



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENIDA DE  
MEXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN  
INGENIERÍA

INSTITUTO DE INGENIERÍA

CARACTERIZACIÓN HIDRODINÁMICA DE FLUJOS  
TURBULENTOS POR MEDIO DE LA TÉCNICA DE  
TRAZADO DE BURBUJAS

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN INGENIERÍA**

INGENIERÍA CIVIL - HIDRÁULICA

P R E S E N T A :

**CÉSAR EDWIN GUTIÉRREZ VALENCIA**

DIRECTOR DE TESIS:

**DR. ADRIÁN PEDROZO ACUÑA**

MÉXICO D.F. , CIUDAD UNIVERSITARIA

2012



**Jurado asignado:**

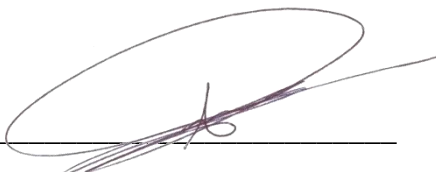
**Presidente:** Dr. Gabriel Echávez Aldape  
**Secretario:** Dr. Carlos Escalante Sandoval  
**Vocal:** Dr. Adrián Pedrozo Acuña  
**Suplente:** Dr. Rodolfo Silva Casarín  
**Suplente:** Dr. Edgar G. Mendoza Baldwin

**Lugar de realización de tesis:**

Instituto de Ingeniería UNAM

**TUTOR DE TESIS**

Dr. Adrián Pedrozo Acuña



FIRMA

*A mis padres Ubaldo Gutiérrez y Sara Valencia,  
mi respeto, agradecimiento y amor eterno. Gracias  
por el esfuerzo y dedicación que me brindaron.*

*A mi hermana Sandra Gutiérrez Valencia por su apoyo incondicional.*

## **Agradecimientos**

*Sin duda esta etapa de mi vida es una de las más satisfactorias que he tenido, ya que gracias al esfuerzo y dedicación de varios años de trabajo hoy con orgullo puedo gritar a los cuatro vientos lo he logrado. Es difícil pensar y sobre todo agradecer a todas esas personas que han contribuido con esos buenos consejos que me han ayudado a pensar positivo y sobre todo a seguir adelante.*

*A ese **poder superior** por otorgarme salud, ya que sin ella uno es débil ante cualquier adversidad, por permitirme vivir en libertad y sobre todo por guiarme por el camino de la verdad.*

*A la **Universidad Nacional Autónoma de México**, por abrirme sus puertas para emprender el vuelo hacia el conocimiento.*

*A la **Facultad de Ingeniería**, que me forjo como ingeniero civil, quien tiene una gran responsabilidad con la sociedad y sobre todo que me permitió conocer nuevos amigos.*

*Al **Instituto de Ingeniería**, por la oportunidad de colaborar en proyectos académicos, y porque gracias a su infraestructura me permitió llevar a cabo pruebas en el canal de oleaje y con ello la obtención de resultados para el desarrollo de éste trabajo.*

*A mis **profesores**, gracias a cada uno de ellos por esmerarse y transmitir su conocimiento, para la formación de nosotros sus alumnos.*

*Gracias al **Dr. Adrián Pedrozo Acuña**, por su apoyo, orientación, confianza, enseñanza y sobre todo por su paciencia en la elaboración de este trabajo.*

*Gracias a los **Drs. Rodolfo Silva y Edgar Mendoza** por su valioso apoyo.*

*A mis **compañeros** de cubículo Ariadna, Alejandra, Raúl, Miguel y muy especialmente a **Juan Pablo** por brindarme su amistad y apoyo incondicional.*

*A **Luis Hidalgo (Amigo incondicional)**, quien me motivo a realizar estudios de posgrado y sobre todo por esos años de amistad en la Facultad de Ingeniería.*

*Gracias a mis **padres y hermana**, por ser una familia y por brindarme su apoyo incondicional.*

## **Resumen**

El oleaje se genera costa afuera por vientos incidentes que soplan sobre grandes áreas de la superficie del mar, es resultado de la transferencia de energía de la atmosfera al mar. Esta energía se propaga hasta la zona de rompientes, que es la región cercana a la línea de costa, donde el movimiento irrotacional del oleaje en aguas profundas es transformado a través de la rotura del oleaje en un rango de movimiento del fluido con diferentes escalas espaciales y temporales que van desde flujos medios hasta turbulentos. Como resultado de este proceso se genera una intensa movilización de sedimento en el fondo marino. Por lo tanto, la respuesta morfológica de la playa a cualquier clima de oleaje dado es gobernada por la hidrodinámica cercana a la costa.

Las mediciones del campo de velocidad en la rotura del oleaje, ha sido de gran interés para numerosos investigadores. En años recientes, la comprensión de la cinemática y estructuras de flujo de la rotura de oleaje ha mejorado notoriamente en los avances en las técnicas de medición. Sin embargo, se ha enfatizado que la adquisición de información con técnicas de medición actuales, se limita a la parte del flujo que está libre de burbujas de aire. La dificultad ha sido solucionada con la técnica de trazado de burbujas, la cual ha sido empleada para medición de velocidad de flujo en regiones arreadas. A pesar de que la técnica ha sido ampliamente utilizada en el estudio de la propagación de flujo sobre estructuras verticales, por primera vez la técnica de trazado de burbujas ha sido utilizada para la estimación de campo de velocidades inducido por la rotura de tipo voluta sobre una pendiente impermeable. Atendiendo particularmente las características del flujo en las zonas de rompiente y lavado. Las mediciones con la técnica de trazado de burbujas ha sido comparada en las zonas de rotura y lavado empleando un velocímetro acústico, lo que permite una discusión sobre la incertidumbre asociada con las dos técnicas empleadas.

## **Abstract**

Ocean waves are generated offshore by the incident winds blowing on large areas of the sea surface, these are the result of the energy transfer from the atmosphere to the sea. This energy propagates all its way up to the surf zone, which is the region close to the shoreline where the irrotational motion of deep water waves is transformed through wave breaking into a range of fluid motions with different spatial and temporal scales ranging from mean fluxes to turbulence. As a result of these processes an intense sediment mobilisation takes place at the bed. Therefore, the morphological response of a beach to any given wave climate is governed by nearshore hydrodynamics.

The measurement of velocity fields in breaking waves has been of great interest to numerous researchers. In recent years, the understanding of the kinematics and flow structure of breaking waves has been notably improved due to the advances in measurement techniques. However, it has been emphasised that the acquisition of reliable information with current measurement techniques is limited to the part of the flow which is free of air bubbles. The latter difficulty has been overcome by the Bubble Image Velocimetry (BIV) technique, which is employed in this investigation to enable measurements of flow velocity in the aerated breaking zone. Although this technique has been widely used to study flow propagation in front of vertical structures, this study represents the first time BIV has been used to estimate the velocity field induced by the propagation of a plunging wave on an impermeable slope. Particular attention is given to the characteristics of the flow in the surf and swash zones as a unit. BIV measurements are compared at these two locations (swash and surf zones), against those recorded with an acoustic Doppler velocimeter (ADV), enabling a discussion on the uncertainty associated with both experimental techniques.



4.	Velocimetría por trazado de burbujas aplicada a oleaje en rotura tipo voluta .....	46
4.1	Introducción .....	46
4.2	Metodología de la velocimetría por trazado de burbujas (BIV) .....	47
4.2.1	Definición de los parámetros fotográficos.....	48
4.2.2	Apertura de lente .....	49
4.2.3	Distancia focal .....	51
4.2.4	Distancia entre la cámara y el sujeto en foco .....	52
4.2.5	Fotografías de alta velocidad (imágenes naturales).....	53
4.2.6	Procesamiento de imágenes (inversión de color y recorte de la zona de interés).....	56
4.2.7	Algoritmo de correlación.....	58
4.2.8	Cálculo del campo de velocidades.....	68
4.3	Validación de la técnica BIV .....	69
5.	Análisis de Resultados.....	74
5.1	Introducción .....	74
5.2	Selección de la información.....	75
5.3	Análisis de incertidumbre en series temporales acústicas .....	76
5.4	Resultados prueba H=18 cm, T=1.5 s.....	77
5.5	Resultados prueba H=10 cm; T=1.5 s.....	81
5.6	Análisis de incertidumbre en datos de velocidad del BIV .....	83
5.6.1	Incertidumbre asociada a la distancia focal .....	85
5.7	Comparación y validación de series temporales en la zona de rotura (BIV/ADV).....	88
5.8	Evolución espacio-temporal del campo de velocidades .....	91
6.	Conclusiones.....	102
6.1	Futuras líneas de investigación .....	103
7.	Bibliografía.....	106



ANEXO A.....114

**Lista de Figuras**

**Figura 2.1** Esquemas de Leonardo Da Vinci, sobre estructuras de flujo generadas a la salida de agua por un orificio (margen izquierda), así como estructuras formadas alrededor de obstáculos (margen derecha). (Da Vinci c.1508)..... 8

**Figura 2.2** Esquema gráfico del arreglo experimental de Reynolds para la visualización de la transición de regímenes en fluidos; a)Reynolds y su instrumento; b)Ejemplo de la inyección de colorante en el tubo. .... 9

**Figura 2.3** Líneas de flujo alrededor de un cilindro ( $Re=10000$ )..... 10

**Figura 2.4** Fotografía del túnel de agua construido por Ludwing Prandtl (1904) para la visualización de líneas de flujo ..... 11

**Figura 2.5** Esquema gráfico del instrumento de Prandtl (1904)..... 11

**Figura 2.6** Imágenes obtenidas por Prandtl (1904) para diferentes intensidades de luminosidad. a) Más intensidad de luz; b) Menos intensidad de luz..... 12

**Figura 2.7** Ejemplo de imagen obtenida por medio de un sistema PTV ..... 15

**Figura 2.8** (a) Imagen de partícula tomada en un tiempo  $t_0$ ; (b) Imagen de partículas en un tiempo  $t_1$ ; c) Desplazamiento estimado de las partículas en un intervalo  $t_1-t_0$  ..... 16

**Figura 2.9** Ejemplo de imagen obtenida con un sistema PIV. .... 17

**Figura 2.10** Instrumentación utilizada en la puesta punto de la técnica PIV. .... 18

**Figura 2.11** Ejemplo de imagen obtenida con un método LSV . .... 19

**Figura 2.12** Remolinos de descenso oblicuo generados durante el proceso de rotura. La línea blanca representa el eje de los vórtices generados. .... 20

**Figura 2.13** Imágenes de la rotura de una ola en tipo voluta, mostrando la formación, volcamiento y elongación del chorro. (Perlin et al., 1996) ..... 22

**Figura 2.14** Imágenes obtenidas con PIV por Chang y Liu ..... 23

**Figura 2.15** Vectores de velocidad obtenidos en la zona de lavado..... 24

**Figura 2.16** Ejemplo de imágenes obtenidas con la técnica BIV (Ryu et al., 2005). En el panel izquierdo se muestra una ola rompiendo sobre un muro vertical. En el panel derecho se muestra el campo de velocidades obtenidas con la técnica del BIV..... 25

<b>Figura 2.17</b>	Cronología de trabajos utilizando técnicas de visualización de flujo .....	26
<b>Figura 3.1</b>	Fotografía en perspectiva del canal de oleaje del Instituto de Ingeniería de la UNAM.	29
<b>Figura 3.2</b>	Rampa de tipo impermeable utilizada en el laboratorio de olas del IIUNAM. ....	30
<b>Figura 3.3</b>	a) Esquema posterior del diseño de la rampa en dos partes; b) Piezas de acrílico utilizados como cubierta superior de la rampa. ....	31
<b>Figura 3.4</b>	Sistema de sujeción para la rampa impermeable donde se colocan los sensores de presión. ....	31
<b>Figura 3.5</b>	a)Características geométricas del sensor de presión; b)Fotografía del sensor utilizado en laboratorio. ....	33
<b>Figura 3.6</b>	a) Fotografía que ilustra la colocación del corrientímetro acústico dentro del canal de oleaje del IIUNAM; b) Fotografía de detalle del corrientímetro acústico marca Nortek SA. ....	34
<b>Figura 3.7</b>	Sensores que se utilizaron para la medición de altura de ola.....	35
<b>Figura 3.8</b>	Monitor de sondas para la calibración de sensores de nivel. ....	36
<b>Figura 3.9</b>	Armado de la rampa utilizada para la realización de las pruebas en laboratorio.....	36
<b>Figura 3.10</b>	Esquema de colocación de las láminas de acrílico sobre la estructura de aluminio. ...	37
<b>Figura 3.11</b>	Colocación de sensores de presión en la placa de acero inoxidable. ....	37
<b>Figura 3.12</b>	Sensores de presión ubicados en la zonas de lavado (a) y rompientes (b).....	38
<b>Figura 3.13</b>	Colocación de placas de acero inoxidable. ....	38
<b>Figura 3.14</b>	Ubicación y distancia entre sensores de nivel y velocímetro acústico. ....	39
<b>Figura 3.15</b>	Cámara Fastec Hispec utilizada en laboratorio.....	42
<b>Figura 3.16</b>	a) Fotografía del reflector tipo Fresnel; b)Ángulos de desplazamiento de la lámpara al interior del reflector.....	43
<b>Figura 4.1</b>	Metodología para la implementación de la técnica BIV.....	47
<b>Figura 4.2</b>	Esquema de definición de la profundidad de campo (zona entre las líneas horizontales punteadas) en el plano XZ (vista en planta). ....	49
<b>Figura 4.3</b>	a)Cámara de alta velocidad Fastec; b) Lente de 25mm utilizado. ....	50
<b>Figura 4.4</b>	Diámetros de apertura en el lente y su relación con el número f del lente fotográfico..	51
<b>Figura 4.5</b>	Esquema de la distancia focal para un lente óptico (a) y uno fotográfico (b). ....	52
<b>Figura 4.6</b>	Perilla de regulación para la definición de la distancia (L) entre cámara y sujeto de foco. ....	53
<b>Figura 4.7</b>	Ubicación de la instrumentación utilizada para el desarrollo de la técnica del BIV.....	54
<b>Figura 4.8</b>	Instantes no consecutivos de imágenes naturales para una ola en rotura (H=10cm, T01.5s) .....	55

<b>Figura 4.9</b> Ejemplo de las imágenes procesadas con la técnica de inversión de color (H=10cm; T=1.5s). .....	57
<b>Figura 4.10</b> Definición del área de interrogación de 32x32 pixeles empleada para la aplicación del MQD en este estudio. ....	58
<b>Figura 4.11</b> Seguimiento de partículas superponiendo dos imágenes consecutivas. ....	59
<b>Figura 4.12</b> Ejemplo de ubicación de burbujas o partículas dentro de una misma área de interrogación en dos fotografías consecutivas.....	60
<b>Figura 4.13</b> Evaluación de funciones D por medio de un método MQD. ....	61
<b>Figura 4.14</b> Cuatro diferentes tamaños de ventana de interrogación para el caso de specke de rayo láser (modificada de Gui y Merzkirch, 2000). ....	65
<b>Figura 4.15</b> Dependencia del error cuadrático medio en función del tamaño de la ventana de interrogación. ....	65
<b>Figura 4.16</b> Definición de las funciones correlacionadas para el cálculo de la función de seguimiento de correlación $\Phi(m,n)$ con la TRF. ....	67
<b>Figura 4.17</b> Imagen de muestra en la que se hace referencia a la retícula cuadrada para la definición del factor de proporción k en todas las fotografías. ....	69
<b>Figura 4.18</b> Ubicación del velocímetro acústico sobre la rampa impermeable (a) zona de rotura; (b) zona de vaivén.....	70
<b>Figura 4.19</b> Comparación de velocidades horizontales en las zonas de rotura (a) y vaivén (b) para una ola de H=0.10m y T=1.5s; línea sólida – Mediciones ADV; puntos – Mediciones BIV. ....	71
<b>Figura 4.20</b> Comparación de velocidades horizontales en las zonas de rotura (a) y vaivén (b) para una ola de H=0.18m y T=1.5s; línea sólida – Mediciones ADV; puntos – Mediciones BIV. ....	72
<b>Figura 5.1</b> a) Instalación experimental en laboratorio; b) Mediciones detalladas con ADV para H=18cm, T=1.5s y c) H=10cm, T=1.5s. ....	75
<b>Figura 5.2</b> Muestra de mediciones con ADV (H=10cm; T=1.5s) –a) Para un punto localizado antes de la zona de rotura; b) Punto localizado cerca del impacto del oleaje en voluta; c) Punto localizado en la zona de lavado. ....	77
<b>Figura 5.3</b> Velocidad media horizontal (●) e incertidumbre (___) para x=1.83m, z=2.2cm y condición de oleaje H=18cm y T=1.5s.....	79
<b>Figura 5.4</b> Velocidad media horizontal (●) e incertidumbre (___) para x=1.83m, z=5.5 cm y condición de oleaje H=18cm y T=1.5s.....	79
<b>Figura 5.5</b> Velocidad media horizontal (●) e incertidumbre (___) para x=1.83m, z=3.8 cm y condición de oleaje H=18cm y T=1.5s.....	80

