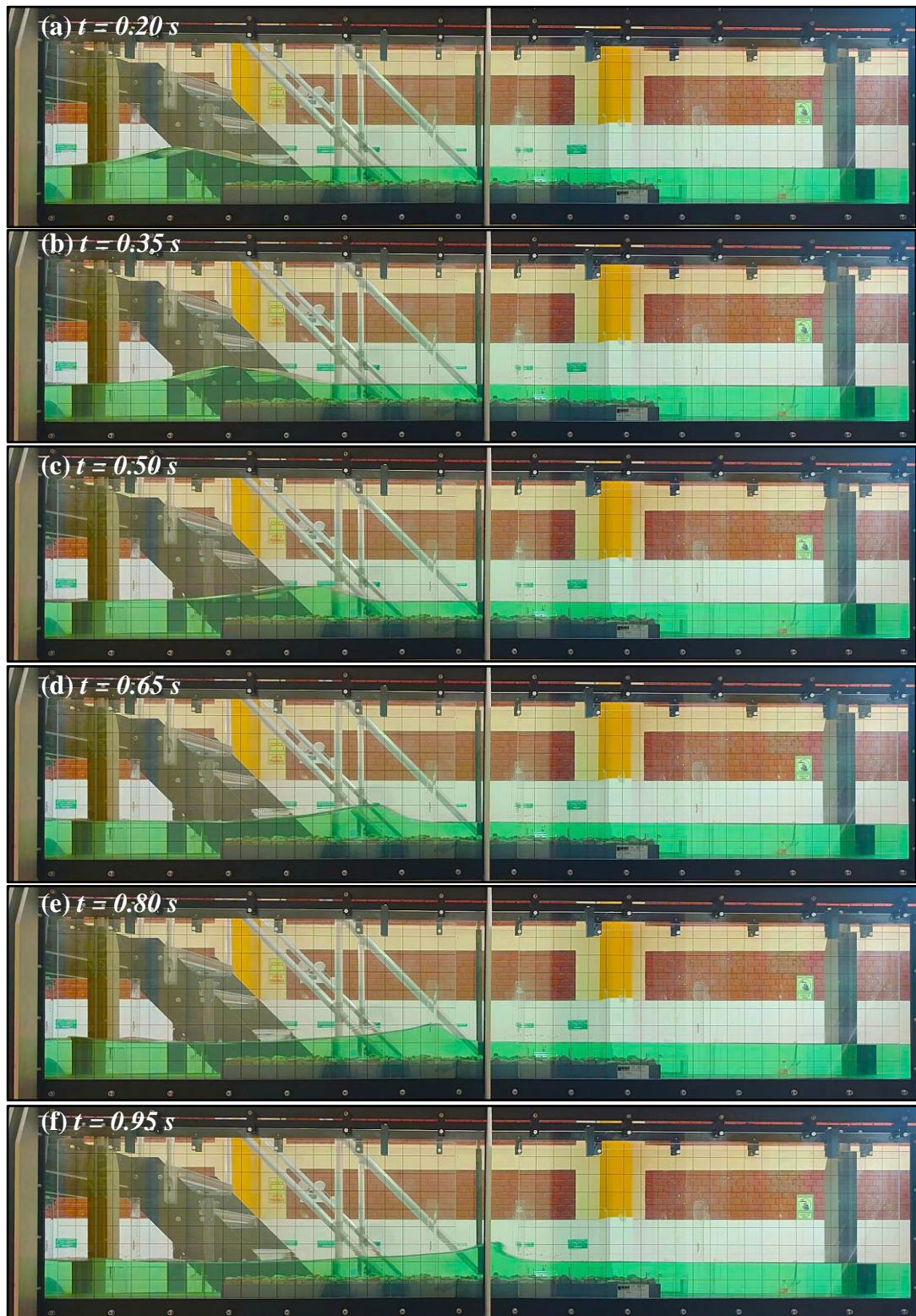
En la figura 68 se muestra el efecto que genera el fondo de grava al solitón hidrodinámico. A una distancia de 115 cm del origen, donde la onda se empuja fuertemente y, posteriormente, a romperse debido a la influencia del fondo. Este efecto provoca que la cola derecha del solitón se haga más pronunciada, con un alargamiento significativo en la cola izquierda. La deformación de la cola derecha e izquierda, tienen una tendencia más empujada y ensanchada respectivamente, lo que genera un aumento considerable del 7.18 % en el ancho de la onda, alcanzando los 87.79 cm. Este alargamiento generado en la cola izquierda, es una compensación a la pendiente más pronunciada de la cola derecha del solitón. A su vez, el aumento de la amplitud y la perturbación del fondo hace que la cresta se empuje y se curve más, lo que provoca la caída de la cresta debido a la acción de la gravedad, generándose así el rompimiento del solitón, como se observa en la figura 69f.

En este instante también se produjo el mayor efecto en la velocidad media experimental, que disminuye de 125.03 cm/s a 120.53 cm/s, que representa una reducción del 3.60%. Este descenso se debe al efecto de frenado causado por el fondo de grava, las perturbaciones generadas por la rugosidad del fondo, y la disminución de la altura  $h$  en la zona de fondo variable.

A continuación, en la figura 69 se muestra la evolución temporal del solitón, tomada en distintos tiempos, la cual se muestra con una coloración verdosa del fluido (agua).

**Figura 69**

*Evolución temporal del solitón en un canal con fondo de grava*



*Nota.* Evolución temporal de un solitón hidrodinámico unidireccional en un canal rectangular. Se muestran los fotogramas del solitón en diferentes instantes de tiempo observados: (a)  $t = 0.20$  s, (b)  $t = 0.35$  s (c)  $t = 0.50$  s (d)  $t = 0.65$  s, (e)  $t = 0.80$  s y (f)  $t = 0.95$  s.

De acuerdo a la tabla 9, para un fondo con grava, se observa que una amplitud media experimental de 5.28 cm y una amplitud máxima de 5.57 cm alcanzado en  $t=0.80$  s. Este incremento se debe a la perturbación generada por el fondo de grava del canal, lo que genera un cambio en la forma original del solitón. Como consecuencia, la cola derecha de la onda se vuelve más pronunciada y genera que la cresta se curve similar al de una ola empinada, alcanzando su pico más alto en ese instante.

En cuanto a la velocidad media experimental del solitón hidrodinámico en el canal con zona de fondo de grava es de 122.88 cm/s y la velocidad teórica es de 122.44 cm /s, presentando una variación de 0.44 cm/s entre la  $C_e$  y  $c$ . El ancho medio experimental ( $W$ ) del solitón es de 81.71 cm con una desviación estándar de 4.96, lo que refleja la variabilidad.

**Tabla 9**

*Resultados de solitón hidrodinámico en fondo de Grava*

$t$ (s)	Fondo Grava			
	$x$ (cm)	$H$ (cm)	$C_e$ (cm/s)	$W$ (cm)
0.20	25.01	5.49	125.03	81.91
0.35	41.01	5.14	117.16	80.50
0.50	62.01	5.01	124.03	86.91
0.65	82.01	5.34	126.17	75.00
0.80	99.51	5.57	124.39	78.17
0.95	114.51	5.15	120.53	87.79
<b>Media</b>		<b>5.28</b>	<b>122.88</b>	<b>81.71</b>
<b>Desv. Estandar</b>		<b>0.24</b>	<b>3.56</b>	<b>4.96</b>

*Nota:* La tabla muestra los resultados obtenidos de la Amplitud ( $H$ ), velocidad experimental ( $C_e$ ) y el Ancho ( $W$ ) del Solitón Hidrodinámico para el caso experimental de fondo de grava.

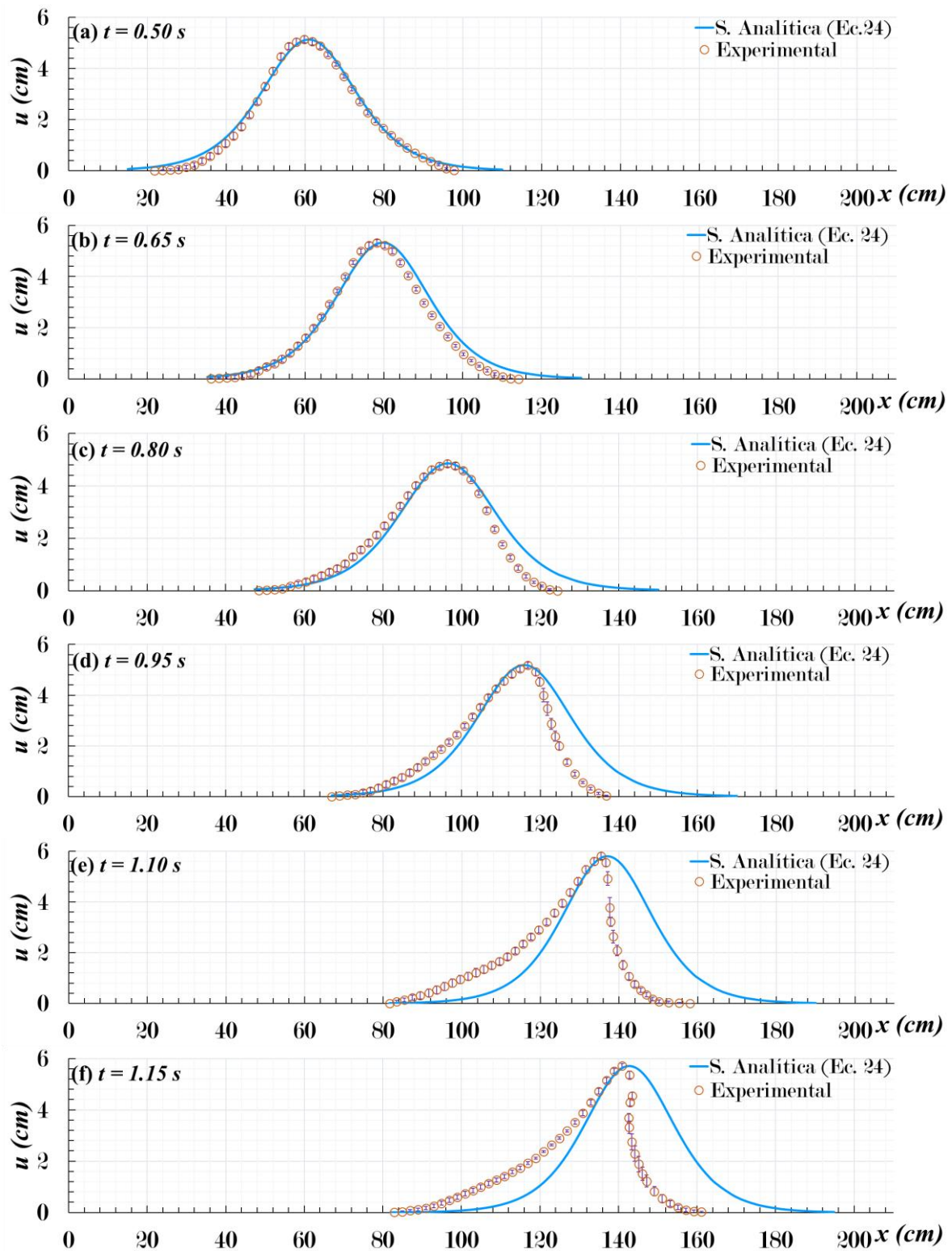
Hacemos mención que el cambio más significativo que se genera con la influencia del fondo de grava es el aumento de la amplitud, que alcanza un valor máximo de 5.57 cm en  $t = 0.8$  s, que representa un aumento del 8.54% con respecto al tiempo  $t = 0.3$  s. Además, la deformación de la cola derecha con una tendencia más ensanchada y la izquierda adopta una tendencia más empinada. Este cambio en la forma de la onda genera un desplazamiento del ancho de la onda hacia la izquierda, afectando la distribución de la onda en el espacio.

#### **4.1.3. Fondo de Arena**

En la figura 70 se muestran las gráficas de solitones hidrodinámicos en diferentes tiempos, comparadas con la solución analítica para un fondo liso horizontal. La línea continua de azul representa la solución analítica, los puntos del perfil experimental, correspondientes a un fondo de arena, están indicados por círculos vacíos de color naranja

**Figura 70**

*Evolución temporal experimental del solitón en canal de fondo de arena horizontal*



*Nota.* Evolución temporal de un solitón hidrodinámico unidireccional en un canal rectangular. Se muestra diferentes instantes de tiempo observados: (a)  $t = 0.50$  s, (b)  $t = 0.65$  s, (c)  $t = 0.80$  s, (d)  $t = 0.95$  s, (e)  $t = 1.10$  s y (f)  $t = 1.15$  s. La línea continua en azul denota el perfil de la Solución Analítica KdV (Ec. 24) y los círculos naranjas son los puntos del perfil experimental de fondo de arena.

En la figura 70a en el instante  $t=0.50$  s, los puntos del perfil experimental se aproximan a la solución analítica para un fondo liso horizontal. Esto concuerda, ya que, en esa posición la onda aún no ha ingresado completamente a la zona con fondo de arena.

En  $t = 0.65$  s el solitón se encuentra en la posición 78.17 cm. Como la zona de fondo con arena comienza a los 73 cm del origen de coordenadas, ya se puede apreciar un efecto inicial en la forma de la onda, específicamente en la zona de la cola derecha, donde la curva de la solución analítica difiere con el perfil experimental de fondo con arena. Esto se debe a la transición del fondo liso a la zona con fondo de arena.

En el instante  $t=0.80$  s, el efecto de empinamiento en la cola derecha de la onda es más evidente y un ligero ensanchamiento en la cola izquierda con un ancho de 77 cm, como se puede ver en la figura 70b.

En  $t=0.95$  s el comportamiento es similar al del instante anterior; se observa un mayor empinamiento en la cola derecha del solitón, con respecto al instante anterior, con un ancho a 70.80 cm.

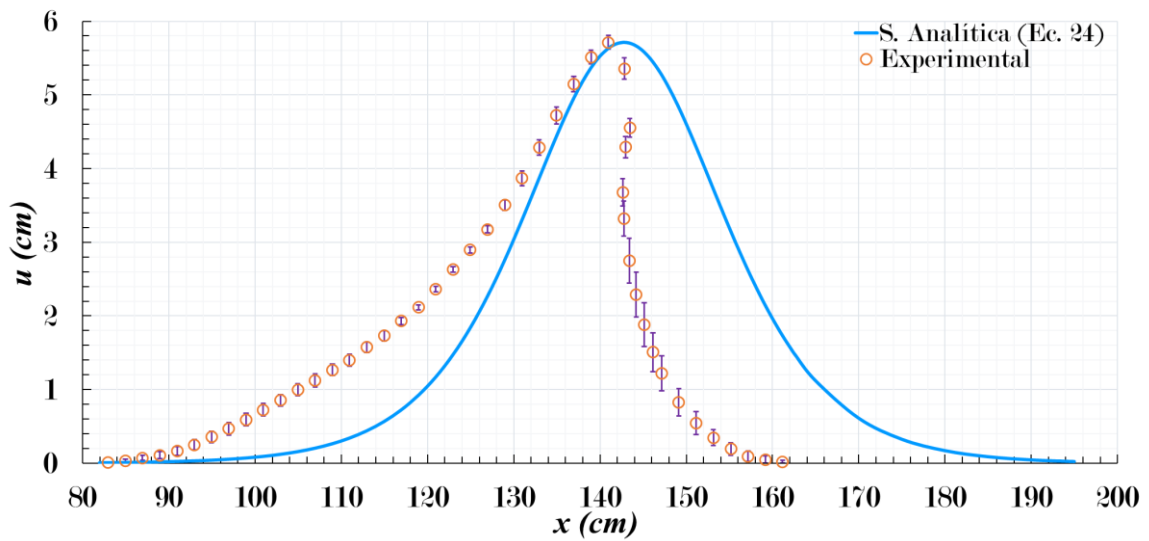
En el instante  $t=1.10$  s, se puede observar un empinamiento más pronunciado de la onda en la cola derecha y en la cola izquierda se observa un mayor ensanchamiento. Esto genera un desfase entre la solución analítica de fondo horizontal con el perfil experimental con pendiente, lo cual es razonable, ya que la solución analítica no considera los efectos del fondo, tales como su rugosidad o la variación de la profundidad  $h$ .