<b>Figura 5.6</b> Velocidad media horizontal (●) e incertidumbre (___) para $x=1.91\text{m}$ , $z=3.8\text{ cm}$ y condición de oleaje $H=18\text{cm}$ y $T=1.5\text{s}$ .....	81
<b>Figura 5.7</b> Velocidad media horizontal (●) e incertidumbre (___) para $x=1.91\text{m}$ , $z=5.4\text{ cm}$ y condición de oleaje $H=18\text{cm}$ y $T=1.5\text{s}$ .....	81
<b>Figura 5.8</b> Velocidad media horizontal (●) e incertidumbre (___) para $x=1.93\text{m}$ , $z=3.2\text{ cm}$ y condición de oleaje $H=18\text{cm}$ y $T=1.5\text{s}$ .....	82
<b>Figura 5.9</b> Velocidad media horizontal (●) e incertidumbre (___) para $x=2.24\text{ m}$ , $z=1.8\text{ cm}$ y condición de oleaje $H=18\text{cm}$ y $T=1.5\text{s}$ .....	83
<b>Figura 5.10</b> (●)Velocidades medias calculadas e (___) incertidumbre en la mediciones obtenidas por el BIV. Zona de rompientes ( $H=10\text{cm}$ ; $T=1.5\text{ s}$ ).....	85
<b>Figura 5.11</b> (●)Velocidades medias calculadas e (___) incertidumbre en la mediciones obtenidas por el BIV. Zona de lavado ( $H=10\text{cm}$ ; $T=1.5\text{ s}$ ).....	85
<b>Figura 5.12</b> (a) Localización de los puntos seleccionados; Velocidades horizontales instantáneas derivadas del BIV, estimadas con diferentes distancia focales ( $H=10\text{cm}$ ; $T=1.5\text{s}$ ). Panel (b) zona de chorro y panel (c) zona de lavado. ▲ – $L= 0.9\text{ m}$ ; ● – $L = 1.1\text{ m}$ ; ◆ - $L= 1.0\text{ m}$ . Línea de velocidades medias estimadas L=0.9 m; --- line $L=1.1\text{ cm}$ ; ... line, $L=1.0\text{ cm}$ .....	87
<b>Figura 5.13</b> Comparación de velocidades horizontales en las zona de rompientes, ( ) línea continua representa mediciones obtenidas con el ADV); (● representa mediciones obtenidas con BIV).....	89
<b>Figura 5.14</b> Comparación de velocidades horizontales en las zona de rompientes, ( ) línea continua representa mediciones obtenidas con el ADV); (● representa mediciones obtenidas con BIV).....	90
<b>Figura 5.15</b> Instantes de campos de velocidad obtenidos con la técnica del (BIV), para la fase de rotura en voluta ( $H=0.10\text{ m}$ ; $T=1.5\text{s}$ ). .....	93
<b>Figura 5.16</b> Resultados de la componente horizontal de la velocidad ( $H=10\text{cm}$ ; $T=1.5\text{s}$ ). .....	94
<b>Figura 5.17</b> Resultados de la componente vertical de la velocidad ( $H=10\text{cm}$ ; $T=1.5\text{s}$ ).....	95
<b>Figura 5.18</b> Instantes de campos de velocidad obtenidos con la técnica del (BIV), para la fase de rotura en voluta ( $H=0.18\text{ m}$ ; $T=1.5\text{ s}$ ).....	98
<b>Figura 5.19</b> Resultados de velocidades horizontales ( $H=18\text{cm}$ ; $T=1.5\text{s}$ ).....	99
<b>Figura 5.20</b> Resultados de velocidades verticales ( $H=18\text{cm}$ ; $T=1.5\text{s}$ ).....	100

## Lista de Tablas

<b>Tabla 3.1</b> Distancia entre sensores de nivel y velocímetro acústico (V1) .....	39
<b>Tabla 3.2</b> Condiciones de oleaje seleccionadas.....	40
<b>Tabla 5.1</b> Parámetros fotográficos seleccionados para las tres distancias focales (L) estudiadas....	86
<b>Tabla 5.2</b> Velocidades medias y desviación estándar de velocidad horizontal estimada con la técnica del BIV en tres diferentes distancias focales. ....	88

**Capítulo 1**  
**INTRODUCCIÓN**

### 1. Introducción

En años recientes, dentro del campo de la ingeniería costera, existe la tendencia mundial de diseñar soluciones que sean compatibles con los procesos físicos que se observan en la costa. El manejo sustentable de las zonas costeras requiere, sin lugar a dudas, de un mejor entendimiento de los procesos regionales que ocurren en ella. Este mejoramiento tiene su base, en la identificación de mecanismos fundamentales involucrados en la dinámica litoral y los procesos asociados al transporte de sedimentos.

Resulta evidente, que a través de una mejor comprensión de la dinámica del material en la playa, se abre la puerta a una mejor gestión de los recursos en zonas costeras. Las decisiones respaldadas en la comprensión de los fenómenos físicos, permiten la reducción de riesgos a la población y daños a infraestructura asociados a la dinámica marina (ej. erosión e inundación).

El oleaje se genera como resultado de la transferencia de energía de los vientos hacia la superficie del mar en áreas. No obstante que el área de generación puede ser muy extensa, una proporción muy importante de la energía del oleaje es disipada en una pequeña área cercana a la costa, conocida como zona de rompientes. Esta región representa la zona donde ocurren los cambios morfológicos más dinámicos. Por lo tanto, es clara la importancia de conocer y representar adecuadamente la cinemática del oleaje en condiciones de rotura.

La zona donde se produce la rotura por fondo es una franja de la playa con profundidad somera, donde se da un fenómeno de transformación de energía ordenada, proveniente de aguas más profundas, en turbulencia, sonido y calor. Como resultado de la acción de estos procesos disipativos, se genera una intensa agitación de sedimentos del fondo marino. Más aún, el proceso de rotura es capaz de configurar una línea de costa, por medio de las fuertes corrientes transversales y longitudinales que se producen como consecuencia de su acción sobre la playa. Las corrientes generadas pueden así transportar grandes cantidades de sedimento en ambas direcciones, y en algunos lugares pueden alcanzar volúmenes tan grandes como cientos de miles de metros cúbicos de arena al año (Pedrozo-Acuña, 2011).

Sin embargo, a pesar de su importancia en el campo, a nivel internacional diversos investigadores han reconocido que la determinación de las velocidades en la zona de rompientes representa uno de los problemas más complejos dentro del campo de la ingeniería costera. Es por ello que la comprensión y descripción de los flujos en esta zona, sigue siendo un tema totalmente abierto, resultado de la gran complejidad para obtener mediciones precisas en condiciones de flujo altamente aleatorias y turbulentas.

Es por ello que el propósito de esta tesis consiste en investigar y cuantificar el campo de velocidades asociado a oleaje en rotura (energética) por medio de una metodología integral. Esta metodología contempló la realización de experimentos de laboratorio en el canal de oleaje del Instituto de Ingeniería de la UNAM, además del desarrollo, la puesta a punto de y validación de una técnica no intrusiva para la medición del campo de velocidades en flujos turbulentos (e.g. Ryu *et al.*, 2005).

Dicho método, conocido como velocimetría por trazado de burbujas (Bubble Image Velocimetry, en inglés) utiliza fotografías tomadas a alta velocidad para extraer el campo de velocidades de un flujo. Así, por medio del seguimiento del movimiento de las burbujas entre dos imágenes consecutivas, y si se conoce el intervalo de tiempo entre fotografías, es posible estimar la velocidad del flujo. De esta forma, es posible determinar las velocidades en una región con alto contenido de aire donde otros instrumentos de medición han resultado poco efectivos (ej. velocimetría por trazado de partículas o velocímetros acústicos).

El estudio que se presenta en este trabajo de tesis, forma parte de una investigación integral realizada en la Coordinación de Hidráulica del Instituto de Ingeniería de la UNAM, en la que se ha investigado la evolución del campo de presiones y velocidades inducido por una ola en rotura tipo voluta incidiendo sobre una pendiente impermeable (ver Pedrozo-Acuña *et al.*, 2011).

Una contribución importante del presente estudio, consiste en la utilización de dos técnicas diferentes para la cuantificación del campo de velocidades inducido por la rotura del oleaje tipo voluta. La primera de ellas, es considerada como una técnica intrusiva (ej. velocímetro acústico), mientras que la segunda puede ser vista como un método no intrusivo o de percepción remota (BIV). De tal manera que esto permite la generación de una discusión



muy valiosa, sobre la validez e incertidumbre asociadas a ambos tipos de mediciones. Considerando además su utilización en dos zonas de la playa con regímenes hidrodinámicos distintos (rompientes y lavado). Esta evaluación, se considera un aspecto innovador del estudio experimental realizado, ya que no sólo se reportan las mediciones en sí, sino también su grado de confiabilidad.

La investigación propuesta, contribuye al diagnóstico y evaluación de los procesos hidrodinámicos durante la rotura del oleaje a un nivel excepcional de detalle. Así mismo, cabe resaltar que gran parte del trabajo realizado en esta tesis, forma parte significativa de un artículo aceptado en la revista *Experiments in Fluids* (Rivillas-Ospina *et al.*, 2011).

Por último, es necesario hacer notar que no existen en la literatura, estudios que se aboquen al diagnóstico y evaluación del balance de los procesos físicos durante la rotura a este nivel de detalle. Por lo que la investigación experimental aquí descrita, contribuye en esta dirección al enriquecimiento del estado del arte.

### 1.1 Objetivos

El objetivo general de esta tesis consiste en cuantificar el campo de velocidades asociado a oleaje en rotura tipo voluta por medio de una metodología experimental integral. Para ello, se proponen los siguientes objetivos específicos:

- Realizar una investigación en laboratorio sobre el balance de los procesos físicos asociados al oleaje en rotura tipo voluta.
- Desarrollar y validar una técnica no intrusiva para la medición del campo de velocidades en dos zonas de la playa con regímenes hidrodinámicos distintos (rompientes y lavado).
- Comparar en ambas zonas los resultados de la técnica no intrusiva, con resultados provenientes de un velocímetro acústico tradicional y discutir sus diferencias.
- Cuantificar la incertidumbre y confiabilidad asociada a cada técnica de medición, y a cada región de la playa (rompientes y lavado).

## 1.2 Organización del trabajo

El trabajo está integrado por seis capítulos estructurados como que se describe a continuación:

### **Capítulo 2. Antecedentes**

Se presenta una revisión de las investigaciones previas abocadas al desarrollo de técnicas de medición de las características del flujo. Se integra un resumen de los métodos cualitativos desarrollados por los pioneros de la mecánica de fluidos, hasta la implementación de técnicas de visualización cuantitativa como la que se utiliza en esta tesis.

### **Capítulo 3. Experimentos de laboratorio**

En este capítulo se describen a detalle los equipos de laboratorio y las condiciones de oleaje utilizadas en los experimentos que constituyen la materia prima de este trabajo.

### **Capítulo 4. Velocimetría por trazado de burbujas aplicada al oleaje en rotura tipo voluta**

En esta sección se describe a detalle la técnica implementada, conocida como velocimetría por trazado de burbujas (BIV). Además, se introducen los parámetros utilizados para su adecuada implementación en laboratorio. Por último se incluye una descripción detallada del algoritmo de correlación conocido como Diferencia de Mínimos Cuadrados MQD (por sus siglas en inglés), que se utiliza en la determinación de los desplazamientos de burbujas en imágenes consecutivas.

### **Capítulo 5. Análisis de Resultados**

Como su nombre lo indica, este capítulo contiene los resultados del campo de velocidad obtenido por medio de una técnica no intrusiva presentada en el capítulo 4 y un velocímetro acústico. Adicionalmente, se presenta una discusión sobre la validez e incertidumbre asociada a ambos tipos de mediciones, considerando su utilización en dos zonas de la playa con regímenes hidrodinámicos distintos (rompientes y lavado). Finalmente, con el propósito de evidenciar la capacidad de la técnica empleada, se presentan mapas espacio-

temporales de la evolución de una ola rompiendo en voluta sobre una pendiente impermeable.

### **Capítulo 6. Conclusiones y futuras líneas de trabajo**

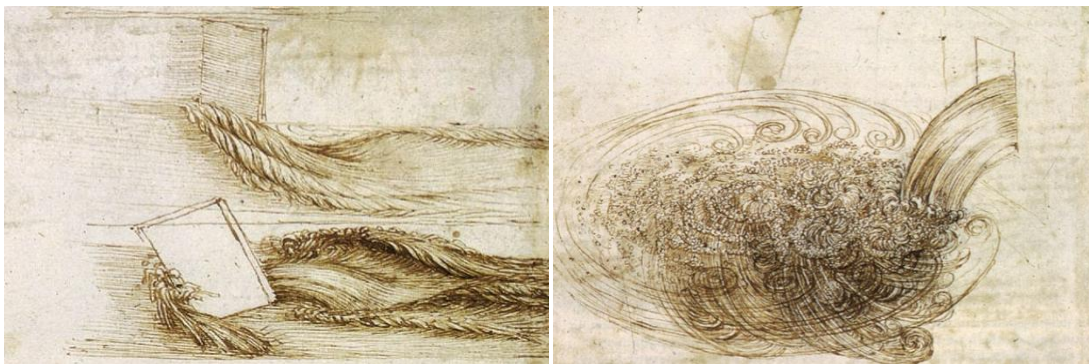
Este capítulo presenta de forma resumida, las conclusiones encontradas durante la realización de este trabajo y algunas sugerencias para las futuras líneas de investigación que se desprenden de esta tesis.

**Capítulo 2**  
**ANTECEDENTES**

## 2. Antecedentes

### 2.1 Introducción

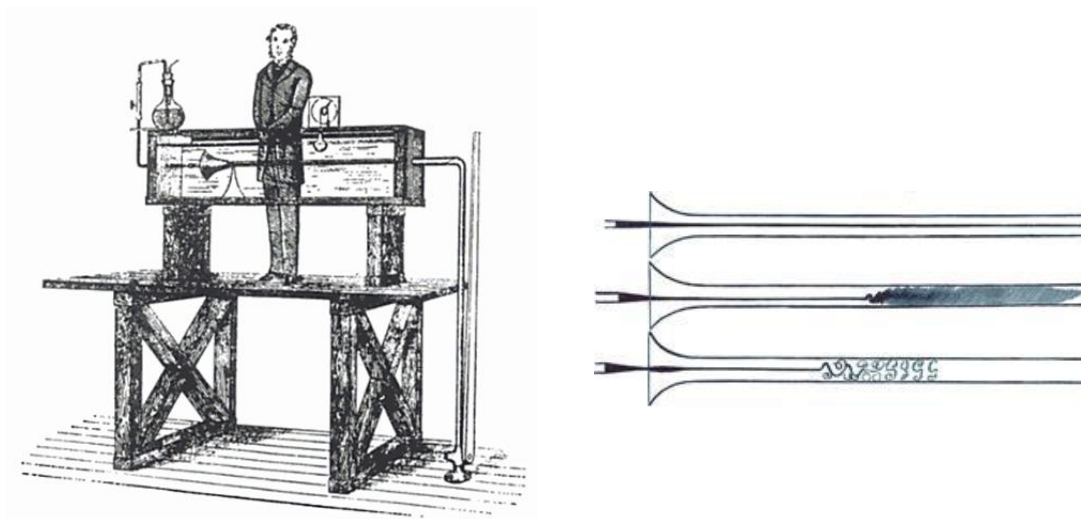
Con el paso de los años el ser humano se ha preocupado cada vez más por la observación de la naturaleza, ya que por medio de ella ha logrado adaptarse al medio que lo rodea y con ello lograr su supervivencia. Sin embargo, mediante la observación de objetos en movimiento, el ser humano ha despertado el interés por realizar experimentos sencillos, utilizando herramientas disponibles en la naturaleza. Es así como surge el campo de investigación acerca de la visualización de un flujo. Un claro ejemplo primitivo que hoy día parece trivial, es arrojar pequeños trozos de madera a un río y observar su trayectoria, con dirección aguas abajo. Este tipo de arreglo experimental tan sencillo, permite hacer una estimación aproximada de la velocidad de la corriente, así como detectar estructuras en el campo de flujo (ej. vórtices). Los primeros trabajos sobre visualización de flujo, se realizaron en 1508 por Leonardo Da Vinci, los cuales consistieron en realizar dibujos sobre la formación de estructuras del flujo, originadas alrededor de obstáculos y la caída del agua al salir por un orificio (ver Figura 2.1).