En  $t=1.15$  s, el empinamiento en la zona de la cola derecha es aún más notorio, esto a la vez genera que la cola izquierda se alargue y ensanche más, para contrarrestar esa subida de pendiente. Este cambio genera un aumento considerable del 4.80% en el ancho, alcanzando los 80.70 cm, y una disminución de la velocidad a 117.72 cm/s, lo que representa una reducción del 1.53%. Por lo cual este efecto se puede atribuir a 2 factores: 1) a la variabilidad del  $h$  (Profundidad del agua en reposo), y 2) la rugosidad del fondo de arena, que tiende a frenar el solitón hidrodinámico. Posteriormente, debido a este empinamiento, se genera que la cresta se curve, lo que provoca el rompimiento de la onda (ver figura 71).

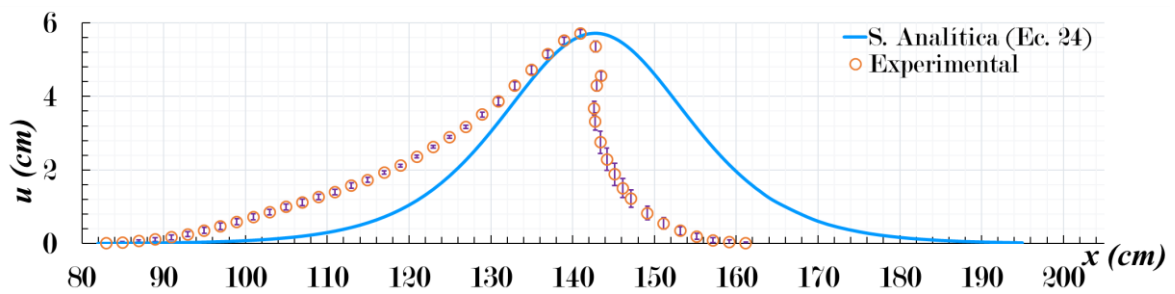
En la figura 71 se puede mostrar una visualización más ampliada de la figura 70f, para un mejor análisis del perfil experimental en el instante  $t=1.15$ s comparada con la solución analítica de fondo liso horizontal (Ec. 24).

**Figura 71**

*Solitón Hidrodinámico en  $t=1.15$  s*



(a)



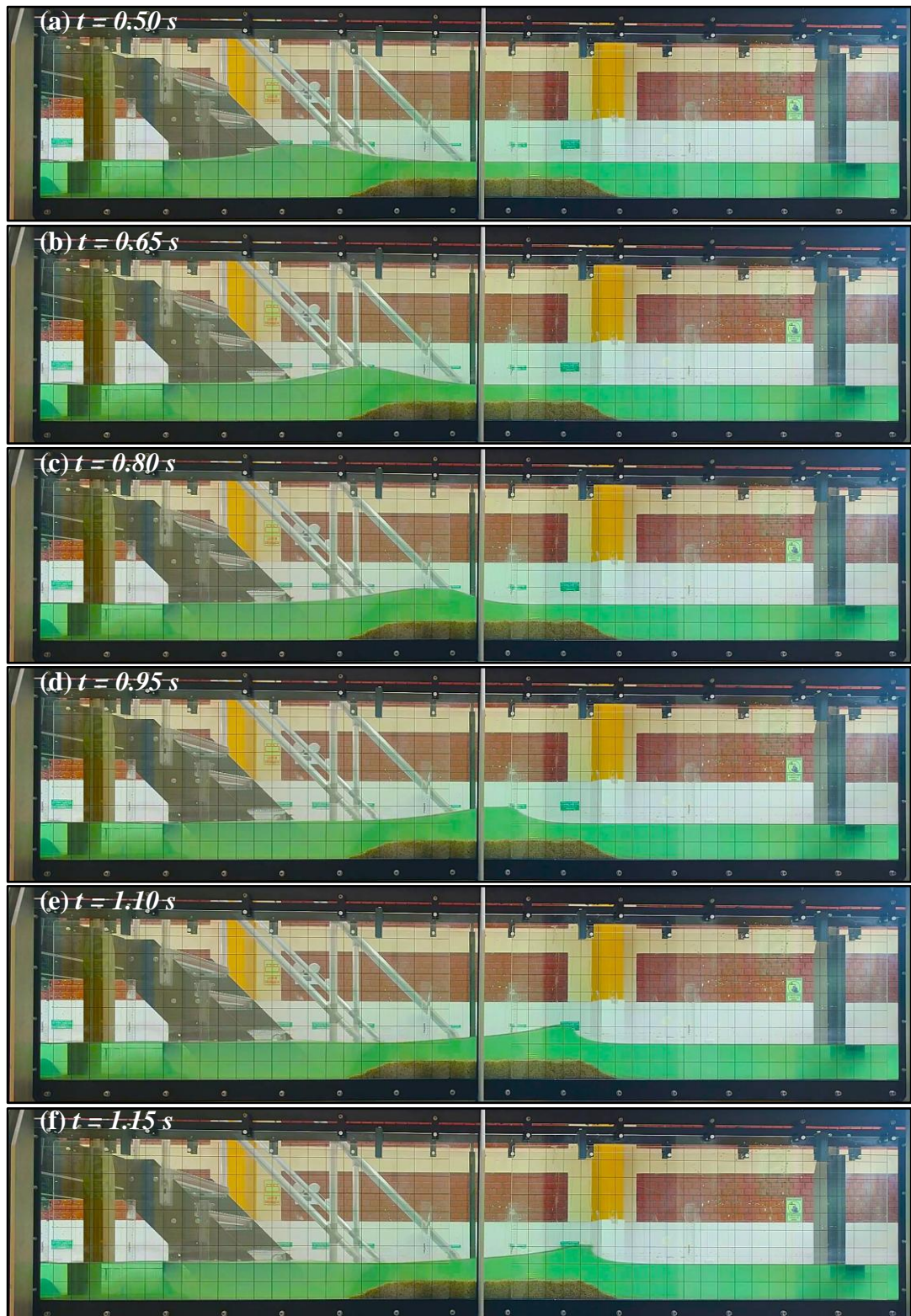
(b)

*Nota.* Solitón Hidrodinámico en un canal rectangular de fondo de Arena en un instante  $t=1.15$  s. La línea continua en azul representa el perfil de la Solución Analítica (KdV) de fondo liso horizontal y los círculos de color naranja son los puntos del perfil experimental con barras de error de color morado.

A continuación, en la figura 75 se aprecia la evolución temporal del solitón hidrodinámico en un canal con fondo con arena tomadas en el laboratorio de hidráulica de la EPIC-UNAT. La coloración verdosa del fluido se debe al colorante alimentario inducido mínimamente para una mejor observación y análisis del solitón.

**Figura 72**

*Evolución temporal del solitón en un canal con fondo de arena*



*Nota.* Evolución temporal de un solitón hidrodinámico unidireccional en un canal rectangular con zona de fondo de arena. Se muestran los fotogramas en diferentes instantes de tiempo observados: (a)  $t = 0.50$  s, (b)  $t = 0.65$  s, (c)  $t = 0.80$  s, (d)  $t = 0.95$  s, (e)  $t = 1.10$  s y (f)  $t = 1.15$  s.

De acuerdo a la tabla 10, se observa que, para un fondo de arena, la amplitud media es de 5.36 cm, con una desviación estándar de 0.36 y una amplitud máxima de 5.81 cm en  $t=1.10$  s. Esto se debe a la perturbación del fondo del canal de arena, lo que provoca un cambio en la forma del solitón, haciendo que la cola derecha de la onda se detenga y generando así un empinamiento de la cresta en ese instante.

La velocidad media experimental del solitón hidrodinámico en el canal con fondo de arena es de 120.67 cm/s con una desviación estándar de 2.05 y la velocidad teórica para un canal con fondo liso horizontal es de 122.76 cm/s, con un desfase de 2.09 cm/s y un error del 1.70 % entre la  $C_e$  y  $C$ . El ancho promedio es de 76.82 cm, nótese que, debido al alargamiento de la cola izquierda de la onda por el efecto de empinamiento en la cola derecha, la onda solitaria alcanza un mayor ancho promedio en  $t=1.15$  s, de 80.70 cm.

**Tabla 10**

*Resultados de solitón hidrodinámico en fondo de arena*

$t$ (s)	Fondo con Arena			
	$x$ (cm)	$H$ (cm)	$C_e$ (cm/s)	$W$ (cm)
0.50	59.78	5.13	119.55	77.00
0.65	78.17	5.32	120.27	79.00
0.80	96.38	4.85	120.47	77.00
0.95	116.77	5.34	122.92	70.80
1.10	135.38	5.81	123.08	76.40
1.15	135.38	5.71	117.72	80.70
<b>Media</b>		<b>5.36</b>	<b>120.67</b>	<b>76.82</b>
<b>Desv. Estandar</b>		<b>0.36</b>	<b>2.05</b>	<b>3.36</b>

*Nota:* La tabla muestra los resultados obtenidos de la Amplitud ( $H$ ), velocidad experimental ( $C_e$ ) y el Ancho ( $W$ ) del Solitón Hidrodinámico para el caso experimental de fondo de arena.

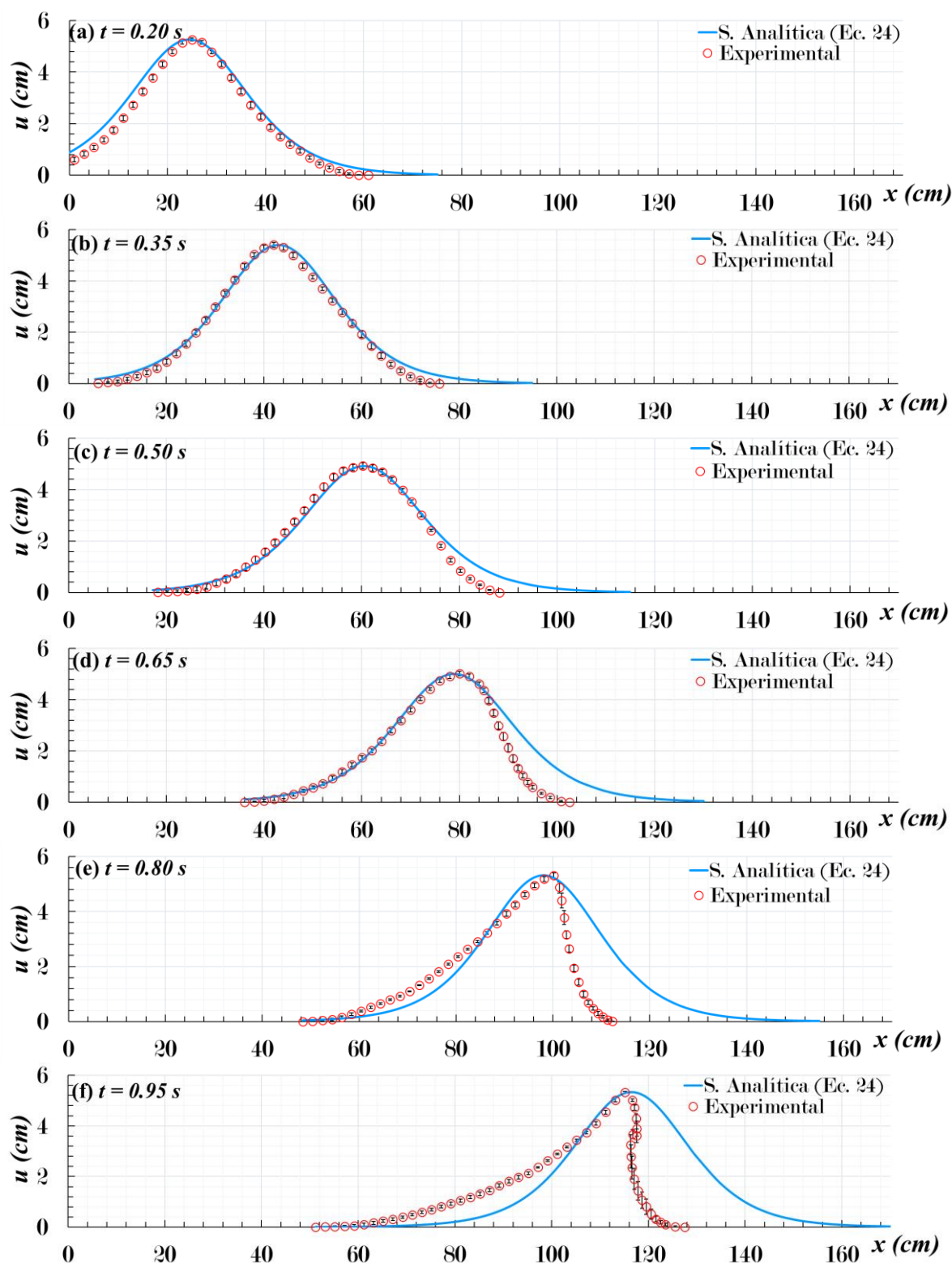
Hacemos mención que el cambio más significativo que se genera con la influencia del fondo de arena es el aumento de la amplitud, llegando a un pico máximo de 5.81 cm en  $t=1.10$  s, lo que representa un incremento del 9.16% en comparación con  $t = 0.65$  s. Asimismo, la deformación de la cola derecha e izquierda de la onda genera, respectivamente, un empinamiento y ensanchamiento de la onda.

#### **4.1.4. Fondo Liso con Pendiente**

En la figura 73 se puede apreciar la evolución temporal del solitón hidrodinámico en un canal con fondo y una pendiente del 5% en diferentes tiempos. Estos se comparan con la solución analítica para un fondo liso horizontal, representada por la línea continua azul, y los puntos del perfil experimental con fondo liso con pendiente, indicados por círculos rojos.

**Figura 73**

*Evolución temporal del solitón en un canal con fondo liso con pendiente del 5%*



*Nota.* Evolución temporal de un solitón hidrodinámico unidireccional en un canal rectangular. Se muestra diferentes instantes de tiempo observados: (a)  $t = 0.20$  s, (b)  $t = 0.35$  s, (c)  $t = 0.50$  s, (d)  $t = 0.65$  s, (e)  $t = 0.80$  s y (f)  $t = 0.95$  s. La línea continua en azul denota el perfil de la solución analítica KdV (Ec. 24) y los círculos rojos son los puntos del experimentales de fondo liso con  $S=5\%$

En la figura 73  $u(x)$  denota la elevación del perfil en la posición  $x$ , dada en cm. En el instante  $t=0.20$  s, los puntos del perfil experimental se aproximan a la solución analítica para un fondo liso, y es lógico, ya que todavía en esa posición el solitón aún no ha ingresado completamente a la zona con fondo liso con pendiente  $S=5\%$ .

En  $t = 0.35$  s, dado que la estructura de fondo liso con pendiente comienza a los 40 cm del origen de coordenadas, se observa solo efecto leve, no tan considerable, en la forma de la onda, ya que todavía se ajusta a la curva de solución analítica de fondo liso horizontal. Sin embargo, se puede notar un pequeño efecto en la cola derecha de la onda, produciendo un desfase en el ancho debido a la transición del fondo liso a fondo liso con pendiente.

En el instante  $t=0.50$  s, el efecto en la cola derecha de la onda se puede observar con mayor claridad, mostrando una disminución considerable, que pasa de 75.99 cm en  $t=0.20$  s, a tener 71.00 cm en  $t=0.50$  s, como se observa en la figura 70c. En  $t=0.65$  s el comportamiento es similar a la anterior, con una mayor deformación de la cola derecha del solitón, lo que resulta en una disminución de su ancho ( $W$ ) a de 66.60 cm, lo que significa una diferencia de 4.40 cm de su ancho inicial. Además, en este instante, se aprecia un ligero empinamiento de la onda.

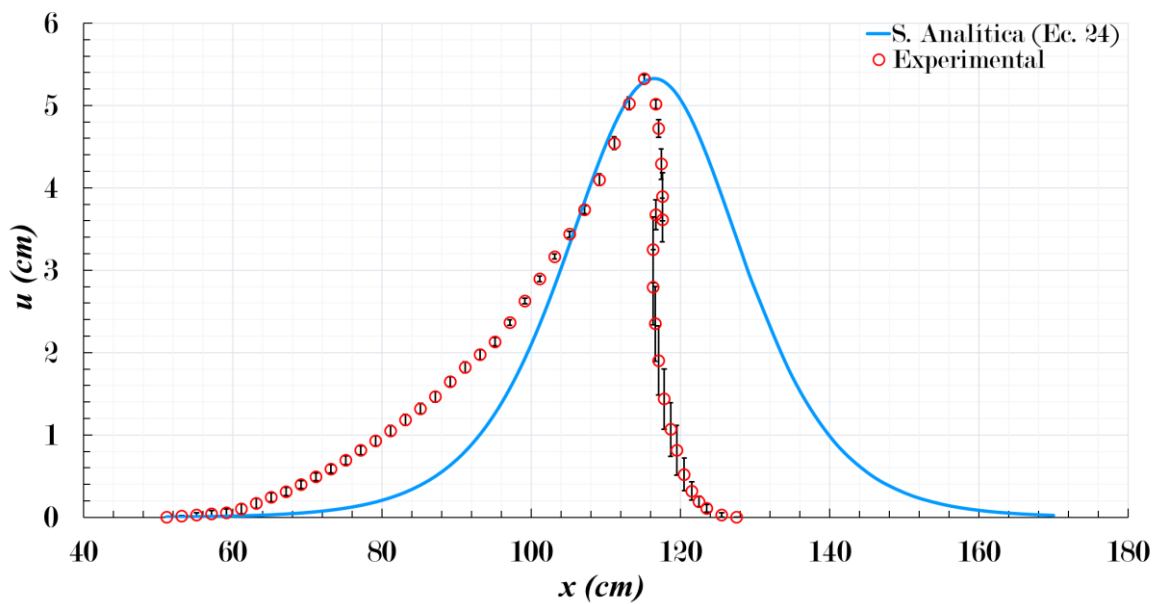
En el instante  $t=0.80$  s, se puede notar un mayor empinamiento de la onda en la cola derecha, y un ensanchamiento en la cola izquierda. Esto genera un desfase entre la solución analítica de fondo horizontal con el perfil experimental con pendiente, esto es razonable, porque la solución analítica no considera los efectos de la rugosidad del fondo ni la variabilidad del  $h$ , en este caso para una pendiente del 5%.

En  $t=0.95$  s, ya se puede notar un empinamiento más pronunciado en la zona de la cola derecha. Este efecto provoca que la cola izquierda se alargue más para contrarrestar esa subida de pendiente, generando así un aumento considerable del 1.19 % en el ancho, que llega 76.89 cm, junto con una disminución de su velocidad. Por lo cual este efecto se puede atribuir a 2 factores: 1) a la variabilidad del  $h$  (Profundidad del agua en reposo) y segundo, la rugosidad del fondo, que tiende a frenar el solitón hidrodinámico, alcanzando en ese punto una velocidad de 121.22 cm/s. Esto representa una disminución del 3.05 % con respecto al tiempo inicial de  $t=0.20$  s, en el cual se tenía una velocidad experimental de 125.03 cm/s.

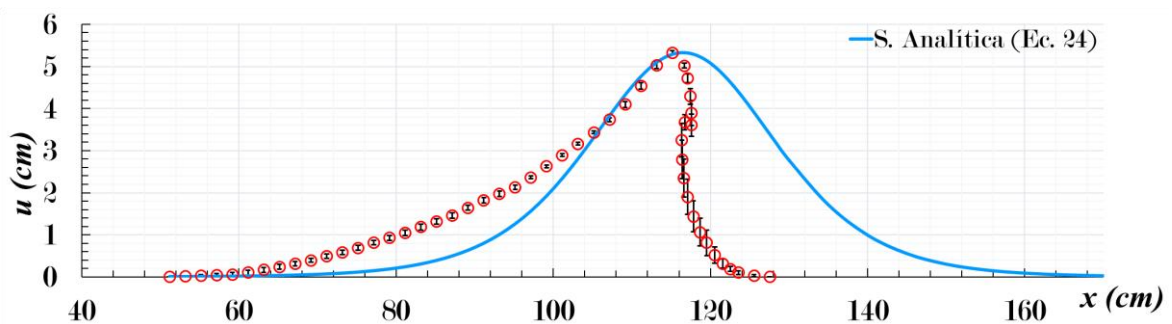
En la figura 74b se puede ver con mayor detalle el comienzo de la caída de la cresta después de alcanzar su amplitud máxima.

**Figura 74**

*Solitón Hidrodinámico en  $t=0.95$  s*



(a)



(b)

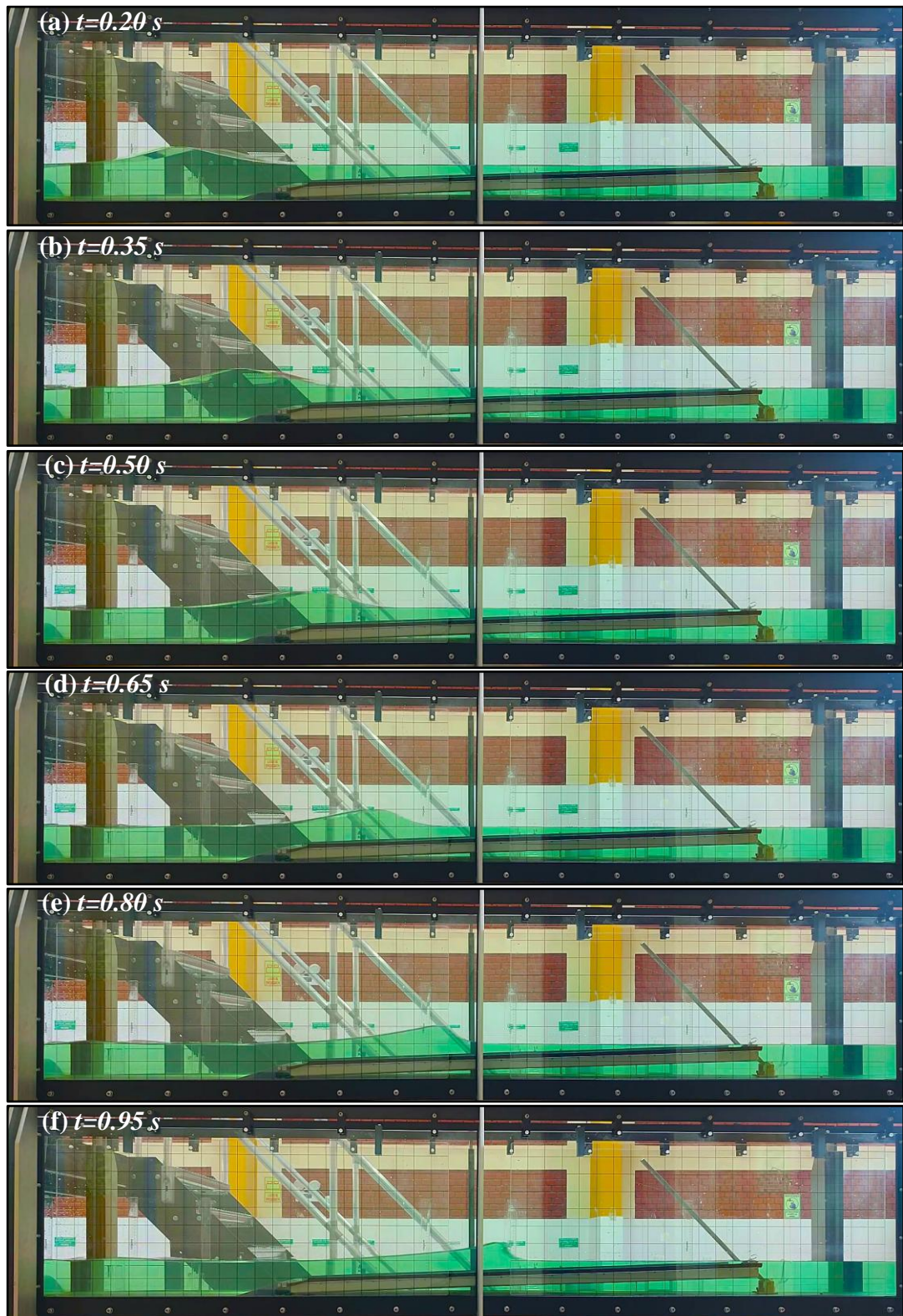
*Nota.* Solitón Hidrodinámico en un canal rectangular de fondo Liso con Pendiente  $S=5$  % en un instante  $t=0.95$  s. Las barras de error verticales se muestran de color negro.

Después de que la cresta se curva, se produce la ruptura del solitón y se generan turbulencias, lo que provoca la pérdida de su forma inicial. Debido a que este es un fenómeno complejo, es necesario utilizar una cámara de alta velocidad o una técnica de PIV para analizar los efectos que se producen en la región de ruptura y turbulencias.

A continuación, en la figura 75 se muestra la evolución temporal del solitón, capturadas en distintos tiempos. La imagen utiliza una coloración verdosa del fluido (agua) para facilitar la visualización y el análisis.

## Figura 75

*Evolución temporal del solitón en fondo liso con pendiente - Laboratorio*



*Nota.* Evolución temporal de un solitón hidrodinámico unidireccional en un canal rectangular. Se muestra diferentes instantes de tiempo observados: (a)  $t = 0.20\text{ s}$ , (b)  $t=0.35\text{ s}$  (c)  $t=0.50\text{ s}$  (d)  $t=0.65\text{ s}$  (e)  $t=0.80\text{ s}$  y (f)  $t=0.95\text{ s}$ . Se muestran los fotogramas del perfil experimental en el canal hidráulico.

De acuerdo a la tabla 11, para un fondo liso con pendiente, la amplitud media es de 5.21 cm, mientras que la amplitud máxima alcanza los 5.33 cm en  $t=0.95$  s. Este aumento se debe a la perturbación causada por el fondo liso con pendiente, que genera un cambio en la forma del solitón, haciendo que la cola derecha de la onda se empine y se curve la cresta, alcanzando así una amplitud máxima en ese instante del recorrido del solitón hidrodinámico.

La velocidad media experimental del solitón hidrodinámico en el canal con fondo liso con pendiente al 5% es de 122.51 cm/s, mientras que la velocidad teórica es de 122.15 cm/s. Esto genera una variación de 0.36 cm/s y un error del 0.30% entre la  $C_e$  y  $C$ .

**Tabla 11**

*Resultado de solitón hidrodinámico en fondo liso con pendiente*

$t$ (s)	Fondo Liso con Pediente S=5%			
	$x$ (cm)	$H$ (cm)	$C_e$ (cm/s)	$W$ (cm)
0.20	25.01	5.27	125.03	75.99
0.35	42.02	5.41	120.04	70.60
0.50	60.21	4.92	120.42	71.00
0.65	80.01	5.02	123.09	66.60
0.80	100.20	5.31	125.26	64.42
0.95	115.16	5.33	121.22	76.89
<b>Media</b>		<b>5.21</b>	<b>122.51</b>	<b>70.92</b>
<b>Desv. Estandar</b>		<b>0.21</b>	<b>2.47</b>	<b>4.95</b>

*Nota:* La tabla muestra los resultados obtenidos de la Amplitud ( $H$ ), velocidad experimental ( $C_e$ ) y el Ancho ( $W$ ) del Solitón Hidrodinámico para el caso experimental de fondo liso con pendiente  $S=5\%$ .

Se destaca que el cambio más significativo que se genera con la influencia del fondo liso con pendiente al 5% es el aumento de la amplitud, alcanzando un máximo de 5.33 cm, lo que representa un incremento del 1.09 % con respecto al  $t = 0.20$  s; así como también la deformación de la cola derecha e izquierda de la onda, lo que genera que la cola izquierda se alargue y ensanche, mientras que la cola derecha se empine más, llegando a que la cresta se curve y por acción de la gravedad caiga, que posteriormente genere el inicio de su rompimiento, como se puede ver en la figura 75f

## 4.2. Discusión de resultados

Los resultados obtenidos muestran que perfil del solitón hidrodinámico en un canal rectangular con fondo liso, mantiene su forma a lo largo de su recorrido, con una amplitud media de 5.06 cm, velocidad media de 121.30 cm/s y un ancho promedio de 81.58 cm. Esto confirma el comportamiento esperado de los solitones descritas por Helal (2022), quien señala que estas ondas no lineales, se desplazan a una velocidad constante, conservando su forma durante su recorrido, incluso después de interactuar con otra onda solitaria.

Para el caso de fondo de grava, de acuerdo a los resultados se muestra un aumento de la amplitud del solitón, llegando a un máximo de 5.57 cm en  $t=0.80$  s, lo que representa un incremento del 8.54%. Asimismo, se muestra la deformación de la cola derecha e izquierda de la onda, generándose un empinamiento y ensanchamiento respectivamente, lo que genera un efecto en su forma, haciendo que su cresta se curve y por efectos de la gravedad, caiga, generándose el rompimiento de esta. Este comportamiento difiere de la solución analítica para un fondo liso, ya que esta última no considera la variable del fondo, como su rugosidad y la variación de la profundidad. Como afirma Cheng & Liu (2023) la ecuación de KdV, está basado bajo ciertas condiciones, como fluido ideal, no se consideran los efectos de la fricción con el fondo, fluido incompresible y profundidad de agua constante.

Para el caso de fondo de arena, de acuerdo a los resultados se muestra un aumento de la amplitud del solitón, llegando a un máximo de 5.81 cm en  $t=1.10$  s, lo que representa un incremento del 9.16%. Asimismo, se muestra la deformación de la cola derecha e izquierda de la onda, generándose un empinamiento y ensanchamiento respectivamente, lo que genera un efecto en su forma, haciendo que su cresta se curve y por efectos de la gravedad, caiga, generándose el rompimiento de esta.

De acuerdo con los resultados obtenidos para el perfil del solitón hidrodinámico en un canal con fondo liso y pendiente del 5%, se observó que la onda alcanzó una amplitud máxima de 5.33 cm. Además, se evidenció un empinamiento gradual de la cola derecha, lo que provocó que la cresta se inclinara y, posteriormente, se genere el rompimiento de la onda, similar a los descrito por Lin et al. (2018), quien señala que cuando una ola se desplaza por una playa inclinada, la onda se inclina y/o se empina y se deforma continuamente antes del rompimiento.