**Figura 2.1** Esquemas de Leonardo Da Vinci, sobre estructuras de flujo generadas a la salida de agua por un orificio (panel izquierdo), así como estructuras formadas alrededor de obstáculos (panel derecho). (Da Vinci c.1508).

Posteriormente, en la década de los ochenta del siglo XIX, el irlandés Osborne Reynolds, quien es considerado como uno de los pioneros en el desarrollo de trabajos abocados a la visualización de flujo, dio a conocer un estudio experimental y teórico sobre la transición de flujo laminar a turbulento para fluidos al interior de tuberías. En este estudio, Reynolds realizó varios experimentos de flujo en tuberías con sección circular de diferentes diámetros, las cuales fueron sometidas

a la misma presión; dentro de la tubería se inyectaba un colorante que permitía identificar la zona de transición y régimen turbulento al interior del conducto. El colorante funcionaba como trazador de las líneas de flujo, es decir, permitía visualizar las líneas de flujo al interior del conducto (ver Figura 2.2).



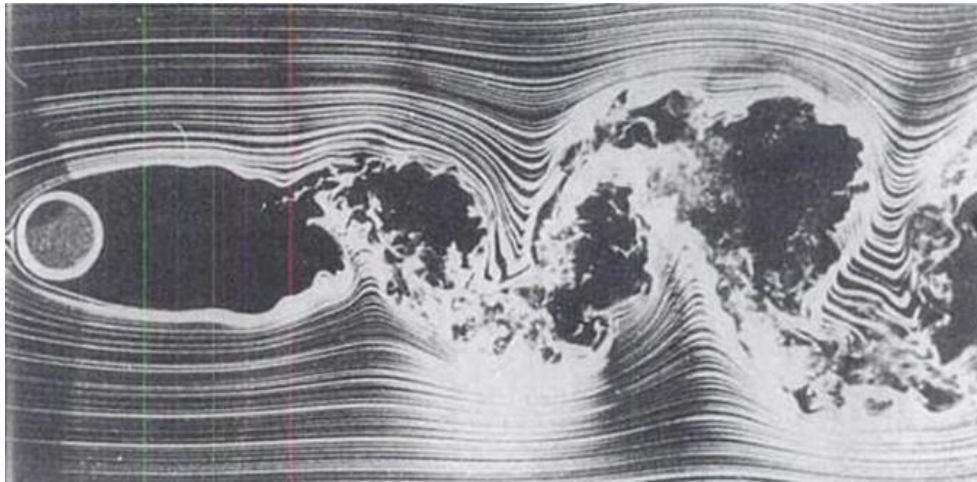
**Figura 2.2** Esquema gráfico del arreglo experimental de Reynolds para la visualización de la transición de regímenes en fluidos; a) Reynolds y su instrumento; b) Ejemplo de la inyección de colorante en el tubo.

De acuerdo con los resultados obtenidos en sus experimentos, Reynolds encontró que la velocidad de transición (de flujo laminar a turbulento) en la zona central de la tubería es función del tamaño de la misma. Con lo que arribó a la conclusión de que la generación de turbulencia es función de un número adimensional definido por el producto de la velocidad máxima en el centro,  $U$ , por el radio de la tubería,  $a$ , entre la viscosidad cinemática del fluido,  $\nu$ .

Este número, bautizado posteriormente como número de Reynolds ( $Re=aU/\nu$ ) define la transición de flujo laminar a turbulento en función de la relación entre los parámetros que

definen al problema ( $Re > 2000$ ). La virtud de este parámetro es que la definición del régimen del flujo está determinada por la relación entre los parámetros del problema y no su valor absoluto, es decir, es adimensional.

A manera de ejemplo, la Figura 2.3 presenta la visualización de líneas de flujo (en planta) al tener interacción con un cilindro. En la fotografía se aprecia la naturaleza desordenada y caótica del flujo después de interactuar con la estructura. Para este caso el número de Reynolds tiene un valor mayor a 10000.

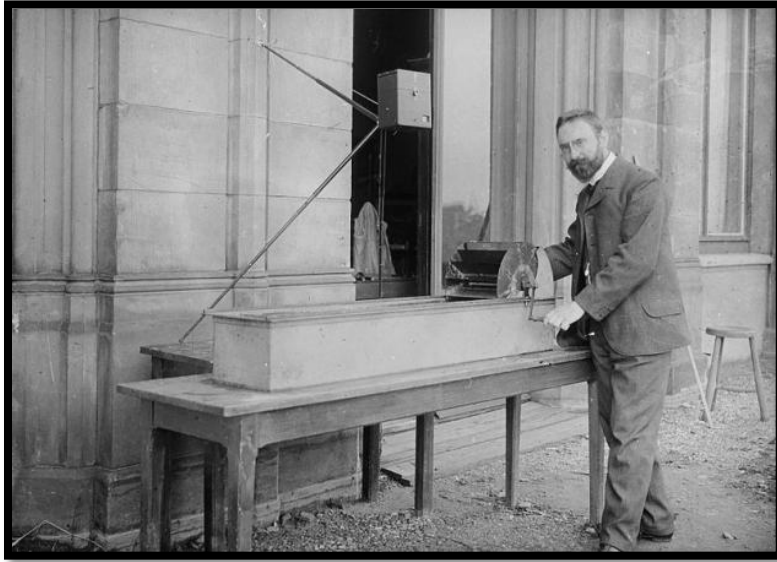


**Figura 2.3** Líneas de flujo alrededor de un cilindro ( $Re=10000$ ).

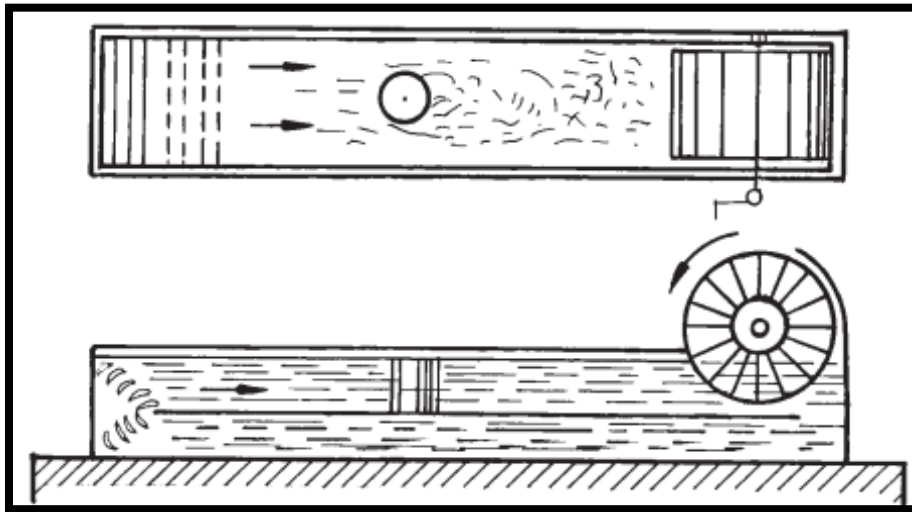
Otro de los grandes pioneros en el uso de las técnicas de visualización de flujo fue el destacado científico Ludwig Prandtl quien, en el año de 1904, construyó un dispositivo mecánico que permitía controlar la circulación de agua al interior de un tanque por medio de una pala manual (ver Figura 2.4). Dicho instrumento estaba constituido por dos secciones, superior e inferior, de tal manera que se favorecía la recirculación de agua al interior del mismo (ver Figura 2.5). La evolución de las líneas de flujo se capturó por medio de fotografía tradicional a la zona de estudio, la cual era iluminada con un flash.

Tras la invención de este dispositivo inició el estudio del cambio de las líneas de flujo al interactuar con estructuras cilíndricas, colocadas al interior del tanque. Este instrumento de medición, representa uno de los primeros modelos físicos de laboratorio que permitieron el estudio de la mecánica de fluidos en dos dimensiones. Posteriormente, Prandtl contempló el uso de trazadores de flujo en la forma de partículas de polvo de aluminio añadidas al fluido,

de tal manera que se pudiera obtener una mejor caracterización de las líneas de flujo al interior del dispositivo.



**Figura 2.4** Fotografía del túnel de agua construido por Ludwig Prandtl (1904) para la visualización de líneas de flujo. (Markus *et al.*, 1998)

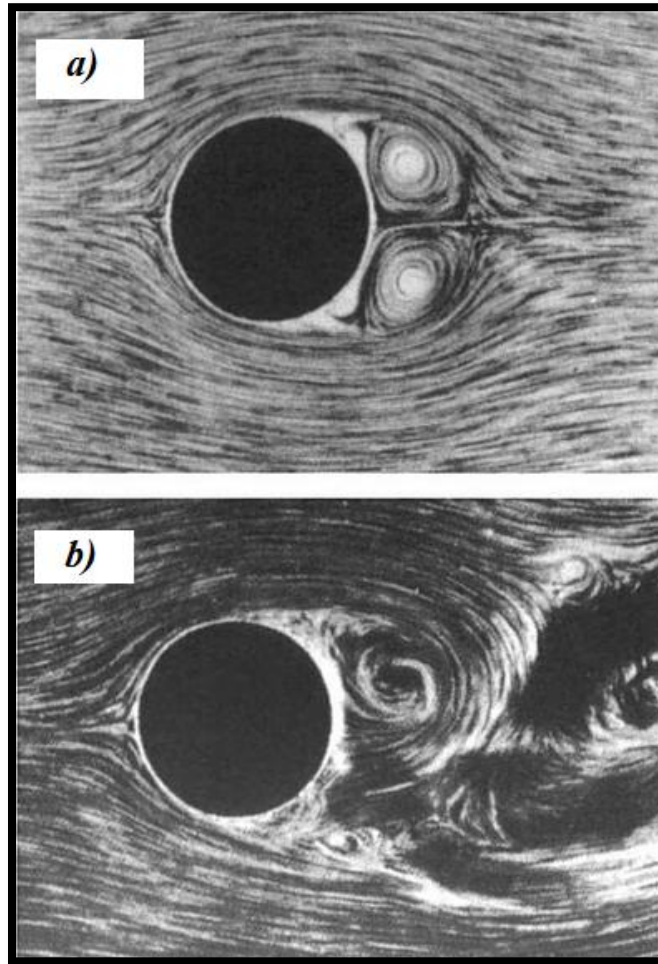


**Figura 2.5** Esquema gráfico del instrumento de Prandtl (1904).

De este modo y por medio del uso de la fotografía, Prandtl logró profundizar sus estudios sobre estructuras (estables e inestables) de flujo. En la Figura 2.6 se presentan, a manera de ejemplo, dos fotografías tomadas en diferentes instantes. En el panel superior de la figura se



ilustra una fotografía tomada con mayor intensidad en la fuente de iluminación utilizada, de tal suerte que la estructura del flujo aparece de forma más nítida. En contraste, el panel inferior ilustra, para las mismas condiciones de forzamiento, una fotografía tomada con menos luz en la que no se aprecia con tanta claridad la estructura de las líneas de flujo. A partir de estos experimentos se identificó la virtud de contar con una iluminación más adecuada para la visualización correcta del flujo.



**Figura 2.6** Imágenes obtenidas por Prandtl (1904) para diferentes intensidades de luminosidad. a) Mayor intensidad de luz; b) Menor intensidad de luz.

A pesar de los avances obtenidos por Reynolds y Prandtl, sus experimentos únicamente lograron obtener resultados de manera cualitativa. Sin embargo, estos grandes aportes a la ciencia representaron la base para la creación de nuevas técnicas de visualización de flujo que permiten obtener mediciones cuantitativas en diversas áreas de estudio.

Después de la creación de los primeros trabajos de visualización de flujo, a finales del siglo XIX y principios del siglo XX, surge la implementación de nuevas técnicas cuantitativas, capaces de visualizar procesos físicos generados por el movimiento de un fluido que, a simple vista, el ojo humano no podría detectar (Merzkirh, 1974). Por tal motivo, este tipo de técnicas desempeñaron un papel importante en la comprensión de problemas en la mecánica de fluidos.

### 2.2 Técnicas de visualización cuantitativa

Con el desarrollo de la tecnología registrado en el siglo XX, se generaron un gran número de técnicas de visualización cuantitativa de los fluidos, las cuales tienen su base en la utilización de cámaras fotográficas de alta velocidad, mismas que permiten dar seguimiento a los patrones del flujo entre dos imágenes consecutivas. Entre las técnicas más conocidas se encuentran: la velocimetría por partículas en imagen (PIV, por sus siglas en inglés), la velocimetría por seguimiento de partículas (PTV, por sus siglas en inglés), la velocimetría por rayo láser (LSV, por sus siglas en inglés) y la velocimetría por el trazado de burbujas (BIV, por sus siglas en inglés). Todas estas técnicas permiten, bajo diferentes condiciones de flujo, la determinación numérica de los vectores de velocidad en un fluido en movimiento. Este tipo de métodos representan las técnicas más avanzadas para la determinación del campo de velocidades de un fluido, dado que a través de ellas se determinan las características espacio-temporales del campo de velocidades. De esta forma se ha logrado sustituir a técnicas de medición más tradicionales como la anemometría por hilo caliente, en la que se mide la velocidad de los fluidos a través de los cambios de temperatura detectados por el paso del fluido sobre un pequeño sensor calentado eléctricamente.

El desarrollo de la fotografía hacia imágenes digitales permitió la implementación de las técnicas de visión cuantitativa por medio del procesamiento de los patrones registrados en imágenes consecutivas (Westerweel *et al.*, 1993). La ventaja de estas técnicas estriba en la posibilidad de automatización de las mismas de una forma rápida y precisa, lo que las hace muy atractivas para su empleo en el estudio de fluidos en movimiento (Hesslink *et al.*,

1988). Sin embargo, cabe resaltar que todos los métodos modernos utilizan el mismo principio básico de observación del flujo, el cual se remonta al desarrollo de la técnica de seguimiento de sombras en imagen propuesta por Dvorak (1880) (shadowgraphy en inglés), la cual ha sido ampliamente documentada en el trabajo presentado por Brown y Roshko (1974).

A continuación y a manera de resumen, se presentan las técnicas de visualización cuantitativa de flujos más utilizadas en la actualidad.

### **2.2.1 Visualización cuantitativa con partículas trazadoras: PTV, PIV, LSV y BIV.**

El principio de medición de velocidad con este tipo de técnicas tiene su base en el seguimiento del desplazamiento de las partículas trazadoras en dos imágenes consecutivas, las cuales están separadas temporalmente por un pequeño intervalo de tiempo. El método consiste en registrar el desplazamiento de las partículas añadidas de forma artificial al flujo de tal suerte que su movimiento quede registrado en imágenes consecutivas. Debido a su tamaño, forma y material, las partículas trazadoras siguen el movimiento del fluido. Además, para hacer más notoria su presencia dentro del fluido, al igual que en los experimentos de Prandtl, se utiliza una fuente de luz de tal manera que la iluminación extra haga resaltar las partículas tomadas en la imagen.

La información de imágenes obtenidas por medio de técnicas ópticas está dada por dos números adimensionales llamados densidad de la fuente ( $N_s$ ) y densidad de la imagen ( $N_I$ ), los cuales fueron propuestos por Adrian y Yao (1984). La densidad de la fuente indica si la imagen contiene partículas individuales (por ejemplo  $N_s \ll 1$ ), o si las imágenes de partículas se superponen y la interferencia de la luz entra en juego (por ejemplo  $N_s \gg 1$ ).

El otro número adimensional, la densidad de imagen ( $N_I$ ), representa el número de partículas en una región específica alrededor de un punto, con la que se puede determinar la velocidad del flujo. A dicha región se le denomina área de interrogación.

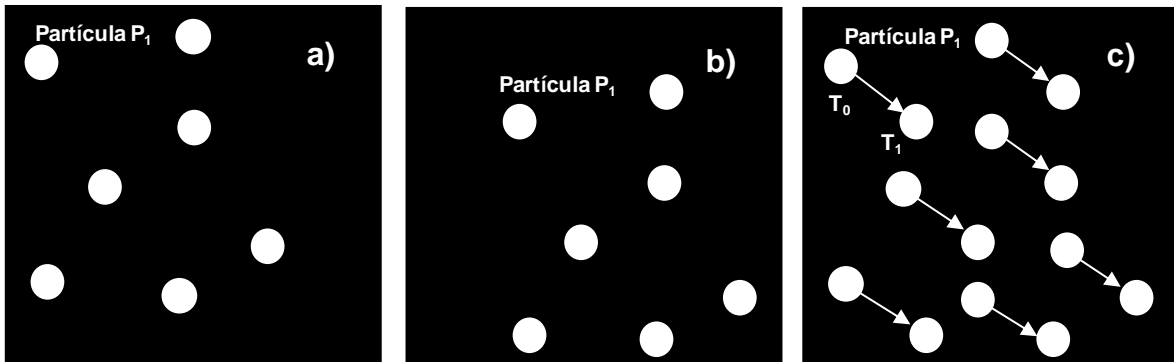
### 2.2.1.1 PTV (Velocimetría por seguimiento de partículas): $N_s \ll 1$ , $N_I \ll 1$

Para la evaluación de imágenes con baja densidad de partículas se requieren métodos de seguimiento a fin de determinar el desplazamiento individual de cada una, tal es el caso del PTV. Este método es capaz de detectar partículas de forma individual, con lo que el desplazamiento de una partícula dividido por el intervalo de tiempo entre imágenes determina la velocidad del fluido en ese punto (Hering *et al.*, 1997). Sin embargo, dada la baja densidad de partículas, la información de velocidad sólo se puede obtener cuando alguna partícula está presente. En consecuencia, el PTV tiene un porcentaje de error alto en imágenes con ruido (como son los flujos turbulentos). Este problema se debe a que la técnica interpreta al ruido presente en las imágenes como partículas. En la Figura 2.7 se ilustra una imagen con partículas individuales ( $N_s \ll 1$ ). En este caso la distancia promedio entre las partículas que aparecen en la imagen es mucho mayor que el desplazamiento promedio de las mismas, de modo que el número esperado de imágenes de partículas en el área de interrogación es bajo ( $N_I \ll 1$ ). Debido a la gran distancia entre las distintas partículas con respecto al desplazamiento promedio, es fácil identificar en pares de imágenes a las partículas correspondientes de forma que se obtiene la velocidad del flujo local. Sin embargo, ya que la densidad de imagen es baja, no es posible determinar la velocidad en cualquier posición, sino solamente en posiciones donde una partícula trazadora está presente. El resultado es un muestreo aleatorio del campo del flujo.



**Figura 2.7** Ejemplo de imagen obtenida por medio de un sistema PTV

Los paneles a) y b) de la Figura 2.8, presentan un ejemplo de dos imágenes consecutivas con baja densidad de partículas. Este tipo de imágenes son procesadas para determinar el desplazamiento individual que tuvieron las partículas entre una imagen y otra. Adicionalmente, en la figura 2.8c) se muestra el desplazamiento calculado entre ambas imágenes la primera de ellas tomada en un tiempo  $t_0$  y la otra en un tiempo  $t_1$ .



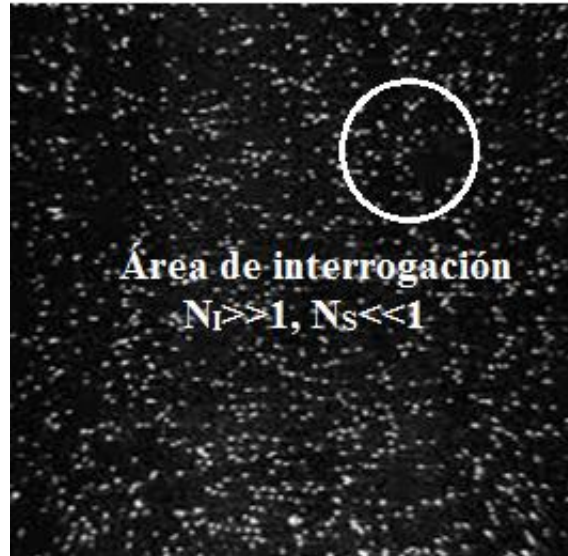
**Figura 2.8** (a) Imagen de partículas tomada en un tiempo  $t_0$ ; (b) Imagen de partículas en un tiempo  $t_1$ ; (c) Desplazamiento estimado de las partículas en un intervalo  $t_1-t_0$

### 2.2.1.2 PIV (Velocimetría de partículas en imagen) $N_I \gg 1$ , $N_S \ll 1$

La técnica de velocimetría de partículas en imagen PIV, es utilizada para determinar la velocidad de un fluido en forma indirecta o no intrusiva. Esta consiste en determinar el campo de velocidades en un fluido, ya que la velocidad es calculada del procesamiento de imágenes consecutivas. Esta técnica requiere del empleo de partículas fluorescentes llamadas “trazadoras”, las cuales se mueven junto con el fluido. Se acepta, entonces, que la velocidad de una partícula trazadora será la misma que la velocidad del fluido. Esta técnica puede ser definida como una actualización de la técnica PTV, dado que en virtud del avance tecnológico, el método PIV utiliza un rayo láser cuya función consiste en iluminar las partículas fluorescentes al contacto con el haz de luz. En la Figura 2.9 se observa un ejemplo de imagen obtenida con la técnica del PIV.

En este sentido, las partículas trazadoras empleadas en esta técnica deben satisfacer dos condiciones: ser capaces de seguir el mismo movimiento del fluido y a su vez, reflejar suficiente luz láser para ser capturadas por la cámara. Las partículas y el flujo deben tener aproximadamente la misma densidad, de modo que al insertarse las partículas, éstas

permanezcan suspendidas en el fluido. Por otra parte, si la densidad de las partículas y el fluido son diferentes, las partículas flotarán o se hundirán, por lo tanto, no seguirán apropiadamente el movimiento del fluido.



**Figura 2.9** Ejemplo de imagen obtenida con un sistema PIV.

En la Figura 2.10 se muestra la instrumentación requerida para el uso de la técnica PIV. Donde el láser funciona, en principio, como una fuente de luz que ilumina a las partículas trazadoras; la cámara digital es utilizada para capturar imágenes que por medio de una computadora son procesadas mediante un algoritmo de correlación, obteniendo los desplazamientos promedio de las partículas.

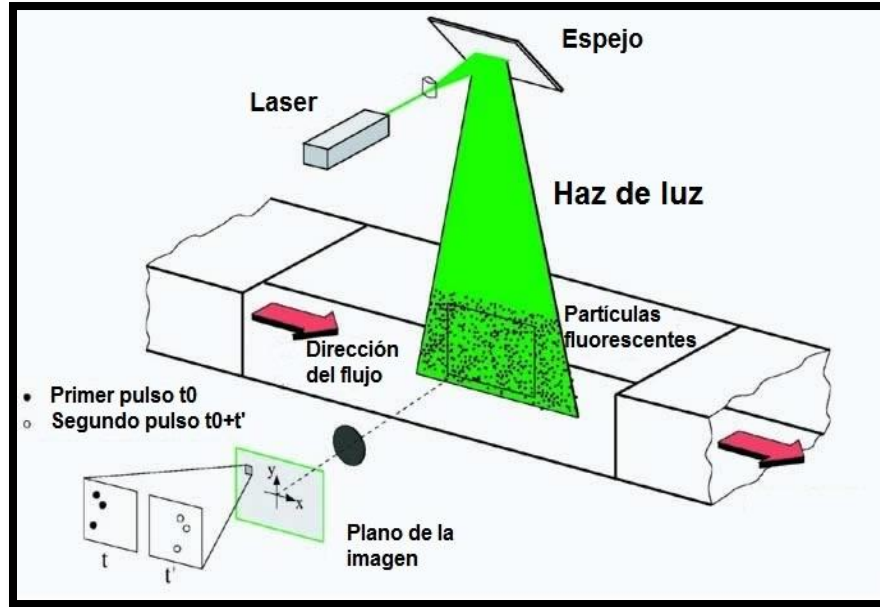


Figura 2.10 Instrumentación utilizada en la puesta punto de la técnica PIV. (Markus *et al.*, 1998)

Keane y Adrian (1990) realizaron mediciones para determinar los requerimientos de parámetros experimentales para el rendimiento óptimo de análisis del PIV. Como resultado de su investigación ellos recomendaron los siguientes criterios:

- El número de imágenes de partículas por área de interrogación debe ser por lo menos 15.
- El desplazamiento en el plano de las imágenes de partículas debe ser igual o inferior a  $\frac{1}{4}$  del diámetro del área de interrogación.
- El desplazamiento de la imagen de partículas en dirección perpendicular a la lámina de luz (desplazamiento “fuera del plano”) debe de ser inferior a  $\frac{1}{4}$ .

Una de las conocidas desventajas del PIV consiste en la restricción de su uso para condiciones de flujo altamente caótico o turbulento (Kimmoun *et al.* 2004; Kimmoun y Branger, 2007). Esto se debe a que el haz de luz láser incidente sufre difracción y reflexión al contacto con las burbujas generadas en este tipo de flujos.

### 2.2.1.3 LSV (Velocimetría por manchas de láser): $N_S \gg 1$ , $N_I \gg 1$

Cuando se tienen imágenes con alta densidad, es decir, que existen demasiadas partículas, es imposible identificar cada una de forma individual, ya que, en una imagen plana, estas se

encuentran encimadas unas con otras y debido a la superposición de partículas en las imágenes, se genera la formación de manchas. En estos casos, es de gran utilidad la técnica del LSV, la cual es capaz de realizar una aproximación estadística, con la que se identifica el desplazamiento de las manchas formadas por grupos de partículas (ver Figura 2.11). Sin embargo, esta técnica tiene la desventaja que al tener una alta densidad de partículas, es posible que estas alteren la dinámica original del fluido.

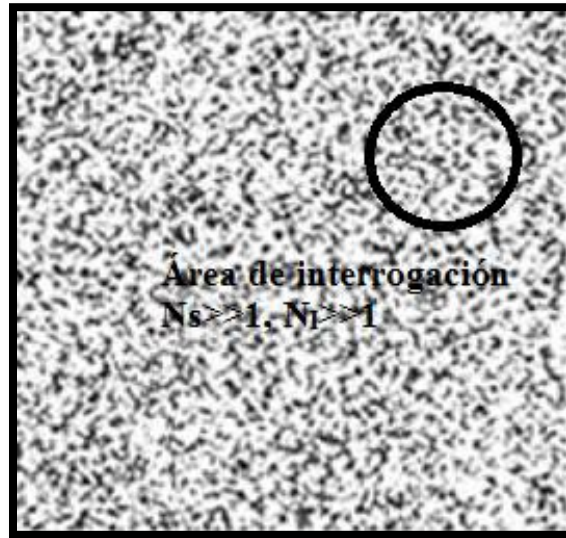


Figura 2.3 Ejemplo de imagen obtenida con un método LSV

### 2.2.2 Visualización de flujo en zona de rotura por medio de técnicas cuantitativas.

Con el propósito de reconocer la evolución del conocimiento dentro del campo de la ingeniería de costas, en esta sección sólo se presentan algunos de los trabajos que han incursionado en la cuantificación de la cinemática del oleaje en condiciones de rotura.

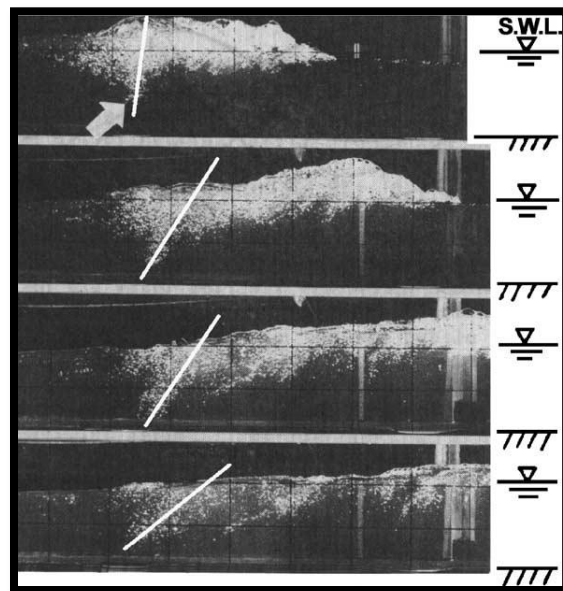
Los primeros estudios en la zona de rompientes consistieron en obtener mediciones de superficie libre, alturas de ola y la variación en el nivel medio para diversas condiciones geométricas de la playa (Madsen *et al.*, 1997). Tiempo después, con la implementación de técnicas de visualización cuantitativa, se llevaron a cabo trabajos de investigación sobre la



caracterización hidrodinámica de playas (ej. Harris *et al.*, 1963; Sonu 1969; Sasaki *et al.*, 1976; Horikawa *et al.*, 1978, 1981).

Para la década de los ochenta Nadaoka *et al.* (1986, 1989) realizaron trabajos que consistieron en el análisis sobre la formación de vórtices durante la rotura del oleaje. Un ejemplo acerca de las investigaciones realizadas por Nadaoka, se muestra en la Figura 2.12, donde se presenta una visualización la formación de vórtices paralelos al frente de ola, así como el descenso oblicuo de remolinos durante el proceso de rotura del oleaje.

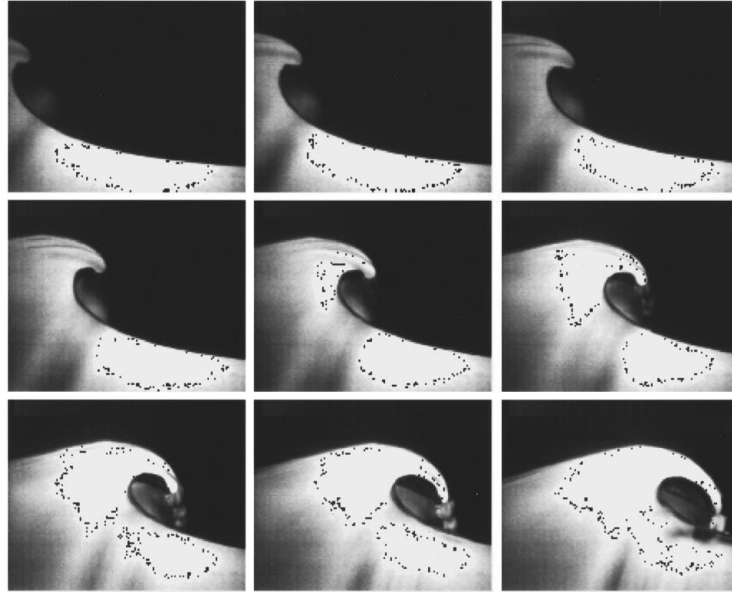
Después de la década de los ochenta, Ting y Kirby (1994, 1995, 1996), realizaron experimentos en laboratorio para la obtención de velocidades (verticales y horizontales) en región turbulenta como lo es la zona de rompientes. Las mediciones de velocidades fueron obtenidas utilizando LDA (Anemometría por láser Doppler por sus siglas en inglés), logrando así la caracterización hidrodinámica de las variables involucradas para la rotura de oleaje tipo descrestamiento y voluta respectivamente. De manera paralela, Cox *et al.* (1994) obtuvieron mediciones detalladas en laboratorio sobre las variaciones verticales de la velocidad originada por oleaje tipo descrestamiento en la zona de rompientes, así como el análisis sobre los procesos que generan la turbulencia, advección, difusión y disipación en la zona de rotura.



**Figura 2.4** Remolinos de descenso oblicuo generados durante el proceso de rotura. La línea blanca representa el eje de los vórtices generados.

Posteriormente, Perlin *et al.* (1996) llevaron a cabo observaciones en tiempo y espacio de la evolución del rompimiento de olas tipo voluta. El oleaje se generó por superposición de olas progresivas con longitud de onda ascendente y pendiente constante. El rompimiento de la ola fue capturado con técnicas de visualización de flujo, velocimetría de imagen de partículas (PIV) y velocimetría de seguimiento de partículas (PTV). Las mediciones del campo de velocidad obtenidas con PIV mostraron que a una profundidad de 30 cm, éste no presenta perturbaciones por la presencia de olas. Lo que a su vez indica que durante el inicio del proceso de rotura tipo voluta, ésta tiene un efecto insignificante sobre el movimiento del agua a profundidades mayores a la mitad de su longitud de onda. Los resultados obtenidos con PTV fueron similares a los obtenidos con PIV, mostrando que la velocidad más grande está localizada en el volcamiento del chorro, cuantificando un incremento del 30 % en la componente horizontal del flujo respecto a la velocidad de fase de la ola.