## V. CONCLUSIONES

- El perfil experimental del solitón hidrodinámico en fondo liso horizontal concuerda muy bien con el perfil de la solución analítica, por lo cual se logró su validación. Esto lo usamos como sistema control para analizar los efectos de las fronteras, grava, arena y fondo liso con pendiente al 5%. Se obtuvo una velocidad media de 121.30 cm/s con una desviación estándar de 1.31, una amplitud media de 5.06 cm con una desviación de 0.27 y un ancho de 81.58 cm.
- El fondo de grava incide significativamente en la amplitud del solitón hidrodinámico en  $t = 0.80$  s, logrando una amplitud máxima de 5.57 cm, lo que representa un incremento del 8.54%. Esto provoca que la cresta del solitón se curve y, por efectos de la gravedad, caiga, generándose el rompimiento de la onda solitaria. Asimismo, la velocidad disminuyó un 3.60 % en  $t = 0.95$  s, pasando de 125.03 cm/s a 120.53 cm/s. Además, en ese instante, el ancho del solitón alcanzó un máximo de 87.79 cm, lo que indica un incremento del 7.18%.
- El fondo de arena tiene un impacto en la forma del solitón hidrodinámico, ya que no es una gaussiana bien definida sino este se va perdiendo a medida que avanza por la zona de fondo de arena. La amplitud máxima alcanzada fue de 5.81 cm en  $t=1.10$  s, que representa un aumento del 9.16% con respecto al  $t = 0.65$  s. Con respecto a la velocidad media se vio una disminución del 1.53% de 119.55 cm/s a 117.72 cm/s. El ancho del solitón hidrodinámico alcanzó un máximo en  $t=1.15$  s, con un valor de 80.70 cm, que representa un incremento del 4.80%, esto debido al alargamiento de la cola izquierda y el empinamiento de la cola derecha del solitón hidrodinámico.
- El fondo liso con pendiente al 5% influye en el rompimiento de la onda debido a una disminución del gradual del  $h$  debido al efecto de la pendiente. La amplitud máxima alcanzada fue de 5.33 cm En  $t= 0.95$  s, que representa un aumento del 1.09 % con respecto al  $t = 0.20$  s. Además, se generó una disminución en su velocidad de 125.03 a 121.22 cm/s, lo que representa una disminución del 3.05%. El comportamiento de su ancho alcanzo un máximo de 76.89 cm en  $t = 0.95$  s, que representa un incremento del 1.19%, esto debido al alargamiento de la cola izquierda y el empinamiento de la cola derecha del solitón hidrodinámico.

## VI. RECOMENDACIONES

- Con respecto al módulo del sistema generador, se recomienda implementar un mecanismo de automatización programable con Python para la generación de solitones hidrodinámicos. Esto permitirá realizar un mayor número de ensayos y generar solitones con mayor precisión.
- Se sugiere evaluar la generación de solitones hidrodinámicos con  $h$  mayores a 10 cm para ver la factibilidad de los ensayos con mayores profundidades teniendo en consideración que el canal tiene una sección de 30.9 cm y 45 cm de altura.
- Es recomendable realizar investigaciones con diversas configuraciones geométricas para el caso de fondo de arena. En nuestro caso, se utilizó una configuración horizontal con una longitud de 0.75 cm, pero esta podría tener diversas alternativas.
- Es importante realizar más configuraciones de pendientes con fondo liso y evaluar su incidencia. Además, se recomienda estudiar distintas fronteras con pendientes, como las de grava y arena con una pendiente del 5%.
- Se sugiere revisar la metodología con ImageJ y evaluar procedimientos más rápidos para extraer las coordenadas de los puntos de manera automatizada mediante código o software de detección de bordes de imagen, como Matlab.
- Por último, se recomienda realizar investigaciones más detalladas en la fase de rompimiento de la onda, utilizando equipos especializados como el PIV.

## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arias, F. G. (2012). *El Proyecto de Investigación. Introducción a la Metodología Científica*. Fideas G. Arias Odón.
- Bastón, S., Olabarrieta, M., Lomónaco, P., Méndez, F. J., & Medina, R. (2010). Propagación de una onda solitaria en cuerpos de agua semi-confinados. *Ingeniería del Agua*, 17(1), 39–49. <https://doi.org/10.4995/ia.2010.2964>
- Booshi, S., & Ketabdari, M. J. (2021). Modeling of solitary wave interaction with emerged porous breakwater using PLIC-VOF method. *Ocean Engineering*, 241, 110041. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.110041>
- Boussinesq, J. (1871). Theorie de l'intumescence Liquid, Appleteonde Solitaire au de Translation, se Propageant dans un Canal Rectangulaire. *Comptes Rendus de l'Academie Des Sciences*, 72(755–759), 1871.
- Cadavid, J. H. (2020). *Hidráulica de canales: Fundamentos* (1st ed.). Universidad EAFIT. <https://books.google.com.pe/books?id=3gqME66cnhwC>
- Cascante, R., & Martín, C. (2016). Ondas dispersivas – Korteweg – De – Vries (KDV). *Matemática*, 14(1), 34–48. <http://www.revistas.espol.edu.ec/index.php/matematica/article/view/467>
- Çengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2018). *Mecánica de Fluidos* (4th ed.). McGraw-Hill Interamericana. [https://www.google.com.pe/books/edition/Mec%C3%A1nica\\_de\\_fluidos/RGn6wQEACAAJ?hl=en](https://www.google.com.pe/books/edition/Mec%C3%A1nica_de_fluidos/RGn6wQEACAAJ?hl=en)
- Cheng, S., & Liu, H. (2023). Weakly nonlinear waves over the bottom disturbed topography: Korteweg–de Vries equation with variable coefficients. *European Journal of Mechanics - B/Fluids*, 98, 238–246. <https://doi.org/10.1016/J.EUROMECHFLU.2022.12.010>
- Christou, A., Xie, Z., Stoesser, T., & Ouro, P. (2021). Propagation of a solitary wave over a finite submerged thin plate. *Applied Ocean Research*, 106, 102425. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2020.102425>
- Dauxois, T., & Peyrard, M. (2006). *Physics of Solitons* (1st ed., Vol. 1). Cambridge University Press. [https://books.google.com.pe/books?id=YKe1UZc\\_Qo8C](https://books.google.com.pe/books?id=YKe1UZc_Qo8C)
- Ferreira, T., & Rasband, W. (2012). *ImageJ User Guide ImageJ User Guide IJ 1.46r*. <http://fiji.sc/guide.git>.

- Flores, L. R., & Humberto, A. (1984). *Fenómenos No-Lineales: la ecuación KdV y el método inverso a la dispersión*. <https://repositorio.uni.edu.pe/handle/20.500.14076/22898>
- Francis, V., Ramakrishnan, B., Rudman, M., & Valizadeh, A. (2020). Generating stable solitary waves with a piston-type wavemaker. *Coastal Engineering*, *157*, 103633. <https://doi.org/10.1016/J.COASTALENG.2020.103633>
- Ghafari, A., Tavakoli, M. R., Nili-Ahmadabadi, M., Teimouri, K., & Kim, K. C. (2021). Investigation of interaction between solitary wave and two submerged rectangular obstacles. *Ocean Engineering*, *237*, 109659. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109659>
- Granados, M. A., Fujioka, J., & Ceciliano, L. (2002). La antisoledad de la onda solitaria. *CIENCIA ergo-sum, Revista Científica Multidisciplinaria de Prospectiva*, *9*(2). <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=10402411>
- G.U.N.T. (2019a). *Canales de ensayo - GUNT Gerätebau*. <https://www.gunt.de/es/highlights/canales-de-ensayo#Download>
- G.U.N.T. (2019b). *Manual de experimentos*. [https://www.gunt.de/es/highlights/canales-de-ensayo#Flumes\\_Overview](https://www.gunt.de/es/highlights/canales-de-ensayo#Flumes_Overview)
- Hall, J. V., & Watts, G. M. (1953). Laboratory investigation of the vertical rise of solitary waves on impermeable slopes. In *This Digital Resource was created from scans of the Print Resource* (Issue 33). United States, Beach Erosion Board. <https://erdc-library.erdc.dren.mil/jspui/handle/11681/3431>
- Han, S., Ha, T., & Cho, Y. S. (2015). Laboratory experiments on run-up and force of solitary waves. *Journal of Hydro-Environment Research*, *9*(4), 582–591. <https://doi.org/10.1016/J.JHER.2015.05.002>
- Helal, M. A. (2022). *Solitons* (M. A. Helal, Ed.; 1st ed.). Springer New York, NY. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-1-0716-2457-9>
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, M. del P. (2014). *Metodología de la investigación* (6th ed.). McGraw-Hill Education. [https://www.google.com.pe/books/edition/\\_/oLbjoQEACAAJ?hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwj8xpnh8qmIAxW0BrkGHTMRDj4Qre8FegQIGRAH](https://www.google.com.pe/books/edition/_/oLbjoQEACAAJ?hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwj8xpnh8qmIAxW0BrkGHTMRDj4Qre8FegQIGRAH)
- Hess, F., Boes, R. M., & Evers, F. M. (2023). Forces on a Vertical Dam due to Solitary Impulse Wave Run-Up and Overtopping. *Journal of Hydraulic Engineering*, *149*(7), 04023020. <https://doi.org/10.1061/JHEND8.HYENG-13200>

- Jeong, S. M., Park, J. I., & Park, J. C. (2019). Numerical Simulation of 2-D Solitary Wave Run-Up over Various Slopes Using a Particle-Based Method. *Water* 2019, Vol. 11, Page 462, 11(3), 462. <https://doi.org/10.3390/W11030462>
- Korteweg, D. J., & De Vries, G. (1895). XLI. On the change of form of long waves advancing in a rectangular canal, and on a new type of long stationary waves. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 39(240), 422–443.
- Lakshmanan, M. (2012). Solitons, Tsunamis and Oceanographical Applications of. *Mathematics of Complexity and Dynamical Systems*, 1603–1617. [https://doi.org/10.1007/978-1-4614-1806-1\\_103](https://doi.org/10.1007/978-1-4614-1806-1_103)
- Lee, W. D., Hwang, T., & Kim, T. (2022). Inundation Characteristics of Solitary Waves According to Revetment Type. *Water* 2022, Vol. 14, Page 3814, 14(23), 3814. <https://doi.org/10.3390/W14233814>
- Lin, C., Wong, W. Y., Kao, M. J., Tsai, C. P., Hwung, H. H., Wu, Y. T., & Raikar, R. V. (2018). Evolution of Velocity Field and Vortex Structure during Run-Down of Solitary Wave over Very Steep Beach. *Water* 2018, Vol. 10, Page 1713, 10(12), 1713. <https://doi.org/10.3390/W10121713>
- Lopez, S., Esparza, M., Lem, G., & Gutiérrez, J. C. (2014). Ondas solitarias no lineales: una introducción a los solitones ópticos espaciales. *Revista mexicana de física E*, 60(1), 39–50. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_abstract&pid=S1870-35422014000100004&lng=es&nrm=iso&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1870-35422014000100004&lng=es&nrm=iso&tlng=es)
- Lu, X., & Wang, K. H. (2015). Modeling a solitary wave interaction with a fixed floating body using an integrated analytical–numerical approach. *Ocean Engineering*, 109, 691–704. <https://doi.org/10.1016/J.OCEANENG.2015.09.050>
- Montoro, R. (2024, August 12). *La ola de Chicama es la más larga del mundo y está protegida por ley: NASA la califica como “legendaria”*. <https://www.infobae.com/peru/2024/08/08/el-mar-peruano-alberga-la-ola-mas-larga-del-mundo-y-esta-prottegida-por-ley-la-nasa-la-califica-como-legendaria/>
- Morales, J. A. (2008). *Teoría y Experimentación de Ondas Solitarias en Agua* [Universidad Nacional Autónoma de México]. <https://ru.dgb.unam.mx/handle/20.500.14330/TES01000633474>
- NASA. (2022, April 12). *¿La ola más larga del mundo? - NASA Ciencia*. <https://ciencia.nasa.gov/ciencias-terrestres/la-ola-mas-larga-del-mundo/>

- Ñaupas, H., Paitán, H. Ñ., Ramírez, E. N., Mejía, E. M., & Paucar, A. V. (2014). *Metodología de la investigación: cuantitativa - cualitativa y redacción de la tesis* (4th ed.). Ediciones de la U.
- Niu, X., Ma, Y., & Dong, G. (2022). Laboratory Study on Flow Characteristics during Solitary Waves Interacting with a Suspended Horizontal Plate. *Water* 2022, Vol. 14, Page 2386, 14(15), 2386. <https://doi.org/10.3390/W14152386>
- Perez, D. (2002). *Evolución histórica de las fórmulas para expresar las pérdidas de carga en tuberías.* 23. <https://biblat.unam.mx/es/revista/ingenieria-hidraulica-y-ambiental/articulo/evolucion-historica-de-las-formulas-para-expresar-las-perdidas-de-carga-en-tuberias>
- Remoissenet, M. (1999). *Hydrodynamic Solitons.* 103–142. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-03790-4\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-662-03790-4_5)
- Russell, J. S. (1844). *Reports on Waves. Report of the 14th meeting of the British Association for the Advancement of Science, London, 1844* (1st ed., Vol. 1, pp. 311–390). John Murray. <http://archive.org/details/reportofbritisha44brit>
- Soomere, T. (2012). Solitons Interactions. *Mathematics of Complexity and Dynamical Systems*, 1576–1600. [https://doi.org/10.1007/978-1-4614-1806-1\\_101](https://doi.org/10.1007/978-1-4614-1806-1_101)
- Supo, J. (2012). *Seminarios de Investigación Científica: Metodología de la Investigación para Las Ciencias de la Salud.* CreateSpace Independent Publishing Platform. [https://www.google.com.pe/books/edition/Seminarios\\_de\\_Investigaci%C3%B3n\\_Cient%C3%ADfica/oFnmrQEACAAJ?hl=es](https://www.google.com.pe/books/edition/Seminarios_de_Investigaci%C3%B3n_Cient%C3%ADfica/oFnmrQEACAAJ?hl=es)
- Tamayo, M. (2003). *El proceso de la investigación científica* (4th ed.). Editorial Limusa.
- The Indian Face. (2024). *La ola mas larga del mundo está aquí.* <https://theindianface.com/es-pe/blogs/news/la-ola-mas-larga-del-mundo-esta-aqui>
- Tripepi, G., Casella, F., Aristodemo, F., & Filianoti, P. (2023). The solitary wave run-up on sloped beaches protected by submerged rigid breakwaters. *Ocean Engineering*, 282, 115003. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.115003>
- Yin, Z., Li, J., Wang, Y., Wang, H., & Yin, T. (2023). Solitary wave attenuation characteristics of mangroves and multi-parameter prediction model. *Ocean Engineering*, 285, 115372. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.115372>
- Zabusky, N. J., & Kruskal, M. D. (1965). Interaction of “Solitons” in a Collisionless Plasma and the Recurrence of Initial States. *Physical Review Letters*, 15(6), 240–243. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.15.240>

## VIII. ANEXOS

### ANEXO 1: MATRIZ DE CONSISTENCIA

#### **Tabla A.1**

*Matriz de Consistencia*

TÍTULO: “EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LAS FRONTERAS EN EL COMPORTAMIENTO DE SOLITONES HIDRODINÁMICOS”					
FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	INDICADORES	METODOLOGÍA
<b>Problema general</b>	<b>Objetivo General</b>	<b>Hipótesis General</b>	<b>VI: Variable Independiente</b>	X1: Fondo liso X2: Fondo con Grava X3: Fondo con Arena X4: Fondo Liso con Pendiente S=5%	<b>Tipo de Investigación:</b> Investigación Aplicada  <b>Nivel de investigación:</b> Investigación explicativa  <b>- Población:</b> Ensayos experimentales de solitones hidrodinámicos
¿Cuál es el efecto de las geometrías de las fronteras en el comportamiento de solitones hidrodinámicos?	Determinar el efecto de las geometrías de las fronteras en el comportamiento de solitones hidrodinámicos.	Las geometrías de las fronteras afectan significativamente en el comportamiento de solitones hidrodinámicos.	Fronteras		
<b>Problemas Específicos</b>	<b>Objetivos específicos</b>	<b>Hipótesis Especifico</b>	<b>VD: Variable Dependiente</b>	Y1: Ancho de Onda (W) Y2: Amplitud de Onda (H) Y3: Velocidad de Onda (C)	<b>- Muestra:</b> 5 ensayos por cada caso experimental  <b>- Muestreo:</b> Muestreo No Probabilístico por Conveniencia  <b>Técnicas e instrumentos de recolección de datos:</b>  <b>- Técnicas:</b> Observación Experimental  <b>- Instrumentos:</b> - Ficha de recolección de datos - Camara 60 FPS - Rejilla de medición  <b>Técnicas de análisis y procesamiento de datos:</b>  <b>- Técnicas:</b> Análisis cuantitativo  <b>- Procesamiento:</b> Software: Python, Image J, Excel
¿Cuál es la influencia de un fondo liso en el comportamiento del ancho, amplitud y velocidad de solitones hidrodinámicos?	Establecer la influencia de un fondo liso en el comportamiento del ancho, amplitud y velocidad de solitones hidrodinámicos	El fondo liso influye significativamente en el comportamiento del ancho, amplitud y velocidad de solitones hidrodinámicos.	Solitones hidrodinámicos		
¿Cuál es la incidencia de un fondo con grava en el comportamiento del ancho, amplitud y velocidad de solitones hidrodinámicos?	Evaluar el efecto de un fondo con grava en el comportamiento del ancho, amplitud y velocidad de solitones hidrodinámicos	El fondo de grava incide significativamente en el comportamiento del ancho, amplitud y velocidad de solitones hidrodinámicos.			
¿Cuál es el impacto de un fondo de arena en el comportamiento del ancho, amplitud y velocidad de solitones hidrodinámicos?	Calcular el impacto de un fondo de arena en el comportamiento del ancho, amplitud y velocidad de solitones hidrodinámicos	El fondo de arena impacta significativamente en el comportamiento del ancho, amplitud y velocidad de solitones hidrodinámicos.			
¿Cuál es la influencia de la variabilidad de la pendiente con fondo liso del canal en el comportamiento del ancho, amplitud y velocidad de solitones hidrodinámicos?	Determinar la influencia de la variabilidad de la pendiente con fondo liso del canal en el comportamiento del ancho, amplitud y velocidad de solitones hidrodinámicos	La variabilidad de la pendiente con fondo liso del canal influye significativamente en el comportamiento del ancho, amplitud y velocidad de solitones hidrodinámicos.			