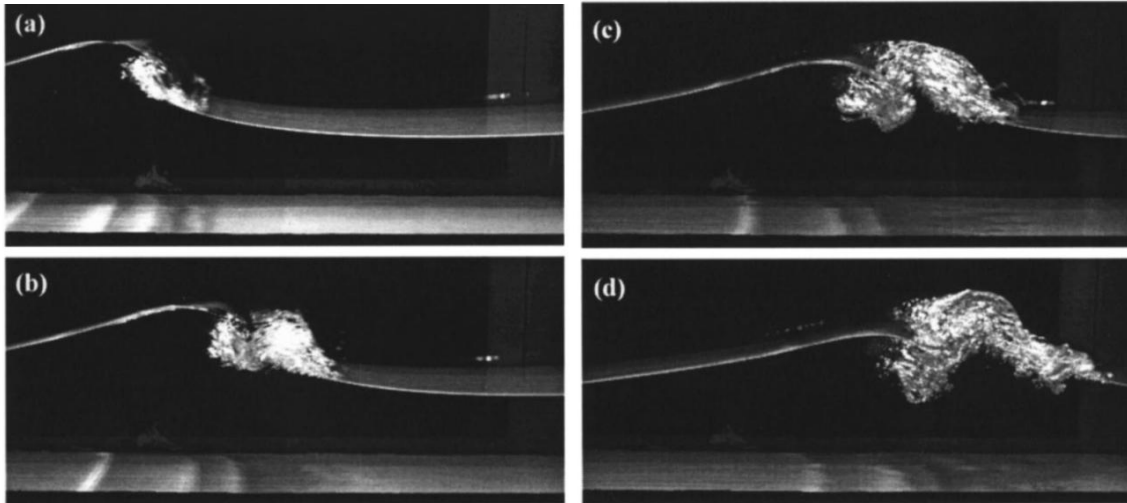
En el estudio de Perlin *et al.* (1996), se prestó particular atención al evento de iniciación de la rotura del oleaje. Reportando, al inicio un perfil de ola asimétrica, que evoluciona formando un pequeño chorro en el frente de la ola, lo que produce que ésta se acelere a una velocidad más intensa que la velocidad de propagación de la ola en su conjunto. Lo que a su vez genera el volcamiento del agua, que produce la zona del impacto o splash que se reporta en la Figura 2.13. Adicionalmente, en su trabajo de investigación, Perlin *et al.* (1996) calcularon la vorticidad en el fluido por medio de la medición del campo de velocidades, indicando que el flujo es esencialmente irrotacional en el punto de rotura.



**Figura 2.13** Imágenes de la rotura de una ola en tipo voluta, mostrando la formación, volcamiento y elongación del chorro. (Perlin *et al.*, 1996)

Para finales de la década de los noventa Chang y Liu (1999) usaron la técnica de PIV para medir campos de velocidades instantáneas bajo rotura tipo descrestamiento en una profundidad intermedia. Ellos resaltan que a pesar de que la técnica de PIV es efectiva para el estudio de la rotura de olas, ésta tiene deficiencias, destacando especialmente el efecto de las burbujas de aire arrastradas (ver Figura 2.14).

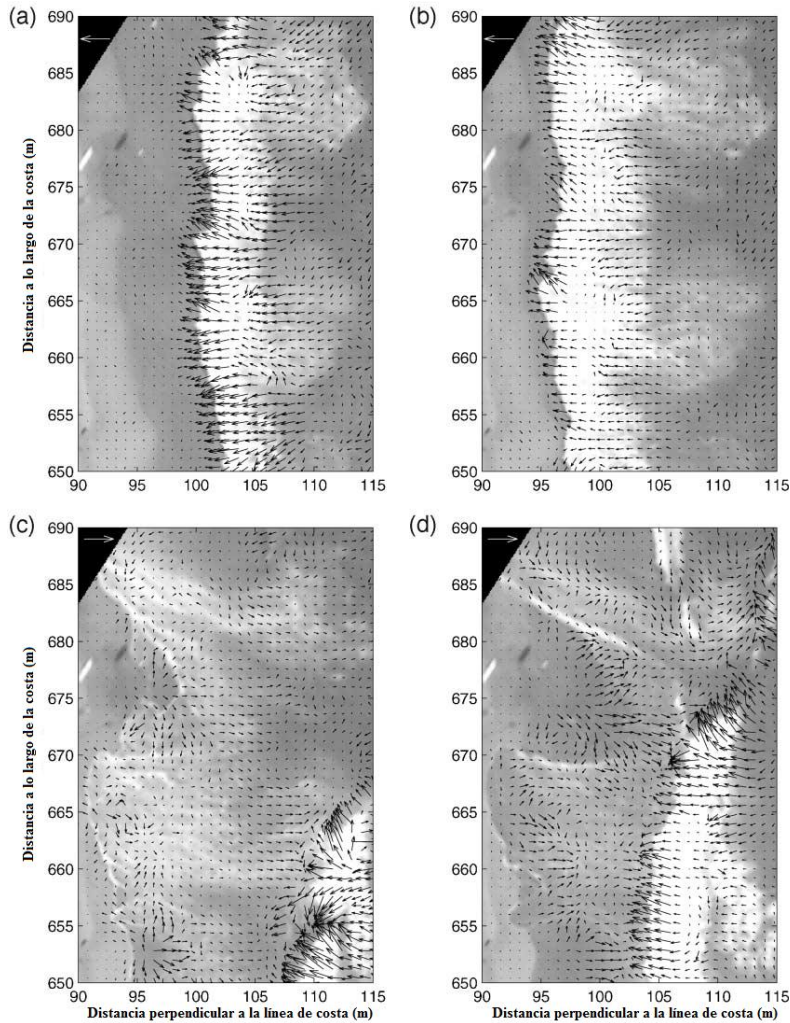
Después de los trabajos realizados en la década de los noventa, los primeros trabajos de investigación en la zona de rompientes realizados en la primer década del siglo XXI fueron llevados a cabo por Cox *et al.* (2000), los cuales consistieron en la obtención de mediciones en laboratorio para obtener una caracterización hidrodinámica sobre elevaciones de superficie libre y velocidades de flujo (vertical y horizontal) generadas en zonas de resaca y lavado. Las velocidades en zonas de resaca y lavado se obtuvieron haciendo uso de LDV.



**Figura 2.5** Imágenes obtenidas con PIV por Chang y Liu (1999).

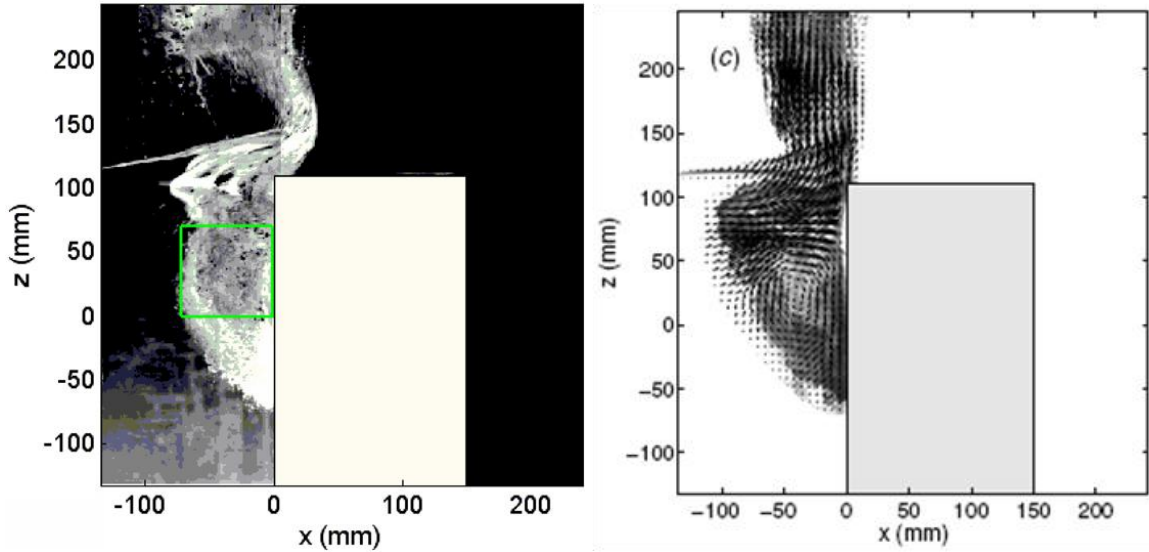
Un año más tarde Cox y Anderson (2001) hicieron uso de la técnica de PIV, para la obtención de mediciones de campos de velocidad generada por la formación de vórtices horizontales y remolinos generados dentro de la zona de rotura. Sus resultados indican que los remolinos tienen aproximadamente un diámetro nominal de 0.05 m y un vórtice máximo de 30 1/s. Por otra parte, y bajo condiciones de campo, Holland *et al.* (2001) desarrollaron e implementaron una nueva versión, a gran escala, de la técnica de PIV capaz de realizar mediciones de campos de velocidad horizontal sobre la superficie de la zona de lavado. En la Figura 2.15 se muestra el campo de vectores de velocidad que se generan en la superficie de la zona de lavado.

Mediciones más extensas fueron realizadas por Govender *et al.*, (2002), quienes utilizaron una técnica similar al PIV basada en la adquisición de imágenes y algoritmos de correlación cruzada. El análisis que realizaron fue para oleaje tipo descrestamiento y voluta generado en el área de rotura. La determinación del campo de velocidades se obtuvo mediante la toma de dos imágenes consecutivas, a las que se aplicó el algoritmo de correlación cruzada, el cual es capaz de calcular el desplazamiento entre partículas generadas en la zona de rotura, sin embargo, no existe una descripción detallada sobre la técnica utilizada en los experimentos. Por otra parte Cowen *et al.* (2003), utilizaron la técnica de PIV para la obtención de mediciones de turbulencia vertical generada por oleaje de tipo voluta y descrestamiento en la zona de lavado.



**Figura 2.6** Vectores de velocidad obtenidos en la zona de lavado

Para mediados de la primera década del siglo XXI, surge la implementación de una nueva técnica de laboratorio conocida como BIV (velocimetría de burbujas en imagen, por sus siglas en inglés). Esta técnica consiste en analizar un conjunto de imágenes tomadas a alta velocidad a través de una modificación del color de la imagen, con lo que se obtiene información sobre el campo de velocidades a partir del seguimiento de las burbujas en movimiento en una serie de fotografías (Ryu *et al.*, 2005). En la Figura 2.16 se muestran ejemplos de la obtención de campos de velocidad mediante la técnica de BIV.



**Figura 2.7** Ejemplo de imágenes obtenidas con la técnica BIV (Ryu et al., 2005). En el panel izquierdo se muestra una ola rompiendo sobre un muro vertical. En el panel derecho se muestra el campo de velocidades obtenidas con la técnica de BIV.

Recientemente, en el inicio de la segunda década del siglo XXI, se llevaron a cabo trabajos de laboratorio, en los cuales se obtuvieron mediciones de campo de velocidades (verticales y horizontales) haciendo uso de la técnica del BIV, así como del gradiente de presión generado por oleaje de tipo voluta en zona de rompientes (Pedrozo-Acuña *et al.*, 2011 y Rivillas *et al.*, 2011).

A continuación, en la Figura 2.17, se presentan, en orden cronológico, los diferentes trabajos y autores que han utilizado técnicas de visualización de flujo.

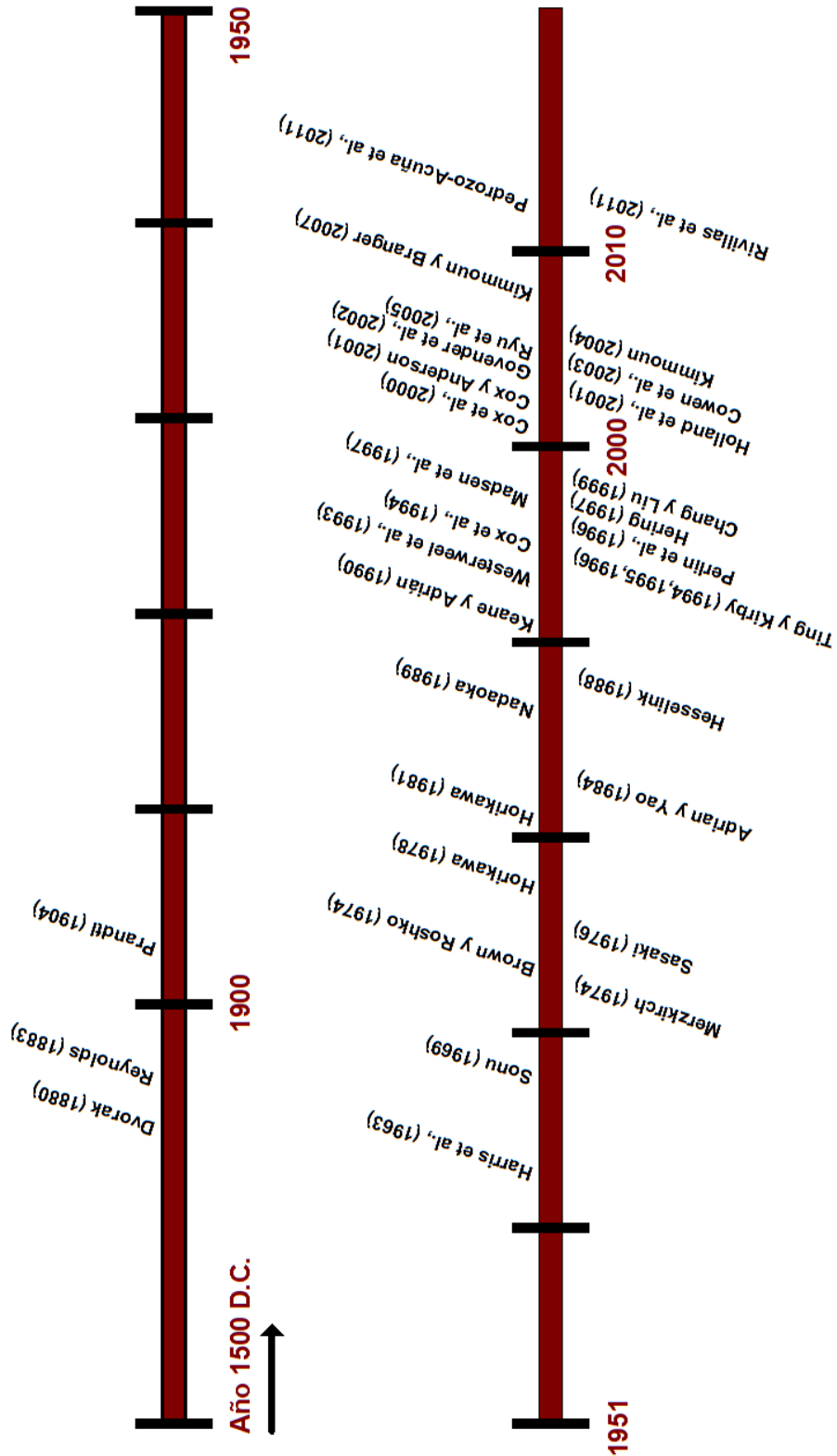


Figura 2.8 Cronología de trabajos utilizando técnicas de visualización de flujo

**Capítulo 3**  
**EXPERIMENTOS DE LABORATORIO**



### 3. Experimentos de Laboratorio

Los datos experimentales utilizados en esta tesis, forman parte de un proyecto de investigación financiado por la UNAM (IN106610), en el que el autor de esta tesis participó de forma activa, siendo el responsable de la puesta a punto de cada una de las pruebas realizadas y la recolección de datos en laboratorio. En particular, la información fue recabada durante los meses de Julio y Agosto de 2010. El procedimiento experimental seguido, fue diseñado de tal manera que se produjeran condiciones de oleaje tipo voluta propagándose sobre una rampa impermeable, especialmente diseñada para contener sensores de presión con una alta resolución espacial (Pedrozo-Acuña *et al.*, 2011). Además, el programa experimental consideró el desarrollo y la puesta a punto de una técnica no intrusiva, para la medición detallada del campo de velocidades bajo condiciones de flujo altamente turbulentas y caóticas. Los experimentos se realizaron en el canal de oleaje del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

Las pruebas realizadas consideraron la adquisición de información, entre las que destacan los sensores de nivel, series temporales de velocidad con velocímetros acústicos y series temporales de presión para cada condición de oleaje. En los experimentos se determinó el empleo de oleaje regular y ondas enfocadas, con el propósito de calcular promedios de fase de las series temporales, lo que a su vez permitió el cálculo de la incertidumbre asociada a los métodos experimentales utilizados.

La información recabada sobre el campo de velocidades que induce una rotura energética, como la voluta, es considerada como un aporte fundamental de este trabajo, ya que por primera vez en la literatura se presentan mapas espacio temporales de la evolución de una ola rompiendo sobre una rampa impermeable en laboratorio. En consecuencia, la información recabada puede ser valiosa para la realización de estudios diagnósticos de procesos físicos asociados a la rotura del oleaje.