Fuente: Elaboración propia

## ANEXO 2 : SCRIPT PYTHON PARA RECORTE DE VIDEOS

```
""
Created on Fri Jun 28 21:18:37 2024
@author: Beto Taipe Ccente
""

from moviepy.editor import VideoFileClip

# Cargar el video
video = VideoFileClip("Directorio del video para recorte ")
# Ejemplo:
# video = VideoFileClip("E:\\Thesis Ofitial - Solitones
Hidrodinamicos\\Videos Experimentales\\Julio_2024\\Experimento_10_(25-07-
24)\\Exp_10 Region de Recorrido\\VID_E09_G_131655.mp4")

# Especificamos el tiempo de inicio y fin del recorte en segundos
inicio =3 # por ejemplo, 3 segundos
fin = 7 # por ejemplo, 7 segundos

# Recortar el video
video_recortado = video.subclip(inicio, fin)

# Guardar el video recortado y se asigna un nombre en el directorio
video_recortado.write_videofile("Directorio donde se va a guardar el video
recortado", codec="libx264")
#Por ejemplo:
# video_recortado.write_videofile("E:\\Thesis Ofitial - Solitones
Hidrodinamicos\\Videos Experimentales\\Julio_2024\\Experimento_10_(25-07-
24)\\Exp_10 Region de Recorrido\\VID_E09_G_131655_R.mp4", codec="libx264")
```

### ANEXO 3: SCRIPT PYTHON PARA EXTRACCIÓN DE FRAMES



```
"""
Created on Tue Jun 18 10:14:40 2024
@author: Beto Taipe Ccente
"""



import cv2
import os



# Ruta completa del video de entrada
video_path = 'Directorio del video de entrada'
# Directorio de salida para los fotogramas
output_dir = 'Directorio de salida de fotogramas extraidos'
# Crear el directorio de salida si no existe
os.makedirs(output_dir, exist_ok=True)
# Abrir el archivo de video
cap = cv2.VideoCapture(video_path)
frame_count = int(cap.get(cv2.CAP_PROP_FRAME_COUNT))
fps = int(cap.get(cv2.CAP_PROP_FPS))
print(f'FPS: {fps}, Total Frames: {frame_count}')
frame_number = 0
while True:
    ret, frame = cap.read()
    if not ret:
        break
    # Calcular el tiempo correspondiente a este fotograma en segundos
    time_in_seconds = frame_number / fps
    # Crear el nombre del archivo con el tiempo en segundos
    frame_filename = os.path.join(output_dir,
    f'frame_{frame_number:04d}_{time_in_seconds:.2f}.png')
    cv2.imwrite(frame_filename, frame)
    frame_number += 1
    #frame_filename = os.path.join(output_dir,
    f'frame_{frame_number:04d}.png')
    #cv2.imwrite(frame_filename, frame)
    #frame_number += 1
cap.release()
print('Extracción de fotogramas completada.')
```

# ANEXO 4: FICHAS

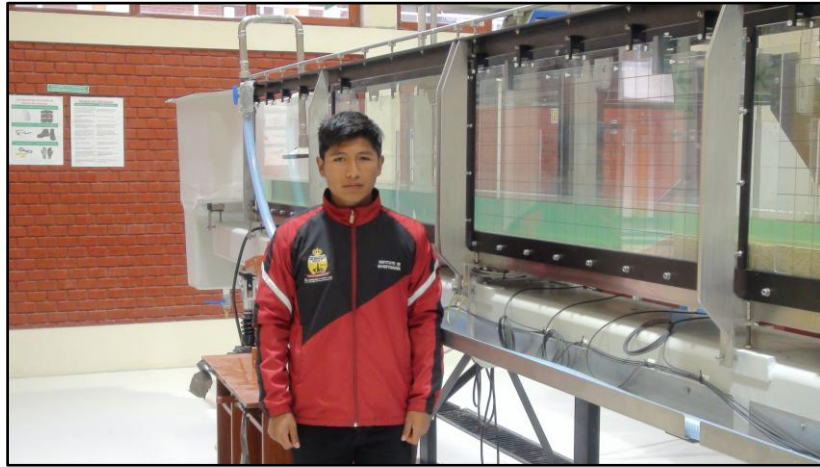
		<b>UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE TAYACAJA DANIEL HERNÁNDEZ MORILLO</b> <b>ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL</b>							
		<b>LABORATORIO DE HIDRAULICA - EPIC - UNAT</b>							
		<b>TESIS: "EVALUACION DEL EFECTO DE LA FRONTERAS EN EL COMPORTAMIENTO DE SOLITONES HIDRODINÁMICOS"</b>							
<b>EXPERIMENTOS DE SOLITONES HIDRODINÁMICOS - FONDO LISO</b>									
<b>CÓDIGO : EXP_01_L</b>									
<b>PARAMETROS DE ENSAYO :</b>					<b>DATOS DE ENSAYO:</b>				
Pendiente del Canal Hidráulico (S) : 0.00 %					Amplitud Máxima (H) : 5.391 cm				
Profundidad del Agua en Reposo (h) : 10.000 cm					Posición del Hmáx : 36.729 cm				
Tiempo de Análisis (t) : 0.30 s					Velocidad Experimental de Onda (C <sub>e</sub> ) : 122.430 cm/s				
Tipo de Fondo (F) : Liso					Error de Velocidad: 0.36%				
<b>ANÁLISIS DE DATOS EXPERIMENTALES</b>									
Datos Generales				Teórico			Experimental		
Tiempo	Amplitud Máxima de Onda	Profundidad de Agua en Reposo	Relación H/h	Posición	Velocidad de Onda (Analítica)	Solución Analítica	Velocidad de Onda (Experimental)	Amplitud Experimental	Error Estándar Experimental
t	H	h	H/h	x	$c = \sqrt{g(h+H)}$	$u(x,t) = H \operatorname{sech}^2 \left[ \sqrt{\frac{3H}{4H^2}} (x - ct) \right]$	$C_e = \frac{u}{t}$	$u(x)_{\text{experimental}}$	$E_s = \frac{s}{\sqrt{n}}$
(s)	(cm)	(cm)		(cm)	(cm/s)	(cm)	(cm/s)	(cm)	
0.30	5.3914	10.000	0.54	-4.810	122.88	0.107	122.43	0.000	0.00
0.30	5.3914	10.000	0.54	-3.811	122.88	0.121	122.43	0.001	0.00
0.30	5.3914	10.000	0.54	-3.012	122.88	0.134	122.43	0.016	0.01
0.30	5.3914	10.000	0.54	-2.010	122.88	0.152	122.43	0.055	0.02
0.30	5.3914	10.000	0.54	-1.006	122.88	0.172	122.43	0.118	0.02
0.30	5.3914	10.000	0.54	-0.390	122.88	0.186	122.43	0.184	0.03
0.30	5.3914	10.000	0.54	0.029	122.88	0.196	122.43	0.227	0.03
0.30	5.3914	10.000	0.54	0.954	122.88	0.219	122.43	0.272	0.03
0.30	5.3914	10.000	0.54	1.759	122.88	0.243	122.43	0.296	0.03
0.30	5.3914	10.000	0.54	2.728	122.88	0.274	122.43	0.339	0.03
0.30	5.3914	10.000	0.54	3.750	122.88	0.310	122.43	0.380	0.03
0.30	5.3914	10.000	0.54	4.730	122.88	0.350	122.43	0.429	0.03
0.30	5.3914	10.000	0.54	5.728	122.88	0.396	122.43	0.467	0.04
0.30	5.3914	10.000	0.54	6.727	122.88	0.447	122.43	0.513	0.05
0.30	5.3914	10.000	0.54	7.727	122.88	0.505	122.43	0.561	0.05
0.30	5.3914	10.000	0.54	8.728	122.88	0.570	122.43	0.625	0.05
0.30	5.3914	10.000	0.54	9.728	122.88	0.643	122.43	0.690	0.05
0.30	5.3914	10.000	0.54	10.730	122.88	0.724	122.43	0.762	0.05
0.30	5.3914	10.000	0.54	11.725	122.88	0.814	122.43	0.828	0.05
0.30	5.3914	10.000	0.54	12.730	122.88	0.915	122.43	0.909	0.05
0.30	5.3914	10.000	0.54	13.732	122.88	1.027	122.43	0.992	0.06
0.30	5.3914	10.000	0.54	14.733	122.88	1.150	122.43	1.098	0.05
0.30	5.3914	10.000	0.54	15.728	122.88	1.286	122.43	1.202	0.05
0.30	5.3914	10.000	0.54	16.724	122.88	1.435	122.43	1.329	0.05
0.30	5.3914	10.000	0.54	17.730	122.88	1.599	122.43	1.443	0.05
0.30	5.3914	10.000	0.54	18.732	122.88	1.777	122.43	1.602	0.06
0.30	5.3914	10.000	0.54	19.727	122.88	1.969	122.43	1.790	0.06
0.30	5.3914	10.000	0.54	20.731	122.88	2.176	122.43	1.999	0.07
0.30	5.3914	10.000	0.54	21.730	122.88	2.397	122.43	2.228	0.09
0.30	5.3914	10.000	0.54	22.732	122.88	2.630	122.43	2.485	0.10
0.30	5.3914	10.000	0.54	23.735	122.88	2.876	122.43	2.737	0.12
0.30	5.3914	10.000	0.54	24.732	122.88	3.129	122.43	3.005	0.12
0.30	5.3914	10.000	0.54	25.735	122.88	3.391	122.43	3.279	0.12
0.30	5.3914	10.000	0.54	26.727	122.88	3.652	122.43	3.543	0.12
0.30	5.3914	10.000	0.54	27.729	122.88	3.915	122.43	3.815	0.12
0.30	5.3914	10.000	0.54	28.727	122.88	4.171	122.43	4.087	0.12
0.30	5.3914	10.000	0.54	29.725	122.88	4.417	122.43	4.358	0.12
0.30	5.3914	10.000	0.54	30.727	122.88	4.647	122.43	4.626	0.11
0.30	5.3914	10.000	0.54	31.729	122.88	4.855	122.43	4.864	0.11
0.30	5.3914	10.000	0.54	32.733	122.88	5.036	122.43	5.054	0.11
0.30	5.3914	10.000	0.54	33.727	122.88	5.183	122.43	5.190	0.09
0.30	5.3914	10.000	0.54	34.732	122.88	5.294	122.43	5.283	0.09
0.30	5.3914	10.000	0.54	35.729	122.88	5.363	122.43	5.340	0.09
0.30	5.3914	10.000	0.54	36.729	122.88	5.391	122.43	5.391	0.09
0.30	5.3914	10.000	0.54	37.731	122.88	5.375	122.43	5.338	0.09
0.30	5.3914	10.000	0.54	38.735	122.88	5.316	122.43	5.284	0.09
0.30	5.3914	10.000	0.54	39.726	122.88	5.217	122.43	5.182	0.09
0.30	5.3914	10.000	0.54	40.732	122.88	5.078	122.43	5.021	0.10
0.30	5.3914	10.000	0.54	41.734	122.88	4.906	122.43	4.826	0.10
0.30	5.3914	10.000	0.54	42.728	122.88	4.706	122.43	4.610	0.10
0.30	5.3914	10.000	0.54	43.730	122.88	4.481	122.43	4.385	0.10
0.30	5.3914	10.000	0.54	44.730	122.88	4.239	122.43	4.130	0.11
0.30	5.3914	10.000	0.54	45.726	122.88	3.986	122.43	3.880	0.12
0.30	5.3914	10.000	0.54	46.727	122.88	3.724	122.43	3.627	0.13
0.30	5.3914	10.000	0.54	47.726	122.88	3.460	122.43	3.372	0.14
0.30	5.3914	10.000	0.54	48.729	122.88	3.198	122.43	3.115	0.15
0.30	5.3914	10.000	0.54	49.731	122.88	2.941	122.43	2.890	0.15
0.30	5.3914	10.000	0.54	50.729	122.88	2.694	122.43	2.645	0.15
0.30	5.3914	10.000	0.54	51.723	122.88	2.459	122.43	2.417	0.16
0.30	5.3914	10.000	0.54	52.723	122.88	2.235	122.43	2.184	0.17
0.30	5.3914	10.000	0.54	53.730	122.88	2.023	122.43	1.976	0.17
0.30	5.3914	10.000	0.54	54.728	122.88	1.827	122.43	1.774	0.17
0.30	5.3914	10.000	0.54	55.727	122.88	1.646	122.43	1.587	0.16
0.30	5.3914	10.000	0.54	56.731	122.88	1.478	122.43	1.413	0.16
0.30	5.3914	10.000	0.54	57.730	122.88	1.325	122.43	1.231	0.15
0.30	5.3914	10.000	0.54	58.724	122.88	1.186	122.43	1.073	0.14
0.30	5.3914	10.000	0.54	59.731	122.88	1.058	122.43	0.936	0.14
0.30	5.3914	10.000	0.54	60.729	122.88	0.944	122.43	0.814	0.13
0.30	5.3914	10.000	0.54	61.728	122.88	0.840	122.43	0.717	0.13
0.30	5.3914	10.000	0.54	62.728	122.88	0.747	122.43	0.633	0.12
0.30	5.3914	10.000	0.54	63.730	122.88	0.663	122.43	0.551	0.11
0.30	5.3914	10.000	0.54	64.730	122.88	0.589	122.43	0.466	0.09
0.30	5.3914	10.000	0.54	65.729	122.88	0.522	122.43	0.400	0.09
0.30	5.3914	10.000	0.54	66.730	122.88	0.462	122.43	0.334	0.10
0.30	5.3914	10.000	0.54	67.732	122.88	0.409	122.43	0.264	0.09
0.30	5.3914	10.000	0.54	68.728	122.88	0.362	122.43	0.203	0.09
0.30	5.3914	10.000	0.54	69.730	122.88	0.320	122.43	0.147	0.09
0.30	5.3914	10.000	0.54	70.733	122.88	0.283	122.43	0.111	0.08
0.30	5.3914	10.000	0.54	71.733	122.88	0.250	122.43	0.069	0.07
0.30	5.3914	10.000	0.54	72.733	122.88	0.221	122.43	0.056	0.05
0.30	5.3914	10.000	0.54	73.731	122.88	0.195	122.43	0.042	0.04
0.30	5.3914	10.000	0.54	74.732	122.88	0.172	122.43	0.029	0.03
0.30	5.3914	10.000	0.54	75.733	122.88	0.152	122.43	0.012	0.01
0.30	5.3914	10.000	0.54	76.732	122.88	0.134	122.43	0.000	0.00
0.30	5.3914	10.000	0.54	80.000	122.88	0.089	122.43		
0.30	5.3914	10.000	0.54	85.000	122.88	0.047	122.43		
0.30	5.3914	10.000	0.54	90.000	122.88	0.025	122.43		