El objetivo de este capítulo es, entonces, presentar los experimentos realizados en este trabajo de investigación. Bajo esta perspectiva, se presenta una descripción del canal de

oleaje utilizado, el diseño de la rampa impermeable, el equipo de medición y las condiciones de oleaje seleccionadas.

### 3.1 Modelo Físico

El canal de oleaje del Instituto de Ingeniería de la UNAM representa la instalación más moderna en su tipo de América Latina. Tiene una longitud de 37 m, es de sección rectangular con profundidad de 1.2 m y anchura de 0.8 m. La base del canal está a una elevación de 0.80 m sobre el nivel de piso y su estructura está fabricada de PTR, con postes ubicados a cada 2 m de distancia (ver Figura 3.1). Una de sus paredes laterales está fabricada con placas de lámina de acero inoxidable, mientras que la otra es de cristal templado de 2 cm de espesor, con el objeto de permitir la visualización del flujo por uno de sus lados. El canal cuenta con una pala generadora de oleaje que tiene capacidad de producir olas de hasta 0.40 m de altura con periodos que varían en el rango de 0.2 a 4 segundos.

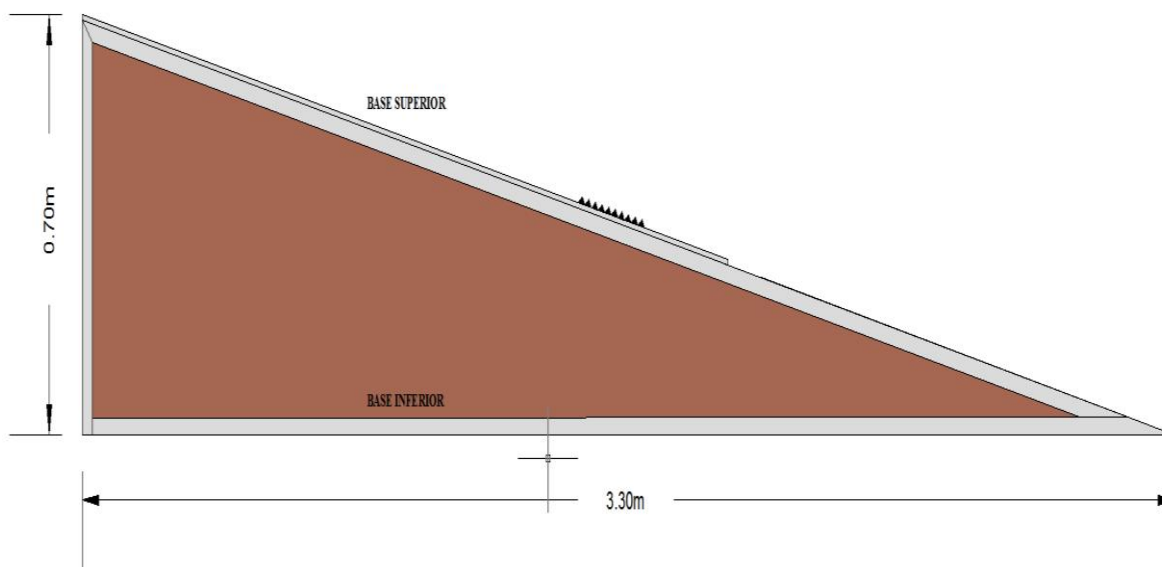


**Figura 3.1** Fotografía en perspectiva del canal de oleaje del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

Con el objetivo de producir la rotura del oleaje bajo condiciones controladas, se diseñó una pendiente impermeable que fue colocada al interior del canal en el extremo opuesto de la pala generadora. Esta rampa triangular, construida de aluminio y acrílico, tiene una

## Capítulo 3. Experimentos de Laboratorio

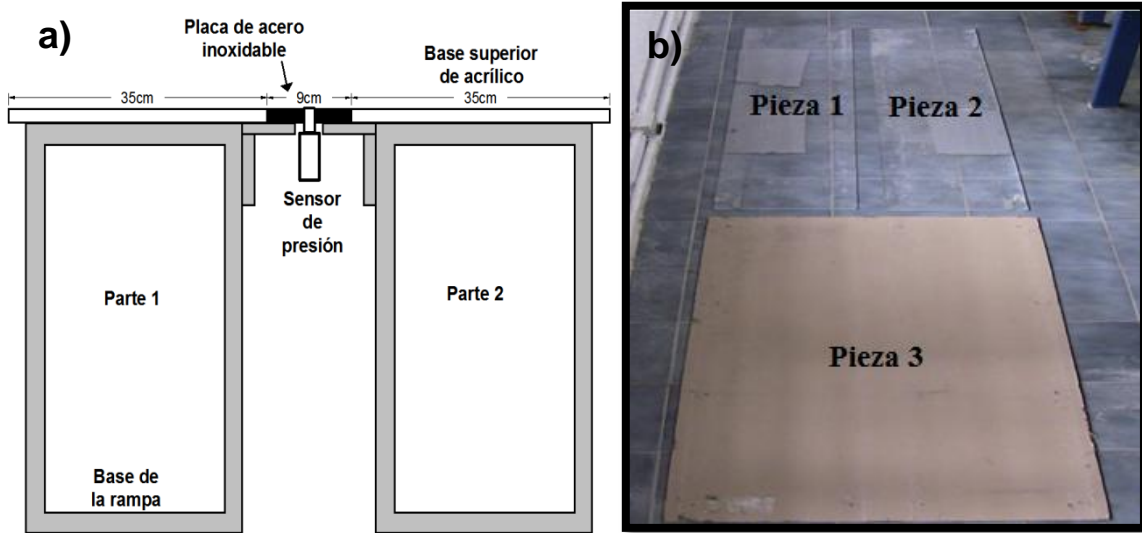
pendiente de 1:5, con las siguientes dimensiones 3.5 m de longitud, 0.7 m de altura y 0.79 m de anchura (ver Figura 3.2).



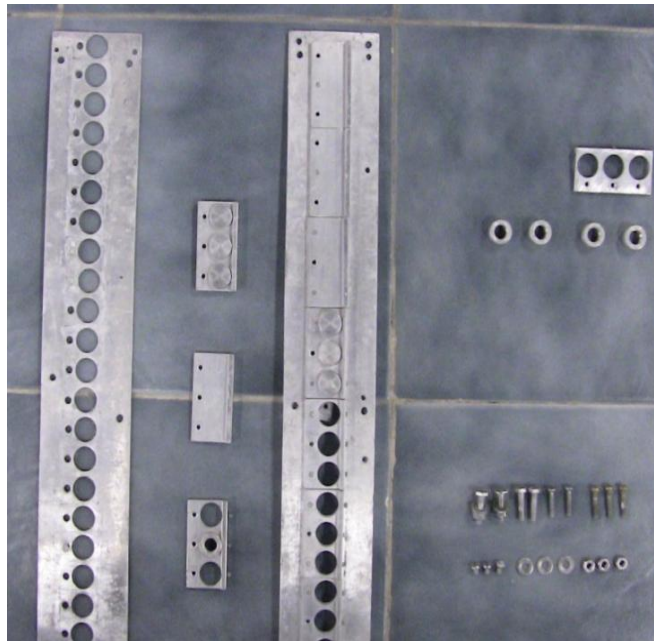
**Figura 3.2** Rampa de tipo impermeable utilizada en el laboratorio de olas del IIUNAM.

De acuerdo con lo que se muestra en la Figura 3.3, la rampa se compone por dos partes que son unidas por la lámina de acrílico para una mejor maniobra al interior del tanque. La pendiente de la rampa puede ajustarse de acuerdo con la base menor del triángulo que la define, entre alturas de 0.2 m y hasta 0.7 m.

La base superior está compuesta por tres piezas de acrílico desmontables con 6 mm de espesor. De éstas, las primeras dos piezas (1 y 2) tienen 0.35 m de anchura y 1.84 m de longitud, mientras que la tercera (3) posee 0.79 m de anchura y 1.72 m de longitud (ver recuadro derecho Figura 3.3). Tal y como se aprecia en la Figura 3.3, en la parte central de la rampa se diseñó una sección donde se atornillan dos placas de acero inoxidable (con dimensiones de 0.60m x 0.09 m cada una) en las que se colocó un dispositivo “ad-hoc” para fijar los sensores de presión de manera continua (ver Figura 3.4). Estas posiciones están dispuestas cada 2 cm sobre la pendiente, de tal suerte que se tienen 78 posibles posiciones a lo largo de la rampa impermeable, dotando así al dispositivo la posibilidad de resolver el campo de presiones a una resolución espacial muy detallada.



**Figura 3.3** a) Esquema posterior del diseño de la rampa en dos partes; b) Piezas de acrílico utilizados como cubierta superior de la rampa.



**Figura 3.4** Sistema de sujeción para la rampa impermeable donde se colocan los sensores de presión.

### 3.2 Descripción del equipo de medición utilizado en laboratorio

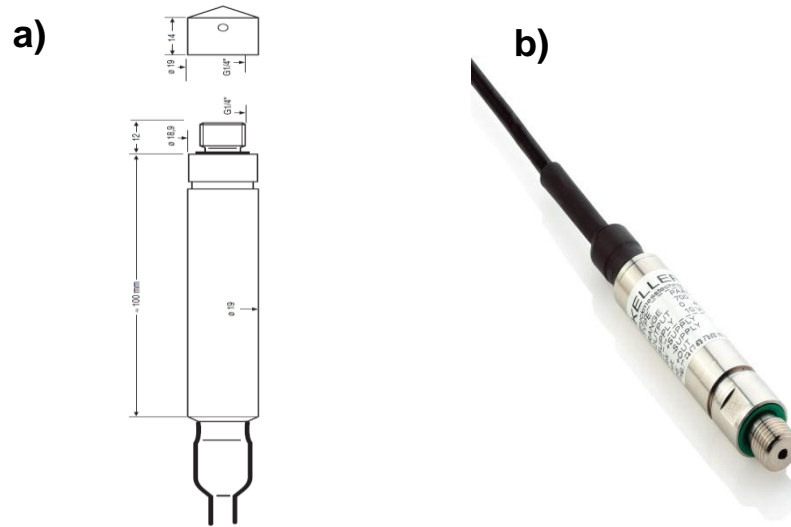
De acuerdo con el diseño del experimento y las capacidades de equipamiento y cómputo instaladas en el laboratorio, las mediciones involucraron alturas de ola y superficie libre a lo largo del canal, series temporales de velocidad por medio de velocímetros acústicos, series temporales de presión en diferentes posiciones a lo largo de la rampa, ascenso y descenso del oleaje con una videocámara digital y mapas espacio-temporales del campo de velocidades por medio de una cámara de alta velocidad.

En adición, se requirió el uso de iluminación profesional para que las imágenes adquiridas alcanzaran una calidad suficiente para la medición precisa.

#### 3.2.1 Sensores de presión

Los sensores de presión consisten en un diafragma capaz de registrar variaciones muy pequeñas en la presión del medio que los rodea, al estar conectados a un circuito con corriente, estas variaciones son traducidas a cambios en voltaje los que, una vez grabados, se pueden transformar en valores de presión. Los valores de presión se obtienen a partir de la deformación que se produce en el elemento sensor (cristal de cuarzo) por la acción del fluido.

En los experimentos que aquí se reportan, se utilizaron sensores de presión marca KELLER (ver Figura 3.5), con diámetro de 19 mm, rango de presión entre 200 mb y 100 bar, y temperaturas de trabajo entre -45 y 100 °C. Estos sensores están libres de mantenimiento y funcionan sin errores siempre y cuando se sigan las recomendaciones establecidas por el fabricante.

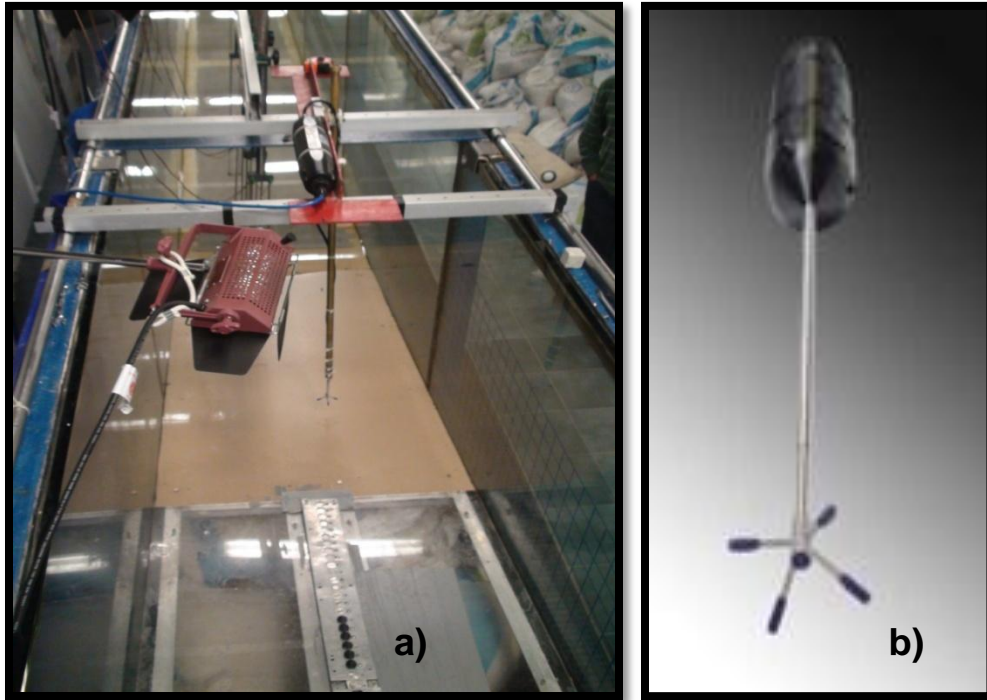


**Figura 3.5** a) Características geométricas del sensor de presión; b) Fotografía del sensor utilizado en laboratorio.

### 3.2.2 Velocímetro acústico por efecto Doppler (ADV, por sus siglas en inglés)

La medición puntual de velocidad para todas las pruebas realizadas, se llevó a cabo por medio de un velocímetro acústico de alta resolución conocido como ADV, que se utiliza para medir velocidades de flujo en tres dimensiones. El principio de operación de este instrumento se basa en el efecto Doppler que consiste en la emisión de una señal acústica que, luego de rebotar en las partículas de agua de un volumen de control, es captada por cuatro transductores. Las diferencias entre la onda inicial emitida y las frecuencias deformadas recibidas por los transductores permiten hacer una estimación de la velocidad de flujo. El ADV transmite pares cortos de pulsos de sonidos, recibe sus ecos y en última instancia, mide el cambio en el tono o frecuencia del sonido devueltos.

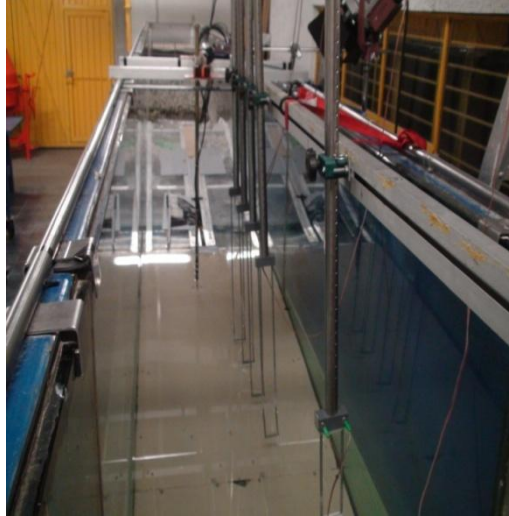
El ADV utilizado en estas pruebas es de la marca NORTEK AS y se conoce como Vectrino (ver Figura 3.6). Estos instrumentos son capaces de medir la velocidad de flujo en diversas zonas en regímenes de flujo con bajo contenido de turbulencia. La frecuencia máxima de muestreo es de 0.1 a 100 Hz y tiene una resolución de 0.01 cm/s y se puede programar para que su rango de muestreo se encuentre entre los 3, 10, 30, 100 y 250 cm/s.



**Figura 3.6** a) Fotografía que ilustra la colocación del corrientímetro acústico dentro del canal de oleaje del IIUNAM; b) Fotografía de detalle del corrientímetro acústico marca Nortek SA.

### 3.2.3 Sensores de nivel

Con el fin de obtener los registros temporales de la evolución de la superficie libre del agua, se colocaron dispositivos de medición por resistividad eléctrica, conocidos como sensores de nivel. Estos determinan el nivel de la superficie del agua que cierra el circuito eléctrico entre dos cables. La corriente así medida se registra en voltaje y es directamente proporcional al nivel del agua (ver Figura 3.7).