 <p>UNAT La investigación, su esencia y su arte.</p>	<b>UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE TAYACAJA DANIEL HERNÁNDEZ MORILLO</b> <b>ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL</b>								
	<b>LABORATORIO DE HIDRAULICA - EPIC - UNAT</b>								
	<b>TESIS: "EVALUACION DEL EFECTO DE LA FRONTERAS EN EL COMPORTAMIENTO DE SOLITONES HIDRODINÁMICOS"</b>								
<b>EXPERIMENTOS DE SOLITONES HIDRODINAMICOS - FONDO GRAVA</b>									
<b>CÓDIGO : EXP_02_G</b>									
<b>PARAMETROS DE ENSAYO :</b>				<b>DATOS DE ENSAYO:</b>					
Pendiente del Canal Hidráulico (S) :		0.00 %		Amplitud Máxima (H) :		5.488 cm			
Profundidad del Agua en Reposo (h) :		10.000 cm		Posición del Hmáx :		25.006 cm			
Tiempo de Análisis (t) :		0.20 s		Velocidad Experimental de Onda (C <sub>e</sub> ) :		125.030 cm/s			
Tipo de Fondo (F) :		Grava		Error de Velocidad:		1.43%			
<b>ANÁLISIS DE DATOS EXPERIMENTALES</b>									
<b>Datos Generales</b>					<b>Teórico</b>		<b>Experimental</b>		
<b>Tiempo</b>	<b>Amplitud Máxima de Onda</b>	<b>Profundidad de Agua en Reposo</b>	<b>Relación H/h</b>	<b>Posición</b>	<b>Velocidad de Onda (Analítica)</b>	<b>Solución Analítica</b>	<b>Velocidad de Onda (Experimental)</b>	<b>Amplitud Experimental Promedio</b>	<b>Error Estandar</b>
<b>t</b>	<b>H</b>	<b>h</b>	<b>H/h</b>	<b>x</b>	$c = \sqrt{g(h+H)}$	$u(x,t) = H \operatorname{sech}^2 \left[ \sqrt{\frac{3H}{4h^3}} (x-ct) \right]$	$C_e = \frac{x_H}{t}$	$u(x)_{experimental}$	$E_s = \frac{s}{\sqrt{n}}$
<b>(s)</b>	<b>(cm)</b>	<b>(cm)</b>		<b>(cm)</b>	<b>(cm/s)</b>	<b>(cm)</b>	<b>(cm/s)</b>	<b>(cm)</b>	
0.20	5.4884	10.000	0.55	21.915	123.26	0.055	125.03	0.000	0.00
0.20	5.4884	10.000	0.55	20.915	123.26	0.063	125.03	0.008	0.01
0.20	5.4884	10.000	0.55	19.915	123.26	0.072	125.03	0.013	0.01
0.20	5.4884	10.000	0.55	18.915	123.26	0.081	125.03	0.024	0.02
0.20	5.4884	10.000	0.55	17.915	123.26	0.092	125.03	0.044	0.03
0.20	5.4884	10.000	0.55	16.915	123.26	0.105	125.03	0.060	0.05
0.20	5.4884	10.000	0.55	15.915	123.26	0.119	125.03	0.076	0.05
0.20	5.4884	10.000	0.55	14.915	123.26	0.135	125.03	0.118	0.06
0.20	5.4884	10.000	0.55	13.991	123.26	0.152	125.03	0.148	0.07
0.20	5.4884	10.000	0.55	12.990	123.26	0.172	125.03	0.169	0.08
0.20	5.4884	10.000	0.55	11.990	123.26	0.196	125.03	0.209	0.09
0.20	5.4884	10.000	0.55	10.988	123.26	0.222	125.03	0.255	0.10
0.20	5.4884	10.000	0.55	9.986	123.26	0.252	125.03	0.290	0.11
0.20	5.4884	10.000	0.55	8.984	123.26	0.285	125.03	0.345	0.12
0.20	5.4884	10.000	0.55	7.989	123.26	0.323	125.03	0.395	0.13
0.20	5.4884	10.000	0.55	6.990	123.26	0.366	125.03	0.459	0.14
0.20	5.4884	10.000	0.55	5.990	123.26	0.414	125.03	0.523	0.14
0.20	5.4884	10.000	0.55	4.991	123.26	0.468	125.03	0.580	0.14
0.20	5.4884	10.000	0.55	3.990	123.26	0.529	125.03	0.649	0.14
0.20	5.4884	10.000	0.55	2.987	123.26	0.598	125.03	0.710	0.15
0.20	5.4884	10.000	0.55	1.991	123.26	0.674	125.03	0.773	0.15
0.20	5.4884	10.000	0.55	0.991	123.26	0.760	125.03	0.845	0.15
0.20	5.4884	10.000	0.55	0.012	123.26	0.856	125.03	0.917	0.15
0.20	5.4884	10.000	0.55	1.006	123.26	0.961	125.03	1.009	0.15
0.20	5.4884	10.000	0.55	2.011	123.26	1.080	125.03	1.112	0.15
0.20	5.4884	10.000	0.55	3.006	123.26	1.210	125.03	1.217	0.17
0.20	5.4884	10.000	0.55	4.004	123.26	1.354	125.03	1.342	0.16
0.20	5.4884	10.000	0.55	5.010	123.26	1.512	125.03	1.475	0.16
0.20	5.4884	10.000	0.55	6.010	123.26	1.685	125.03	1.607	0.16
0.20	5.4884	10.000	0.55	7.003	123.26	1.871	125.03	1.755	0.16
0.20	5.4884	10.000	0.55	8.010	123.26	2.075	125.03	1.933	0.17
0.20	5.4884	10.000	0.55	9.008	123.26	2.292	125.03	2.135	0.17
0.20	5.4884	10.000	0.55	10.008	123.26	2.523	125.03	2.335	0.17
0.20	5.4884	10.000	0.55	11.007	123.26	2.767	125.03	2.562	0.16
0.20	5.4884	10.000	0.55	12.004	123.26	3.022	125.03	2.807	0.15
0.20	5.4884	10.000	0.55	13.007	123.26	3.286	125.03	3.063	0.16
0.20	5.4884	10.000	0.55	14.012	123.26	3.557	125.03	3.325	0.16
0.20	5.4884	10.000	0.55	15.007	123.26	3.826	125.03	3.598	0.16
0.20	5.4884	10.000	0.55	16.009	123.26	4.094	125.03	3.855	0.14
0.20	5.4884	10.000	0.55	17.008	123.26	4.354	125.03	4.110	0.14
0.20	5.4884	10.000	0.55	18.010	123.26	4.601	125.03	4.351	0.12
0.20	5.4884	10.000	0.55	18.992	123.26	4.824	125.03	4.596	0.11
0.20	5.4884	10.000	0.55	20.007	123.26	5.028	125.03	4.839	0.10
0.20	5.4884	10.000	0.55	21.006	123.26	5.199	125.03	5.039	0.09
0.20	5.4884	10.000	0.55	22.014	123.26	5.334	125.03	5.222	0.09
0.20	5.4884	10.000	0.55	23.012	123.26	5.428	125.03	5.357	0.09
0.20	5.4884	10.000	0.55	24.011	123.26	5.479	125.03	5.433	0.08
0.20	5.4884	10.000	0.55	25.006	123.26	5.486	125.03	5.488	0.08
0.20	5.4884	10.000	0.55	26.008	123.26	5.447	125.03	5.440	0.08
0.20	5.4884	10.000	0.55	27.014	123.26	5.364	125.03	5.367	0.09
0.20	5.4884	10.000	0.55	28.012	123.26	5.241	125.03	5.222	0.08
0.20	5.4884	10.000	0.55	29.005	123.26	5.082	125.03	5.028	0.09
0.20	5.4884	10.000	0.55	30.009	123.26	4.888	125.03	4.814	0.10
0.20	5.4884	10.000	0.55	31.008	123.26	4.668	125.03	4.586	0.11
0.20	5.4884	10.000	0.55	32.015	123.26	4.425	125.03	4.347	0.12
0.20	5.4884	10.000	0.55	33.008	123.26	4.171	125.03	4.122	0.13
0.20	5.4884	10.000	0.55	34.004	123.26	3.906	125.03	3.868	0.15
0.20	5.4884	10.000	0.55	35.009	123.26	3.634	125.03	3.602	0.15
0.20	5.4884	10.000	0.55	36.009	123.26	3.364	125.03	3.335	0.15
0.20	5.4884	10.000	0.55	37.006	123.26	3.099	125.03	3.065	0.15
0.20	5.4884	10.000	0.55	38.011	123.26	2.839	125.03	2.797	0.15
0.20	5.4884	10.000	0.55	39.007	123.26	2.593	125.03	2.528	0.15
0.20	5.4884	10.000	0.55	40.013	123.26	2.356	125.03	2.260	0.15
0.20	5.4884	10.000	0.55	41.005	123.26	2.137	125.03	2.034	0.15
0.20	5.4884	10.000	0.55	42.006	123.26	1.930	125.03	1.829	0.15
0.20	5.4884	10.000	0.55	43.015	123.26	1.736	125.03	1.625	0.15
0.20	5.4884	10.000	0.55	44.010	123.26	1.560	125.03	1.424	0.15
0.20	5.4884	10.000	0.55	45.010	123.26	1.398	125.03	1.251	0.15
0.20	5.4884	10.000	0.55	46.009	123.26	1.250	125.03	1.078	0.15
0.20	5.4884	10.000	0.55	47.010	123.26	1.116	125.03	0.930	0.14
0.20	5.4884	10.000	0.55	48.007	123.26	0.995	125.03	0.778	0.14
0.20	5.4884	10.000	0.55	49.007	123.26	0.885	125.03	0.642	0.14
0.20	5.4884	10.000	0.55	50.007	123.26	0.786	125.03	0.526	0.13
0.20	5.4884	10.000	0.55	51.012	123.26	0.698	125.03	0.440	0.12
0.20	5.4884	10.000	0.55	52.008	123.26	0.619	125.03	0.365	0.11
0.20	5.4884	10.000	0.55	53.009	123.26	0.548	125.03	0.283	0.10
0.20	5.4884	10.000	0.55	54.007	123.26	0.485	125.03	0.217	0.08
0.20	5.4884	10.000	0.55	55.007	123.26	0.429	125.03	0.162	0.07
0.20	5.4884	10.000	0.55	56.004	123.26	0.379	125.03	0.107	0.06
0.20	5.4884	10.000	0.55	57.005	123.26	0.335	125.03	0.080	0.05
0.20	5.4884	10.000	0.55	58.004	123.26	0.296	125.03	0.052	0.03
0.20	5.4884	10.000	0.55	59.007	123.26	0.261	125.03	0.027	0.02
0.20	5.4884	10.000	0.55	60.005	123.26	0.230	125.03	0.000	0.00
0.20	5.4884	10.000	0.55	65.000	123.26	0.123	125.03		
0.20	5.4884	10.000	0.55	70.000	123.26	0.065	125.03		
0.20	5.4884	10.000	0.55	75.000	123.26	0.034	125.03		