**Figura 3.7** Sensores que se utilizaron para la medición de altura de ola.

La calibración de este tipo de sensores se realiza por medio de un dispositivo simple y confiable llamado monitor de ondas (ver Figura 3.8). Como se dijo antes, la corriente que fluye entre los cables es proporcional a la profundidad de inmersión. Dicha corriente se convierte en una tensión de salida proporcional a la profundidad de inmersión instantánea. Así, la tensión de salida puede ser calibrada en función del nivel de agua quieta o el valor de la altura de ola, de tal modo que se establecen los límites superiores e inferiores para la variación de la superficie libre a lo largo del sensor.

Cada monitor de onda contiene la sonda de activación y circuitos de detección para el funcionamiento del sistema. Además, el monitor contiene los circuitos necesarios para compensar la resistencia del cable de conexión de la sonda, que de otra manera introduciría errores de linealidad.

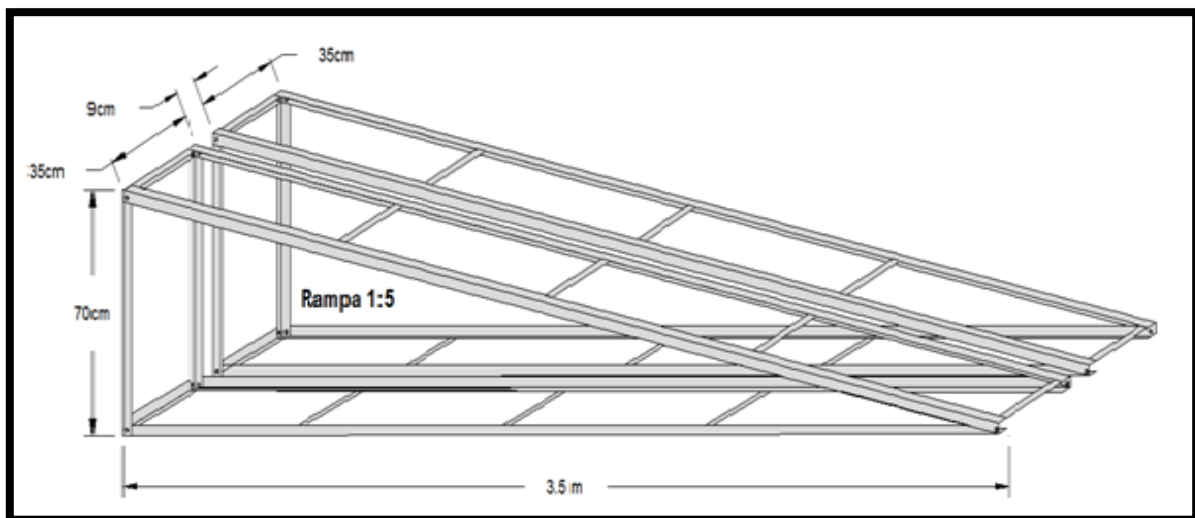




**Figura 3.8** Monitor de sondas para la calibración de sensores de nivel.

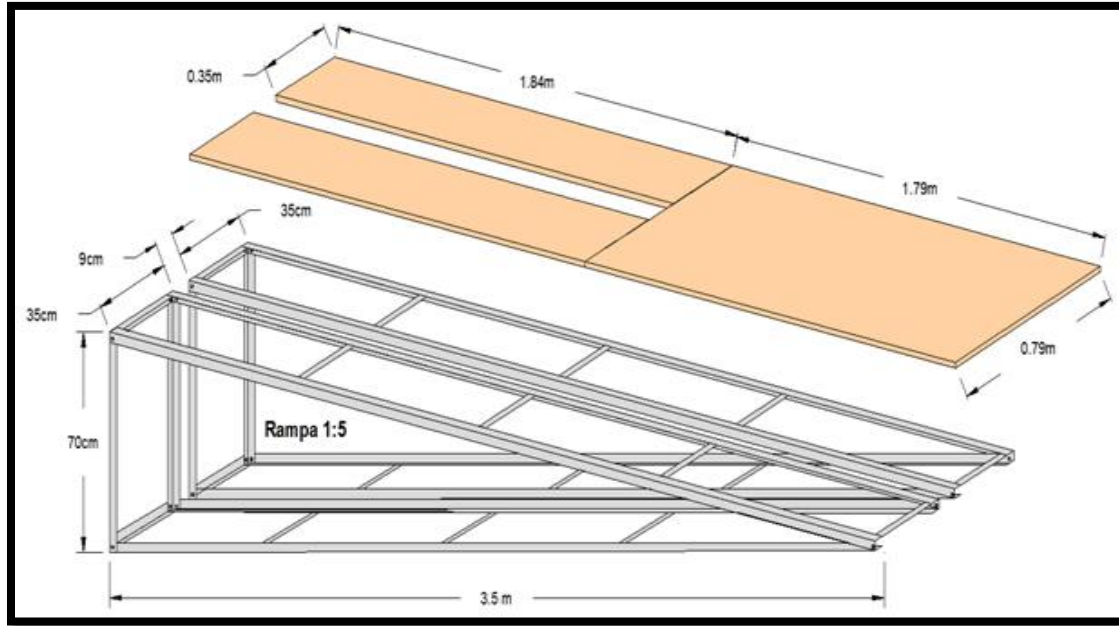
### 3.3 Puesta a punto del laboratorio

El montaje de la instrumentación en las instalaciones del canal comenzó con la colocación de la rampa impermeable al interior del mismo. Diseñada y armada en su totalidad, la rampa se ubicó dentro del canal de oleaje de tal suerte que se elevó a una altura de 0.70 m con respecto a la base del canal (ver Figura 3.9). El pie de la rampa (inicio de la misma) se ubicó a una distancia de 26 m de la pala generadora de oleaje.



**Figura 3.9** Armado de la rampa utilizada para la realización de las pruebas en laboratorio.

La disposición de las hojas de acrílico sobre la rampa se ilustra en la Figura 3.10, las cuales se atornillaron a la estructura de aluminio.



**Figura 3.10** Esquema de colocación de las láminas de acrílico sobre la estructura de aluminio.

En la zona central de la rampa impermeable, se fijaron los 10 sensores de presión a lo largo de dos placas de acero inoxidable de 60 cm de longitud por 9 cm de anchura (ver Figura 3.11).

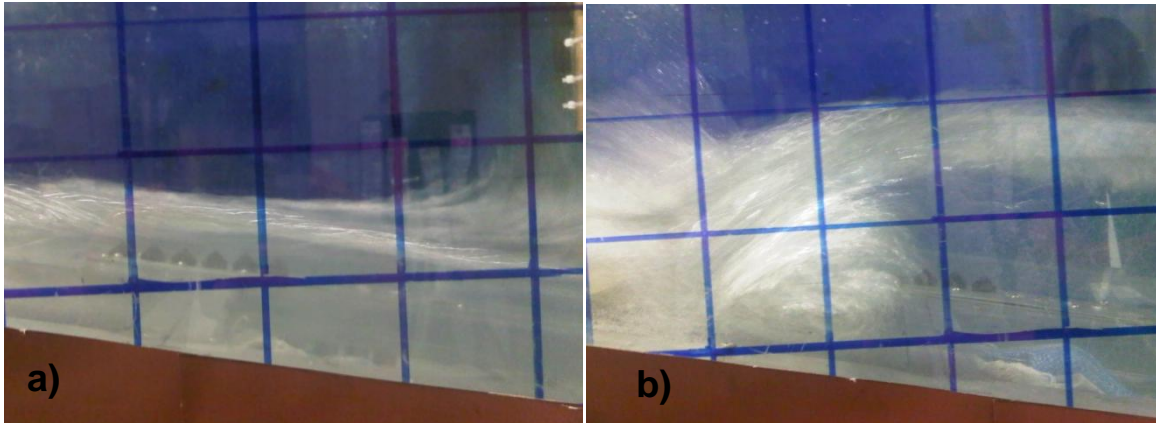


**Figura 3.10** Colocación de sensores de presión en la placa de acero inoxidable.

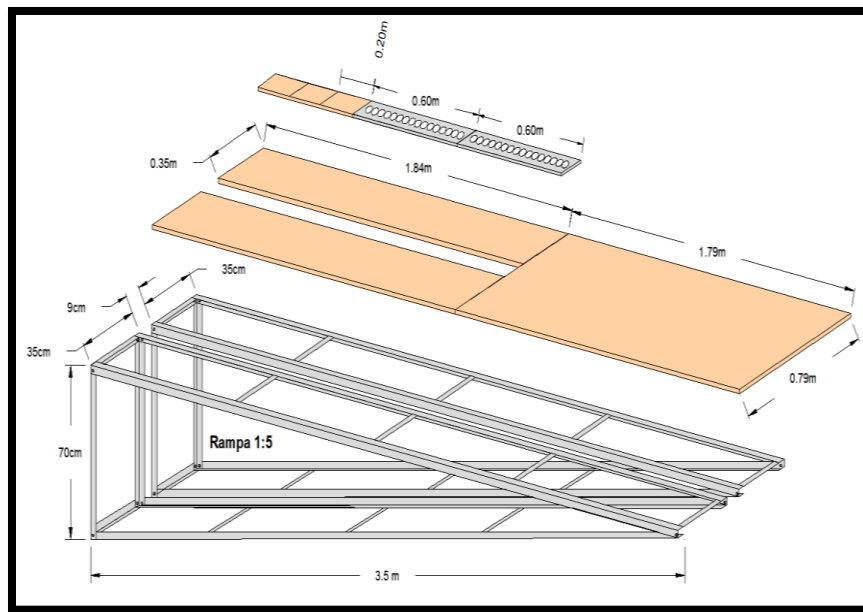
De esta forma, a través de la repetición de cada una de las condiciones de oleaje determinadas (16 veces), los sensores de presión eran reubicados en posiciones subsecuentes a lo largo de la rampa, de manera tal que para cada condición de oleaje se tenía cubierta la totalidad de las posiciones disponibles en las ranuras centrales (ver Figuras

## Capítulo 3. Experimentos de Laboratorio

3.12 y 3.13). La ubicación de los sensores a lo largo de la rampa permitió una medición de alta resolución en la zona de rompientes y lavado, tal y como se muestra en la Figura 3.12 donde se observa la medición en dos instantes asociados al descenso del oleaje y al impacto de una ola sobre la pendiente.



**Figura 3.11** Sensores de presión ubicados en las zonas de lavado (a) y rompientes (b).

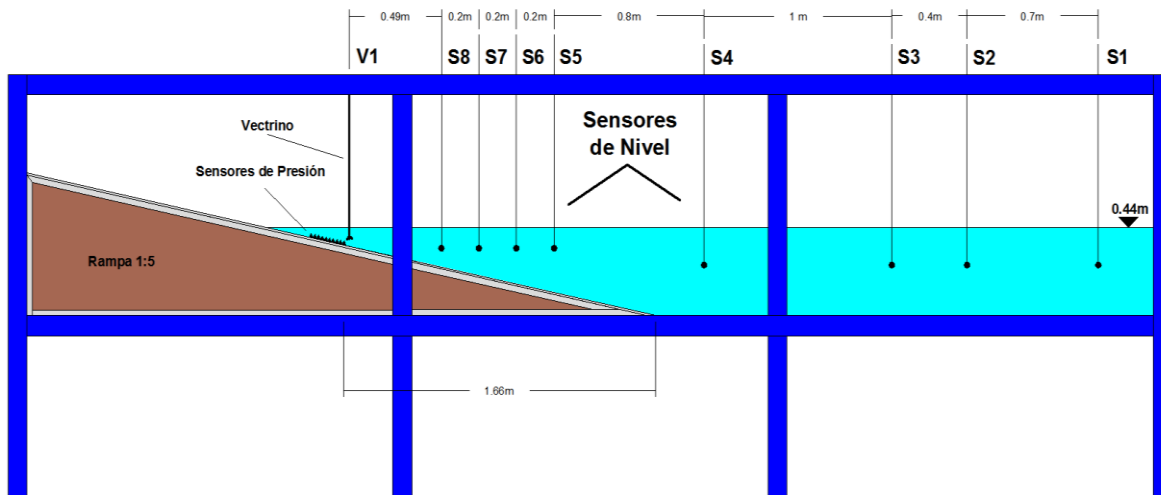


**Figura 3.12** Colocación de placas de acero inoxidable.

La disposición general de todos los instrumentos utilizados se presenta en la Figura 3.14, en donde se ilustra un esquema de la ubicación de los ocho sensores de nivel utilizados y el corrientímetro acústico para la medición de velocidades.

## Capítulo 3. Experimentos de Laboratorio

La distancia entre los sensores de nivel fue definida con el propósito de capturar la evolución del perfil de las olas debido a efectos de someramiento y reflexión, considerando tener información para la validación futura de modelos hidrodinámicos numéricos. En la Tabla 3.1 se presentan las distancias elegidas entre los 8 sensores dispuestos a lo largo del canal.



**Figura 3.13** Ubicación y distancia entre sensores de nivel y velocímetro acústico.

**Tabla 3.1** Distancia entre sensores de nivel y velocímetro acústico (V1).

No. de Sensor	Distancia entre sensores (m)
S1 - S2	0.70
S2 - S3	0.40
S3 - S4	1.00
S4 - S5	0.80
S5 - S6	0.20
S6 - S7	0.20
S7 - S8	0.20
S8 - V1	0.49

### 3.4 Ensayos seleccionados (oleaje regular)

El programa experimental se definió para que todas las condiciones de oleaje rompieran en voluta sobre la pendiente impermeable. En particular, se determinó el uso de oleaje regular

## Capítulo 3. Experimentos de Laboratorio

y se definieron trece diferentes condiciones que satisfacen el parámetro de surf (o número de Iribarren) para la determinación de una rotura de tipo voluta sobre la pendiente (ver Tabla 3.2).

De esta forma, a través de la repetición de cada una de las condiciones de oleaje programadas (16 veces), los sensores de presión eran reubicados en posiciones subsecuentes a lo largo de la rampa y así que para cada condición de oleaje se tenía cubierta la totalidad de las posiciones disponibles en las ranuras centrales (ver Figuras 3.12 y 3.13). La ubicación de los sensores a lo largo de la rampa permitió una medición de alta resolución en la zona de rompientes y lavado, tal y como se muestra en la Figura 3.12 donde se observa la medición en dos instantes asociados al descenso del oleaje y al impacto de una ola sobre la pendiente.

La duración de cada una de las pruebas completas requirió de 80 minutos de generación de oleaje divididos entre 16 repeticiones de 5 minutos para el reacomodo de la instrumentación a lo largo de la rampa.

**Tabla 3.2** Condiciones de oleaje seleccionadas.

Nombre	H (cm)	T (s)	Ir (0-)	$\tan \beta$
H10T15	10	1.5	1.0440	0.2
H10T20	10	2.0	1.2463	0.2
H12T10	12	1.0	0.7047	0.2
H14T10	14	1.0	0.6525	0.2
H14T12	14	1.2	0.7540	0.2
H15T15	15	1.5	0.8524	0.2
H15T20	15	2.0	1.0176	0.2
H16T10	16	1.0	0.6103	0.2
H16T12	16	1.2	0.7053	0.2
H17T10	17	1.0	0.5921	0.2
H17T12	17	1.2	0.6650	0.2
H18T15	18	1.5	0.7781	0.2
H18T20	18	2.0	0.9289	0.2

### **3.5 Descripción del equipo utilizado para la implementación de la técnica BIV.**

Realizadas las pruebas con oleaje regular y ondas enfocadas para la obtención de las presiones generadas por el oleaje rompiendo en voluta, se procedió a la implementación de la técnica BIV, que se describe a detalle en el capítulo cuatro.

Los elementos utilizados en laboratorio para la obtención de datos a los que se aplicó la técnica BIV se presentan a continuación.

#### **3.5.1 Cámara de alta velocidad**

Las cámaras de alta velocidad son equipos capaces de grabar instantes de tiempo anterior, posterior o durante la ocurrencia de determinados fenómenos registrando una gran cantidad de imágenes por segundo, de tal forma que al reproducir la grabación, se puede visualizar los fenómenos con un detalle imposible de captar por el ojo humano.

El uso de la cámara de alta velocidad en el proyecto de investigación fue de gran utilidad, ya que se obtuvieron imágenes naturales o en crudo, para posteriormente ser procesadas y con ello poder obtener velocidades horizontales y verticales de la rotura en voluta.

La cámara que se utilizó para la realización de los experimentos en el laboratorio es de la marca Fastec (modelo Hispec, ver figura 3.15). Esta cámara tiene una sensibilidad ISO 3200 (la cual permite obtener fotografías con una menor cantidad de luz) y resolución temporal de hasta 506 fotogramas por segundo con resolución espacial de 1280 X 1024 pixeles. La velocidad de fotogramas es ajustable hasta 12000 imágenes por segundo.