		<b>UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE TAYACAJA DANIEL HERNÁNDEZ MORILLO</b> <b>ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL</b>								
		<b>LABORATORIO DE HIDRAULICA - EPIC - UNAT</b>								
		<b>TESIS: "EVALUACION DEL EFECTO DE LA FRONTERAS EN EL COMPORTAMIENTO DE SOLITONES HIDRODINÁMICOS"</b>								
<b>EXPERIMENTOS DE SOLITONES HIDRODINÁMICOS - FONDO LISO CON PENDIENTE</b>										
<b>CÓDIGO</b> : EXP_03_LP										
<b>PARAMETROS DE ENSAYO :</b>					<b>DATOS DE ENSAYO:</b>					
Pendiente del Canal Hidráulico (S) : 5.00 %					Amplitud Máxima (H) : 5.270 cm					
Profundidad del Agua en Reposo (h) : 10.000 cm					Posición del Hmáx : 25.006 cm					
Tiempo de Análisis (t) : 0.20 s					Velocidad Experimental de Onda (Ce) : 125.030 cm/s					
Tipo de Fondo (F) : Liso con Pendiente					Error de Velocidad: 2.16%					
<b>ANÁLISIS DE DATOS EXPERIMENTALES</b>										
Datos Generales					Teórico			Experimental		
Tempo	Amplitud Máxima de Onda	Profundidad de Agua en Reposo	Relación H/h	Posición	Velocidad de Onda (Analítica)	Solución Analítica	Velocidad de Onda (Experimental)	Amplitud Experimental Promedio	Error Estandar Experimental	
t	H	h	H/h	x	$c = \sqrt{g(h+H)}$	$u(x,t) = H \operatorname{sech}^2 \left[ \sqrt{\frac{3H}{4h^3}} (x - ct) \right]$	$C_e = \frac{x_H}{t}$	$u(x)_{experimental}$	$E_s = \frac{s}{\sqrt{n}}$	
(s)	(cm)	(cm)		(cm)	(cm/s)	(cm)	(cm/s)	(cm)		
0.20	5.2696	10.000	0.53	-14.994	122.39	0.145	125.03	0.000	0.00	
0.20	5.2696	10.000	0.53	-13.994	122.39	0.165	125.03	0.013	0.01	
0.20	5.2696	10.000	0.53	-12.994	122.39	0.186	125.03	0.025	0.02	
0.20	5.2696	10.000	0.53	-11.990	122.39	0.211	125.03	0.034	0.03	
0.20	5.2696	10.000	0.53	-10.993	122.39	0.238	125.03	0.045	0.04	
0.20	5.2696	10.000	0.53	-9.992	122.39	0.269	125.03	0.052	0.05	
0.20	5.2696	10.000	0.53	-8.995	122.39	0.304	125.03	0.070	0.06	
0.20	5.2696	10.000	0.53	-7.990	122.39	0.344	125.03	0.105	0.06	
0.20	5.2696	10.000	0.53	-6.992	122.39	0.388	125.03	0.160	0.07	
0.20	5.2696	10.000	0.53	-5.990	122.39	0.438	125.03	0.203	0.07	
0.20	5.2696	10.000	0.53	-4.987	122.39	0.494	125.03	0.250	0.08	
0.20	5.2696	10.000	0.53	-3.995	122.39	0.556	125.03	0.294	0.09	
0.20	5.2696	10.000	0.53	-2.990	122.39	0.626	125.03	0.340	0.09	
0.20	5.2696	10.000	0.53	-1.989	122.39	0.705	125.03	0.402	0.09	
0.20	5.2696	10.000	0.53	-0.999	122.39	0.791	125.03	0.466	0.09	
0.20	5.2696	10.000	0.53	0.010	122.39	0.888	125.03	0.536	0.09	
0.20	5.2696	10.000	0.53	1.008	122.39	0.995	125.03	0.612	0.09	
0.20	5.2696	10.000	0.53	2.003	122.39	1.113	125.03	0.716	0.09	
0.20	5.2696	10.000	0.53	3.006	122.39	1.244	125.03	0.832	0.08	
0.20	5.2696	10.000	0.53	4.004	122.39	1.387	125.03	0.957	0.08	
0.20	5.2696	10.000	0.53	5.007	122.39	1.544	125.03	1.083	0.07	
0.20	5.2696	10.000	0.53	6.005	122.39	1.714	125.03	1.212	0.08	
0.20	5.2696	10.000	0.53	7.009	122.39	1.898	125.03	1.378	0.08	
0.20	5.2696	10.000	0.53	8.005	122.39	2.095	125.03	1.549	0.08	
0.20	5.2696	10.000	0.53	9.009	122.39	2.307	125.03	1.754	0.09	
0.20	5.2696	10.000	0.53	10.007	122.39	2.530	125.03	1.970	0.10	
0.20	5.2696	10.000	0.53	11.007	122.39	2.765	125.03	2.216	0.10	
0.20	5.2696	10.000	0.53	12.008	122.39	3.009	125.03	2.462	0.10	
0.20	5.2696	10.000	0.53	13.010	122.39	3.260	125.03	2.723	0.09	
0.20	5.2696	10.000	0.53	14.008	122.39	3.514	125.03	2.982	0.10	
0.20	5.2696	10.000	0.53	15.006	122.39	3.768	125.03	3.249	0.10	
0.20	5.2696	10.000	0.53	16.009	122.39	4.019	125.03	3.520	0.10	
0.20	5.2696	10.000	0.53	17.009	122.39	4.259	125.03	3.790	0.10	
0.20	5.2696	10.000	0.53	18.013	122.39	4.487	125.03	4.053	0.10	
0.20	5.2696	10.000	0.53	19.008	122.39	4.692	125.03	4.310	0.09	
0.20	5.2696	10.000	0.53	20.007	122.39	4.874	125.03	4.556	0.08	
0.20	5.2696	10.000	0.53	21.009	122.39	5.027	125.03	4.791	0.07	
0.20	5.2696	10.000	0.53	21.999	122.39	5.144	125.03	5.005	0.07	
0.20	5.2696	10.000	0.53	23.005	122.39	5.225	125.03	5.150	0.06	
0.20	5.2696	10.000	0.53	24.007	122.39	5.265	125.03	5.226	0.06	
0.20	5.2696	10.000	0.53	25.006	122.39	5.264	125.03	5.270	0.06	
0.20	5.2696	10.000	0.53	26.007	122.39	5.221	125.03	5.226	0.06	
0.20	5.2696	10.000	0.53	27.013	122.39	5.138	125.03	5.157	0.06	
0.20	5.2696	10.000	0.53	28.010	122.39	5.018	125.03	5.003	0.07	
0.20	5.2696	10.000	0.53	29.006	122.39	4.865	125.03	4.774	0.07	
0.20	5.2696	10.000	0.53	30.007	122.39	4.681	125.03	4.522	0.09	
0.20	5.2696	10.000	0.53	31.006	122.39	4.473	125.03	4.310	0.09	
0.20	5.2696	10.000	0.53	32.002	122.39	4.247	125.03	4.041	0.10	
0.20	5.2696	10.000	0.53	33.005	122.39	4.004	125.03	3.790	0.11	
0.20	5.2696	10.000	0.53	34.010	122.39	3.753	125.03	3.522	0.11	
0.20	5.2696	10.000	0.53	35.007	122.39	3.499	125.03	3.255	0.11	
0.20	5.2696	10.000	0.53	36.010	122.39	3.244	125.03	2.983	0.10	
0.20	5.2696	10.000	0.53	37.007	122.39	2.995	125.03	2.725	0.11	
0.20	5.2696	10.000	0.53	38.006	122.39	2.751	125.03	2.488	0.10	
0.20	5.2696	10.000	0.53	39.008	122.39	2.517	125.03	2.275	0.10	
0.20	5.2696	10.000	0.53	40.008	122.39	2.294	125.03	2.057	0.09	
0.20	5.2696	10.000	0.53	41.011	122.39	2.083	125.03	1.869	0.09	
0.20	5.2696	10.000	0.53	42.009	122.39	1.887	125.03	1.675	0.09	
0.20	5.2696	10.000	0.53	43.005	122.39	1.704	125.03	1.504	0.09	
0.20	5.2696	10.000	0.53	44.006	122.39	1.535	125.03	1.354	0.08	
0.20	5.2696	10.000	0.53	45.017	122.39	1.377	125.03	1.213	0.08	
0.20	5.2696	10.000	0.53	46.011	122.39	1.236	125.03	1.071	0.07	
0.20	5.2696	10.000	0.53	47.013	122.39	1.106	125.03	0.943	0.07	
0.20	5.2696	10.000	0.53	48.009	122.39	0.989	125.03	0.801	0.07	
0.20	5.2696	10.000	0.53	49.008	122.39	0.882	125.03	0.684	0.06	
0.20	5.2696	10.000	0.53	50.005	122.39	0.786	125.03	0.572	0.05	
0.20	5.2696	10.000	0.53	51.008	122.39	0.700	125.03	0.458	0.05	
0.20	5.2696	10.000	0.53	52.005	122.39	0.622	125.03	0.363	0.05	
0.20	5.2696	10.000	0.53	53.009	122.39	0.552	125.03	0.297	0.05	
0.20	5.2696	10.000	0.53	54.010	122.39	0.490	125.03	0.227	0.05	
0.20	5.2696	10.000	0.53	55.010	122.39	0.435	125.03	0.155	0.05	
0.20	5.2696	10.000	0.53	56.008	122.39	0.385	125.03	0.097	0.05	
0.20	5.2696	10.000	0.53	57.005	122.39	0.341	125.03	0.054	0.04	
0.20	5.2696	10.000	0.53	58.004	122.39	0.302	125.03	0.025	0.02	
0.20	5.2696	10.000	0.53	59.007	122.39	0.267	125.03	0.014	0.01	
0.20	5.2696	10.000	0.53	60.004	122.39	0.237	125.03	0.002	0.00	
0.20	5.2696	10.000	0.53	61.007	122.39	0.209	125.03	0.000	0.00	
0.20	5.2696	10.000	0.53	65.000	122.39	0.128	125.03			
0.20	5.2696	10.000	0.53	70.000	122.39	0.068	125.03			
0.20	5.2696	10.000	0.53	75.000	122.39	0.037	125.03			

		<b>UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE TAYACAJA DANIEL HERNÁNDEZ MORILLO</b> <b>ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL</b>							
		<b>LABORATORIO DE HIDRAULICA - EPIC - UNAT</b>							
		<b>TESIS: "EVALUACION DEL EFECTO DE LA FRONTERAS EN EL COMPORTAMIENTO DE SOLITONES HIDRODINÁMICOS"</b>							
<b>EXPERIMENTOS DE SOLITONES HIDRODINÁMICOS - FONDO ARENA</b>									
<b>CÓDIGO : EXP_04_A</b>									
<b>PARAMETROS DE ENSAYO :</b>					<b>DATOS DE ENSAYO:</b>				
Pendiente del Canal Hidráulico (S) : 0.00 %					Amplitud Máxima (H) : 5.134 cm				
Profundidad del Agua en Reposo (h) : 10.000 cm					Posición del Hmáx : 59.777 cm				
Tiempo de Análisis (t) : 0.50 s					Velocidad Experimental de Onda (Ce) : 119.554 cm/s				
Tipo de Fondo (F) : Arena					Error de Velocidad: 1.88%				
<b>ANÁLISIS DE DATOS EXPERIMENTALES</b>									
<b>Datos Generales</b>					<b>Teórico</b>			<b>Experimental</b>	
Tiempo	Amplitud Máxima de Onda	Profundidad de Agua en Reposo	Relación H/h	Posición	Velocidad de Onda (Analítica)	Solución Analítica	Velocidad de Onda (Experimental)	Amplitud Experimental Promedio	Error Estandar Experimental
t	H	h	H/h	x	$c = \sqrt{g(h+H)}$	$u(x,t) = H \operatorname{sech}^2 \left[ \sqrt{\frac{3H}{4h^3}} (x-ct) \right]$	$C_e = \frac{x_H}{t}$	$u(x)_{experimental}$	$E_s = \frac{s}{\sqrt{n}}$
(s)	(cm)	(cm)		(cm)	(cm/s)	(cm)	(cm/s)	(cm)	
0.50	5.1342	10.0000	0.51	15.000	121.85	0.068	119.55		
0.50	5.1342	10.0000	0.51	20.000	121.85	0.126	119.55		
0.50	5.1342	10.0000	0.51	21.776	121.85	0.157	119.55	0.000	0.00
0.50	5.1342	10.0000	0.51	22.776	121.85	0.177	119.55	0.008	0.01
0.50	5.1342	10.0000	0.51	23.775	121.85	0.200	119.55	0.015	0.01
0.50	5.1342	10.0000	0.51	24.775	121.85	0.226	119.55	0.026	0.03
0.50	5.1342	10.0000	0.51	25.775	121.85	0.255	119.55	0.035	0.04
0.50	5.1342	10.0000	0.51	26.775	121.85	0.288	119.55	0.045	0.05
0.50	5.1342	10.0000	0.51	27.773	121.85	0.325	119.55	0.056	0.06
0.50	5.1342	10.0000	0.51	28.777	121.85	0.366	119.55	0.085	0.06
0.50	5.1342	10.0000	0.51	29.781	121.85	0.413	119.55	0.135	0.07
0.50	5.1342	10.0000	0.51	30.774	121.85	0.465	119.55	0.180	0.08
0.50	5.1342	10.0000	0.51	31.776	121.85	0.523	119.55	0.227	0.09
0.50	5.1342	10.0000	0.51	32.777	121.85	0.588	119.55	0.294	0.09
0.50	5.1342	10.0000	0.51	33.779	121.85	0.661	119.55	0.378	0.10
0.50	5.1342	10.0000	0.51	34.781	121.85	0.742	119.55	0.471	0.11
0.50	5.1342	10.0000	0.51	35.773	121.85	0.831	119.55	0.576	0.12
0.50	5.1342	10.0000	0.51	36.782	121.85	0.931	119.55	0.680	0.13
0.50	5.1342	10.0000	0.51	37.782	121.85	1.041	119.55	0.806	0.14
0.50	5.1342	10.0000	0.51	38.779	121.85	1.162	119.55	0.933	0.14
0.50	5.1342	10.0000	0.51	39.779	121.85	1.294	119.55	1.068	0.14
0.50	5.1342	10.0000	0.51	40.778	121.85	1.439	119.55	1.216	0.14
0.50	5.1342	10.0000	0.51	41.783	121.85	1.598	119.55	1.357	0.14
0.50	5.1342	10.0000	0.51	42.772	121.85	1.768	119.55	1.542	0.13
0.50	5.1342	10.0000	0.51	43.777	121.85	1.953	119.55	1.725	0.13
0.50	5.1342	10.0000	0.51	44.778	121.85	2.150	119.55	1.949	0.13
0.50	5.1342	10.0000	0.51	45.779	121.85	2.360	119.55	2.194	0.13
0.50	5.1342	10.0000	0.51	46.781	121.85	2.581	119.55	2.447	0.13
0.50	5.1342	10.0000	0.51	47.780	121.85	2.811	119.55	2.715	0.13
0.50	5.1342	10.0000	0.51	48.775	121.85	3.048	119.55	2.989	0.13
0.50	5.1342	10.0000	0.51	49.778	121.85	3.292	119.55	3.300	0.15
0.50	5.1342	10.0000	0.51	50.778	121.85	3.537	119.55	3.594	0.14
0.50	5.1342	10.0000	0.51	51.774	121.85	3.779	119.55	3.894	0.14
0.50	5.1342	10.0000	0.51	52.776	121.85	4.017	119.55	4.189	0.13
0.50	5.1342	10.0000	0.51	53.773	121.85	4.243	119.55	4.461	0.13
0.50	5.1342	10.0000	0.51	54.776	121.85	4.454	119.55	4.698	0.11
0.50	5.1342	10.0000	0.51	55.773	121.85	4.644	119.55	4.870	0.12
0.50	5.1342	10.0000	0.51	56.776	121.85	4.809	119.55	4.983	0.13
0.50	5.1342	10.0000	0.51	57.779	121.85	4.944	119.55	5.042	0.13
0.50	5.1342	10.0000	0.51	58.776	121.85	5.044	119.55	5.096	0.14
0.50	5.1342	10.0000	0.51	59.777	121.85	5.108	119.55	5.134	0.14
0.50	5.1342	10.0000	0.51	60.778	121.85	5.134	119.55	5.099	0.13
0.50	5.1342	10.0000	0.51	61.779	121.85	5.120	119.55	5.054	0.13
0.50	5.1342	10.0000	0.51	62.778	121.85	5.067	119.55	4.984	0.13
0.50	5.1342	10.0000	0.51	63.780	121.85	4.976	119.55	4.875	0.11
0.50	5.1342	10.0000	0.51	64.788	121.85	4.850	119.55	4.730	0.11
0.50	5.1342	10.0000	0.51	65.782	121.85	4.694	119.55	4.549	0.08
0.50	5.1342	10.0000	0.51	66.778	121.85	4.512	119.55	4.375	0.07
0.50	5.1342	10.0000	0.51	67.778	121.85	4.307	119.55	4.155	0.07
0.50	5.1342	10.0000	0.51	68.779	121.85	4.084	119.55	3.934	0.07
0.50	5.1342	10.0000	0.51	69.783	121.85	3.849	119.55	3.694	0.06
0.50	5.1342	10.0000	0.51	70.773	121.85	3.609	119.55	3.442	0.06
0.50	5.1342	10.0000	0.51	71.778	121.85	3.363	119.55	3.195	0.07
0.50	5.1342	10.0000	0.51	72.772	121.85	3.121	119.55	2.953	0.07
0.50	5.1342	10.0000	0.51	73.777	121.85	2.879	119.55	2.713	0.08
0.50	5.1342	10.0000	0.51	74.780	121.85	2.646	119.55	2.486	0.09
0.50	5.1342	10.0000	0.51	75.778	121.85	2.423	119.55	2.280	0.09
0.50	5.1342	10.0000	0.51	76.778	121.85	2.210	119.55	2.109	0.08
0.50	5.1342	10.0000	0.51	77.780	121.85	2.008	119.55	1.953	0.08
0.50	5.1342	10.0000	0.51	78.775	121.85	1.821	119.55	1.809	0.07
0.50	5.1342	10.0000	0.51	79.778	121.85	1.646	119.55	1.663	0.07
0.50	5.1342	10.0000	0.51	80.783	121.85	1.483	119.55	1.531	0.07
0.50	5.1342	10.0000	0.51	81.778	121.85	1.335	119.55	1.388	0.07
0.50	5.1342	10.0000	0.51	82.776	121.85	1.199	119.55	1.256	0.07
0.50	5.1342	10.0000	0.51	83.781	121.85	1.074	119.55	1.139	0.07
0.50	5.1342	10.0000	0.51	84.780	121.85	0.961	119.55	1.002	0.06
0.50	5.1342	10.0000	0.51	85.780	121.85	0.859	119.55	0.901	0.05
0.50	5.1342	10.0000	0.51	86.778	121.85	0.767	119.55	0.794	0.04
0.50	5.1342	10.0000	0.51	87.777	121.85	0.683	119.55	0.697	0.03
0.50	5.1342	10.0000	0.51	88.775	121.85	0.609	119.55	0.606	0.03
0.50	5.1342	10.0000	0.51	89.775	121.85	0.541	119.55	0.520	0.03
0.50	5.1342	10.0000	0.51	90.778	121.85	0.481	119.55	0.441	0.03
0.50	5.1342	10.0000	0.51	91.774	121.85	0.428	119.55	0.364	0.03
0.50	5.1342	10.0000	0.51	92.777	121.85	0.379	119.55	0.293	0.04
0.50	5.1342	10.0000	0.51	93.777	121.85	0.337	119.55	0.224	0.04
0.50	5.1342	10.0000	0.51	94.776	121.85	0.299	119.55	0.157	0.03
0.50	5.1342	10.0000	0.51	95.772	121.85	0.265	119.55	0.095	0.03
0.50	5.1342	10.0000	0.51	96.778	121.85	0.234	119.55	0.041	0.03
0.50	5.1342	10.0000	0.51	97.774	121.85	0.208	119.55	0.015	0.01
0.50	5.1342	10.0000	0.51	98.778	121.85	0.184	119.55	0.000	0.00
0.50	5.1342	10.0000	0.51	100.000	121.85	0.158	119.55		
0.50	5.1342	10.0000	0.51	105.000	121.85	0.086	119.55		
0.50	5.1342	10.0000	0.51	110.000	121.85	0.046	119.55		

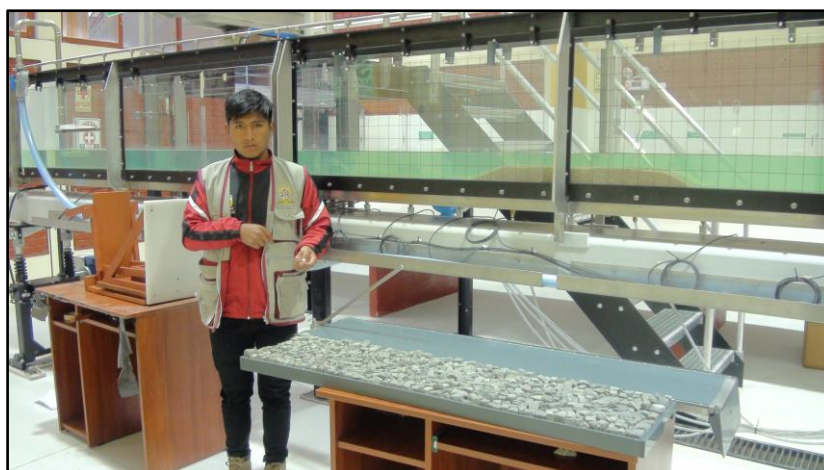
## ANEXO 5: PANEL FOTOGRÁFICO



*Figura A. 1: Laboratorio de Hidráulica*



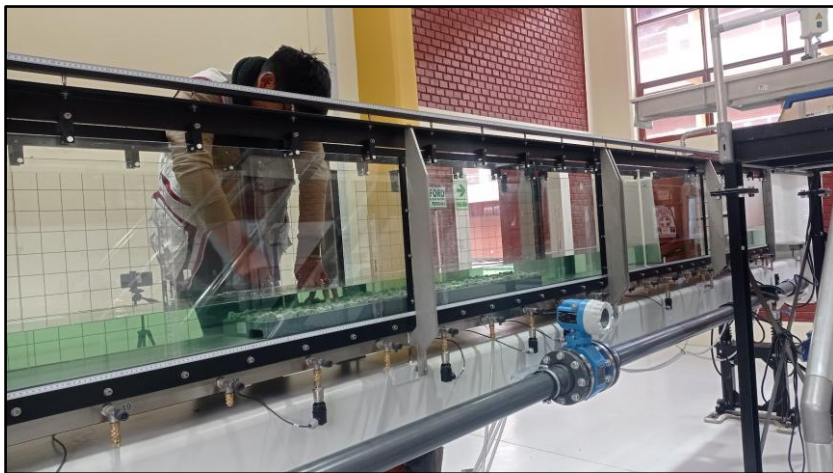
*Figura A. 2: Laboratorio de Hidráulica y el generador de solitones*



*Figura A. 3: Laboratorio de Hidráulica, generador de solitones y los fondos*



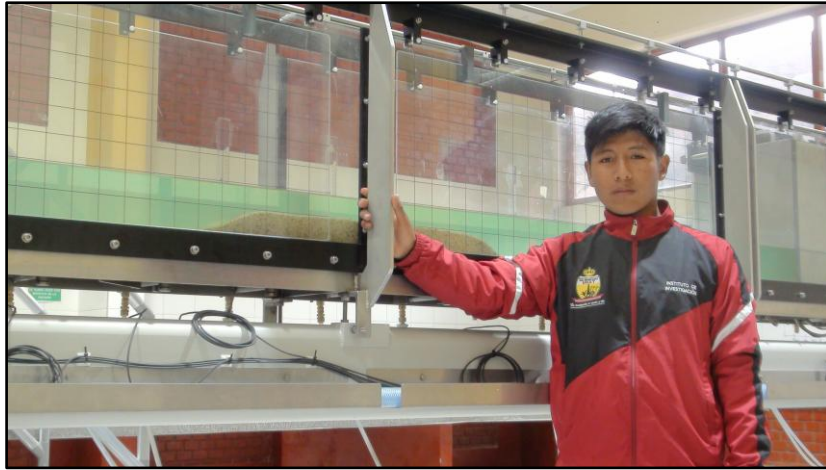
*Figura A. 4: Instalación de fondo liso con pendiente en el canal hidráulico*



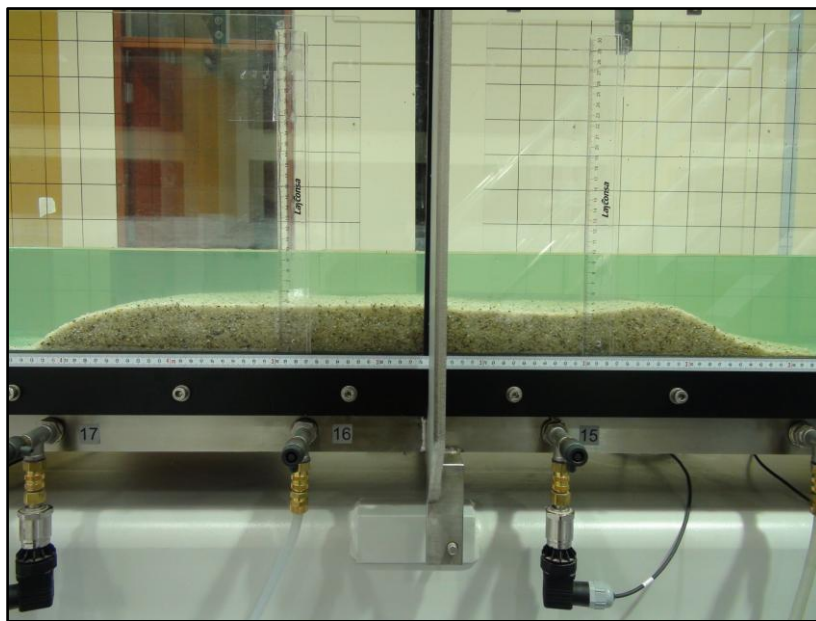
*Figura A. 5: Instalación de fondo de grava en el canal hidráulico*



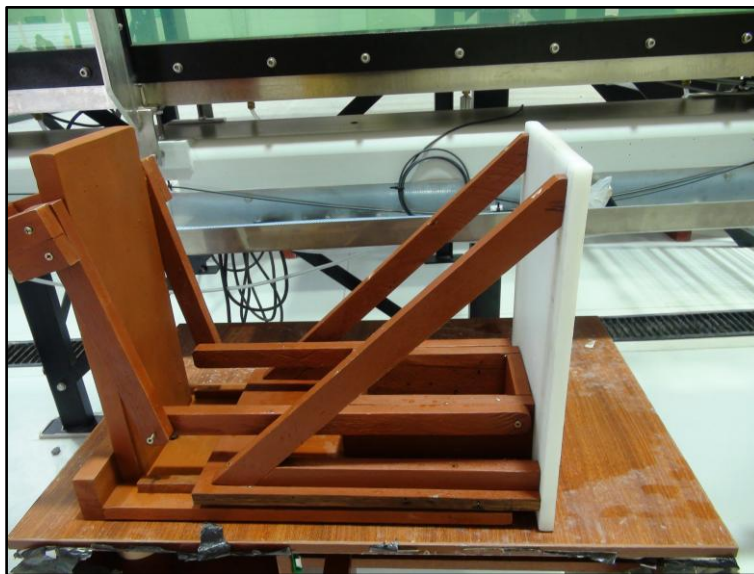
*Figura A. 6: Instalación de fondo de grava en el canal hidráulico*



*Figura A. 7: Canal hidráulico con fondo de arena*



*Figura A. 8: Canal hidráulico con fondo de arena*



*Figura A. 9: Generador tipo empuje de solitones hidrodinámicos*

Asunto: Prueba ~~02~~<sup>03</sup> del prototipo V2 Fecha: 12/06/24

Objetivo: ✓ Hacer mediciones de Amplitud de onda a diferentes  $h$ .

Descripción:

Se realizó las pruebas con el prototipo V2, para la generación de Solitones hidrodinámicos.

Con el mismo procedimiento en la prueba 02 se generó los Solitones hidrodinámicos.

1. llenado del Canal con la bomba a  $20 \text{ m}^3/\text{h}$
2. Cierre de válvula de la bomba
3. Cierre Puerta del Disipador de olas en un Extremo del canal
4. Generación de Solitón a diferentes  $S$  determinados.

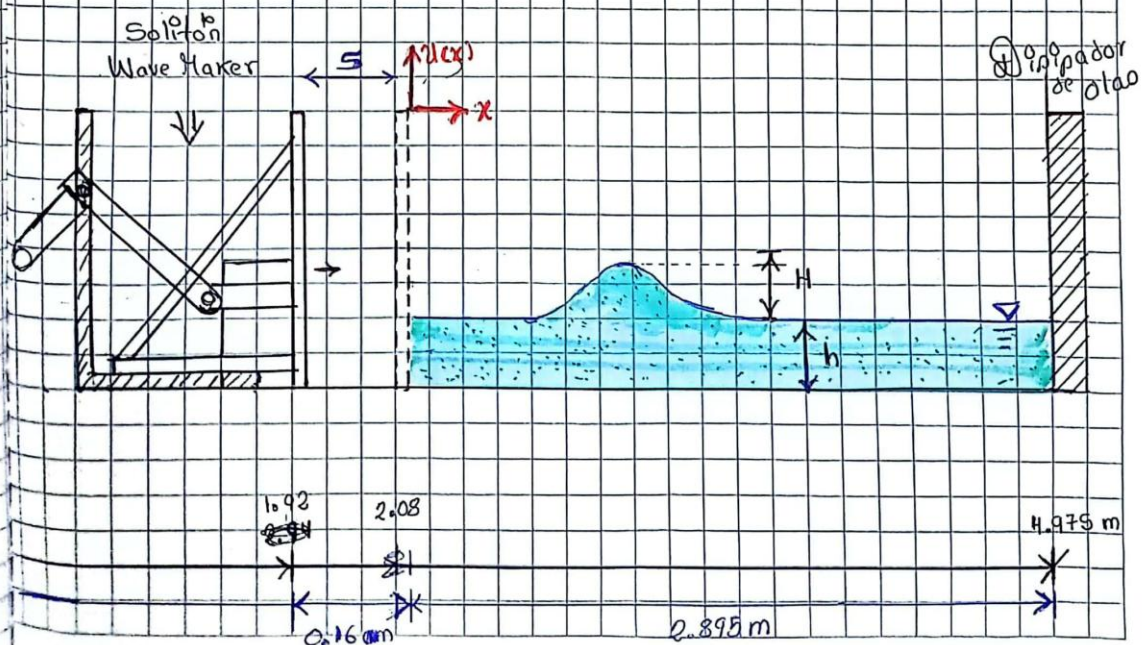


Figura A. 10: Notas en cuaderno de laboratorio, esquemas de experimentos

Evento: Prueba 04 del prototipo v2 Fecha: 1/06/24

Objetivo:  
 ✓ Hacer mediciones de, Realizar ensayos con el prototipo  
 v2 con  $h = 10 \text{ cm}$  y  $h = 8 \text{ cm}$ .

Descripción

Materiales:  
 \* 2 cámaras fotográficas Resolución HD (1920 x 1080 P)  
 y con una tasa de video de 30 FPS  
 \* 2 trípodes.

Esquema de Ensayo

Canal Hidráulico UNAT

Wavemaker

Camara 02 30 FPS

Disipador de olas

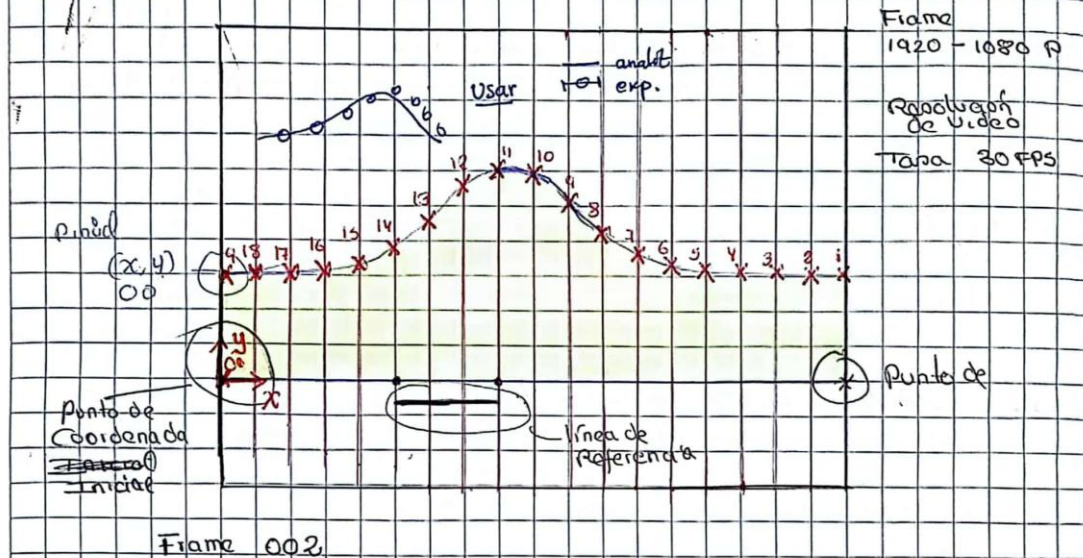
Camara 01 60 FPS

Donde:  
 $h$ : Profundidad del Agua en Reposo  
 $H$ : Amplitud del Solitón Hidrodinámico  
 $c$ : Velocidad de onda  
 $S$ : Desplazamiento horizontal de la Paleta

CS Scanned with CamScanner

Figura A. 11: Notas en cuaderno de laboratorio, esquemas de experimentos

Image J nos va permitir Colocar puntos en el perfil de la Onda Solitaria y obtener sus coordenadas de manera Precisa.



### Proceso en Image J.

\* Set scale  $\rightarrow$  Definir Escala mediante una línea de referencia.  
 $\rightarrow$  Definir escala en cm

• Definir mediante un punto las Coordenada  $(0,0)$

• Definir Grilla

Esto con el fin de obtener las líneas verticales de referencia y picar de manera Exacta en el perfil., a cada  $1\text{cm}$   
 $\square 1\text{cm}^2$

• Asignar puntos en el perfil

Pinchar los puntos en el Perfil de la onda

Ctrl + Click  $\rightarrow$  Eliminar puntos

Figura A. 12: Notas en cuaderno de laboratorio, apuntes importantes.