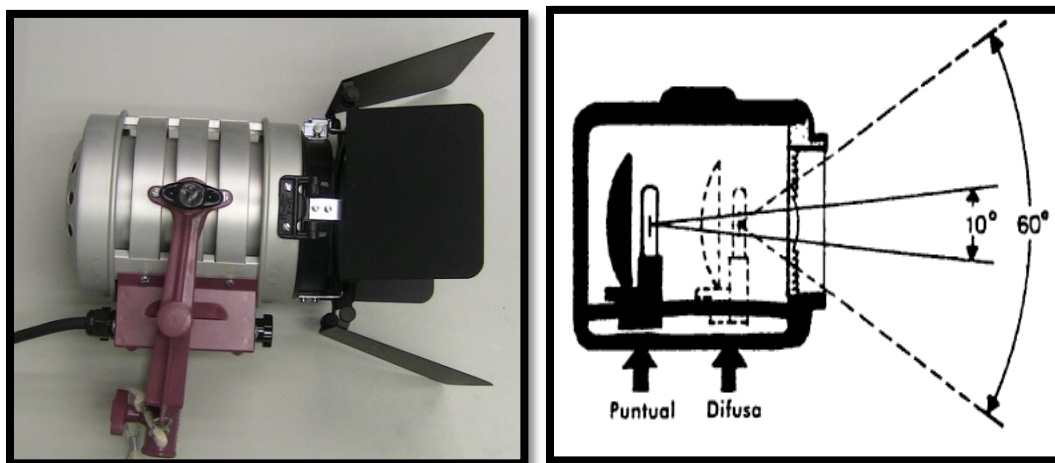


Figura 3.14 Cámara Fastec Hispec utilizada en laboratorio.

### 3.5.2 Equipo de iluminación profesional

La iluminación en fotografía consiste en dirigir y rebotar luz hacia un objeto con la intención de que ésta pueda ser registrada por el sensor digital. La luz resulta fundamental en la fotografía, ya que sin ésta no es posible garantizar la calidad de las imágenes. Además de ser un factor físico imprescindible en el proceso fotográfico, la luz posee una función plástica de expresión y modelado que confiere un significado y un carácter tal, que muchas veces ella sola determina la calidad de una fotografía, aunque esto depende del gusto del fotógrafo y la técnica.

El tipo de iluminación que se empleó en los experimentos de laboratorio fue de tipo Fresnel (ver Figura 3.16 panel izquierdo). Su característica principal es que incorpora un sistema para concentrar y dirigir el haz de luz mediante el desplazamiento de la lámpara. El control del haz de luz hace que sea un proyector idóneo para la iluminación creativa, utiliza una lámpara incandescente con filamento de cuarzo encerrada en una atmósfera de un gas halógeno, la lámpara está fijada a un reflector de metal esférico y se desplaza mediante un mando exterior. Cuando la lámpara se aproxima al lente, el haz tiene un ángulo de  $60^\circ$  que se reduce a unos  $10^\circ$  cuando se aleja (ver Figura 3.15 panel derecho). La intensidad de la luz puede variar según el grado de concentración del haz entre cinco y treinta veces. La potencia de los proyectores fresnel es de 650W.



**Figura 3.15** Fotografía del reflector tipo Fresnel (izquierda); Ángulos de desplazamiento de la lámpara al interior del reflector (derecha).

### 3.6 Puesta a punto de la técnica de trazado de burbujas (BIV)

El montaje del equipo utilizado en laboratorio es, sin duda, una parte esencial para poder realizar todo tipo de pruebas para diversos proyectos de investigación, a su vez, garantiza la buena obtención de resultados de mayor calidad.

Colocada la rampa a una altura de 70 cm y acoplada dentro del canal de oleaje descritos anteriormente, se dibujó una cuadrícula en la parte posterior de la pared de cristal del canal (ver Figuras 3.17 y 3.18), quedando cuadros de 5 x 5 cm, esto se describe detalladamente en la capítulo 4; el siguiente paso consistió en la instalación de la cámara de alta velocidad (Hispec), ubicada perpendicularmente a la dirección del flujo y al canal de oleaje. Finalmente, se colocó la iluminación de tipo Fresnel, que consistió en 3 lámparas, dos (650 W) ubicadas en los extremos inicial y final de la rampa en un ángulo de  $60^\circ$  con respecto al eje longitudinal del canal y una tercera lámpara (1000 W) iluminando desde la parte superior. Este arreglo de luces es consistente con las necesidades de la técnica BIV que emplea la técnica de “Shadowgraphy” (Hassan *et al.*, 1998; Nishino *et al.*, 2000; Lindken y Merzkirch, 2001), o mejor conocida como sombras chinescas. Esta técnica requiere una



## Capítulo 3. Experimentos de Laboratorio

---

fuelle de luz detrás de las burbujas por lo tanto las burbujas aparecen en las imágenes como sus sombras.

**Capítulo 4**

**VELOCIMETRÍA POR TRAZADO DE**

**BURBUJAS APLICADA A OLEAJE**

**TIPO VOLUTA**

### 4. Velocimetría por trazado de burbujas aplicada a oleaje en rotura tipo voluta

#### 4.1 Introducción

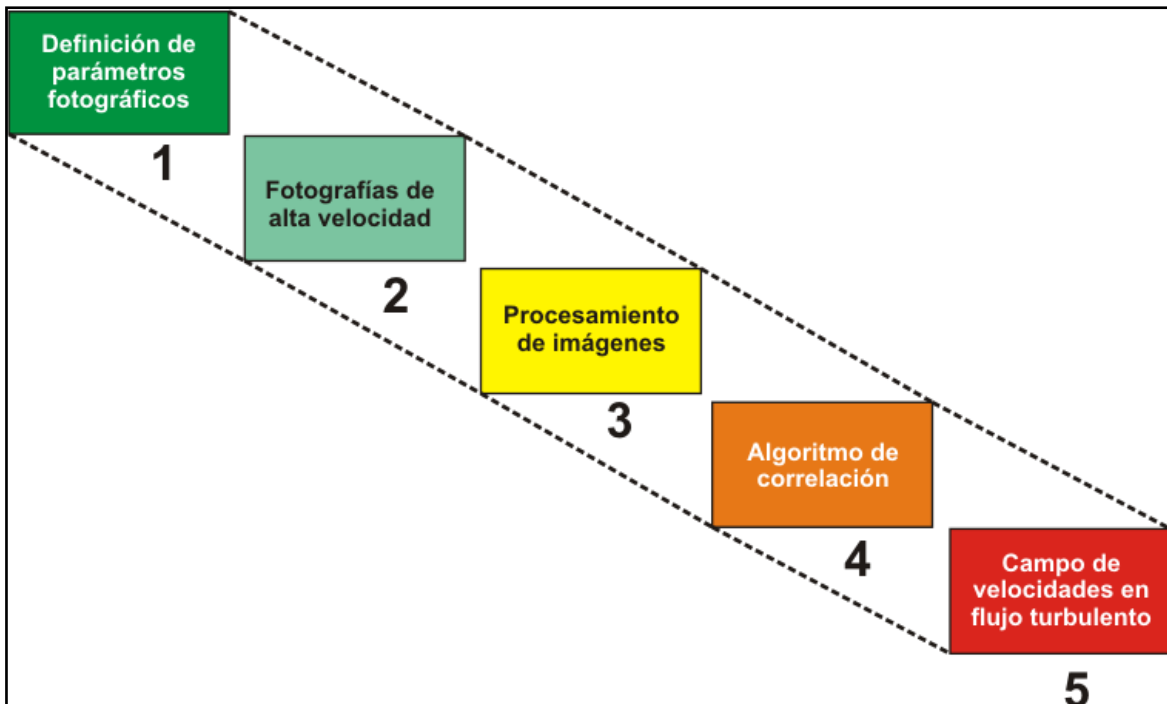
La técnica BIV, es junto con el PIV, una de las pocas técnicas no intrusivas para medir el campo de velocidades de un fluido en movimiento. Este método tiene su base en los mismos principios que dan fundamento a técnicas de medición como el PTV, el PIV y el LSV. En estas técnicas el propósito consiste en dar seguimiento a los patrones de flujo en el agua, ya sea a través de la introducción de partículas externas dentro del fluido o a través de la interferometría (interferencia de la longitud de onda de la luz), de tal suerte que sea posible revelar la dirección y magnitud del movimiento del fluido en dos imágenes consecutivas.

En el caso del BIV, las partículas a las que se les da seguimiento dentro de una serie de fotografías consecutivas, se generan de forma natural por la naturaleza del flujo en rotura que es el motivo de estudio de este trabajo. Así, las burbujas que se generan como consecuencia de la rotura del oleaje en la zona de rompientes, son utilizadas por esta técnica como trazadores del campo de velocidades (Ryu *et al.*, 2005). Contrario a lo que sucede con las técnicas que necesitan el uso de un rayo láser para la iluminación del área de estudio (PIV, PTV y LSV), el BIV tiene la ventaja de poder determinar el campo de velocidades en regiones hidrodinámicas con alta concentración de burbujas y turbulencia. Así en la zona de rotura, es prácticamente imposible el uso de técnicas con rayo láser dadas la difracción y reflexión del haz de luz al contacto con las burbujas del fluido (Petti y Longo, 2001). Paradójicamente, dentro del campo de física de ondas, la zona donde rompen las olas representa la región de mayor dinámica respecto de la naturaleza del flujo y el transporte de sedimentos.

Este capítulo presenta, la metodología que se debe seguir para la puesta a punto de la técnica de trazado de burbujas, para el caso específico del campo de velocidades en la zona de rotura del oleaje. Se introduce además, la validación de la técnica en una playa de laboratorio y en dos zonas de características hidrodinámicas distintas.

### 4.2 Metodología de la velocimetría por trazado de burbujas (BIV)

El procedimiento para la puesta a punto de la velocimetría por trazado de burbujas está comprendido por cinco etapas fundamentales para una adecuada aplicación (ver Figura 4.1).



**Figura 4.1** Metodología para la implementación de la técnica BIV.

El primero de los pasos consiste en definir los valores requeridos para los parámetros fotográficos del lente que se va a utilizar, el segundo es la obtención de las fotografías de alta velocidad de la zona de estudio, mientras que el tercero representa el procesamiento de las imágenes a través de la aplicación de una técnica de inversión de color. El cuarto paso requiere la utilización de un algoritmo de correlación conocido como Diferencia de Mínimos Cuadrados MQD (por sus siglas en inglés) para identificar los movimientos de las burbujas que aparecen en dos fotografías consecutivas. Por último, una vez conocido el desplazamiento de las burbujas identificadas en ambas fotografías, se determina la

## Capítulo 4. Velocimetría por Trazado de Burbujas

---

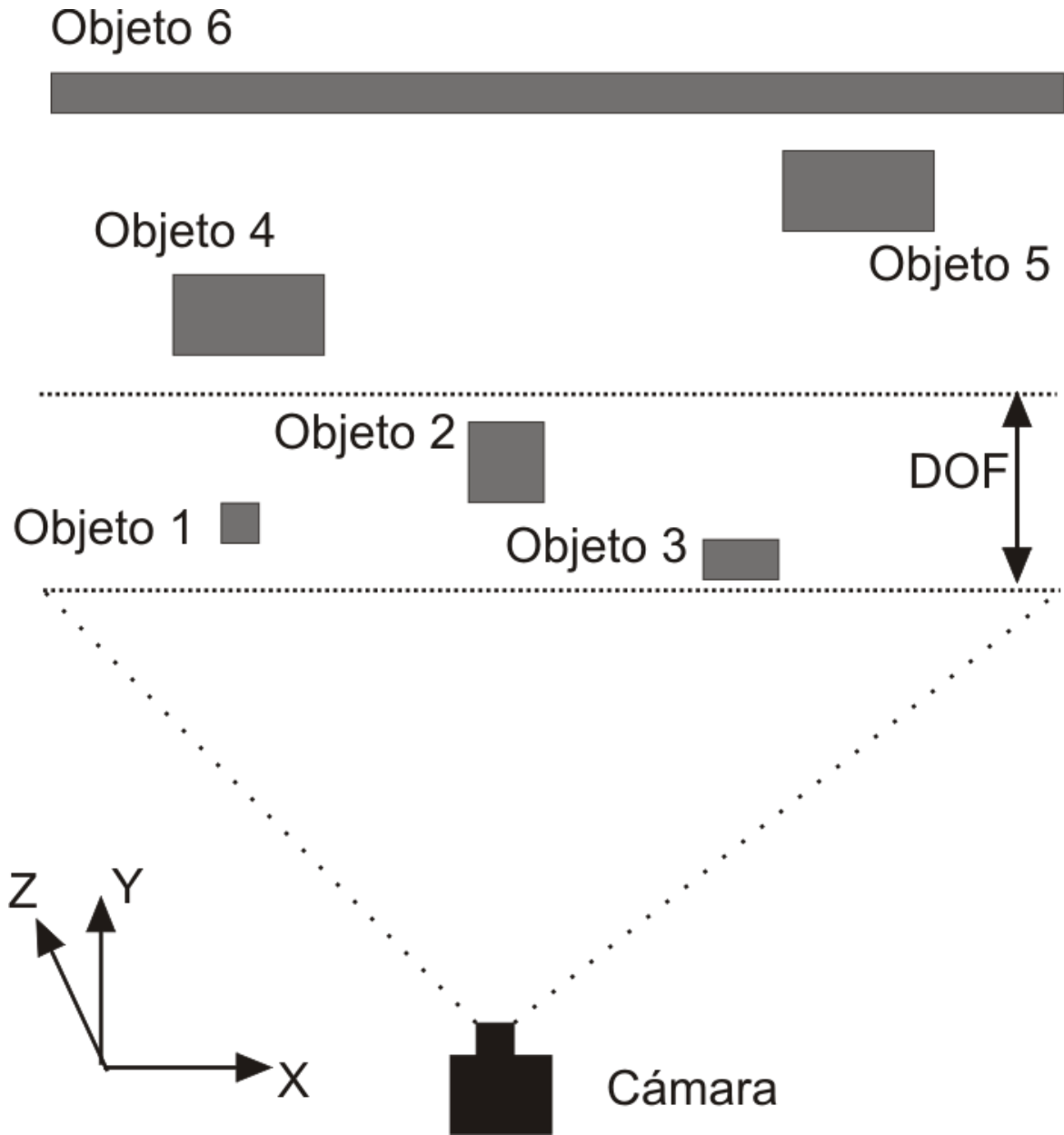
velocidad del flujo por medio una división de las distancias de desplazamiento sobre el intervalo de tiempo que existe entre dos fotografías consecutivas.

A continuación se describen a detalle, cada uno de los pasos descritos para la aplicación exitosa de la técnica BIV en el laboratorio.

### 4.2.1 Definición de los parámetros fotográficos

La definición de los parámetros fotográficos del lente de la cámara, representa una actividad clave para la correcta aplicación de esta técnica. El propósito fundamental de esta actividad consiste en definir, dentro de la región de estudio, una zona de alta nitidez que permita el rastreo de los procesos físicos asociados al movimiento de la hidrodinámica del fluido que se induce durante la propagación y rotura del oleaje tipo voluta. Para ello se utiliza la definición de la profundidad de campo (DOF) de las fotografías obtenidas.

La profundidad de campo, representa el grosor de una escena tridimensional que en el plano bidimensional de la fotografía aparece muy bien enfocada. Tal y como se muestra en la vista en planta de una escena en la Figura 4.2, los objetos que aparecerían muy bien enfocados en el plano XZ de la fotografía son aquellos que se encuentran dentro de la región definida por la profundidad de campo. En este caso, esos objetos aparecen etiquetados con los números 1, 2 y 3, mientras que los objetos restantes por estar fuera de esta región aparecerían borrosos en la fotografía. La profundidad de campo se determina a partir de la variación de tres parámetros que definen al lente fotográfico, estos son: la apertura de lente, su distancia focal y la distancia entre la cámara y el punto de foco.



**Figura 4.2** Esquema de definición de la profundidad de campo (zona entre las líneas horizontales punteadas) en el plano XZ (vista en planta).

#### 4.2.2 Apertura de lente

El lente utilizado para la captura de las fotografías de alta velocidad fue un gran angular de 25 mm marca Navitec (ver Figura 4.3). La apertura se refiere al tamaño de la abertura del lente, que determina la cantidad de luz que cae sobre la película o el sensor de la cámara

## Capítulo 4. Velocimetría por Trazado de Burbujas

fotográfica. El tamaño de la apertura se controla mediante un diafragma de hojas solapadas y ajustables similar a las pupilas de los ojos. La apertura afecta así la exposición y la profundidad del campo visual.



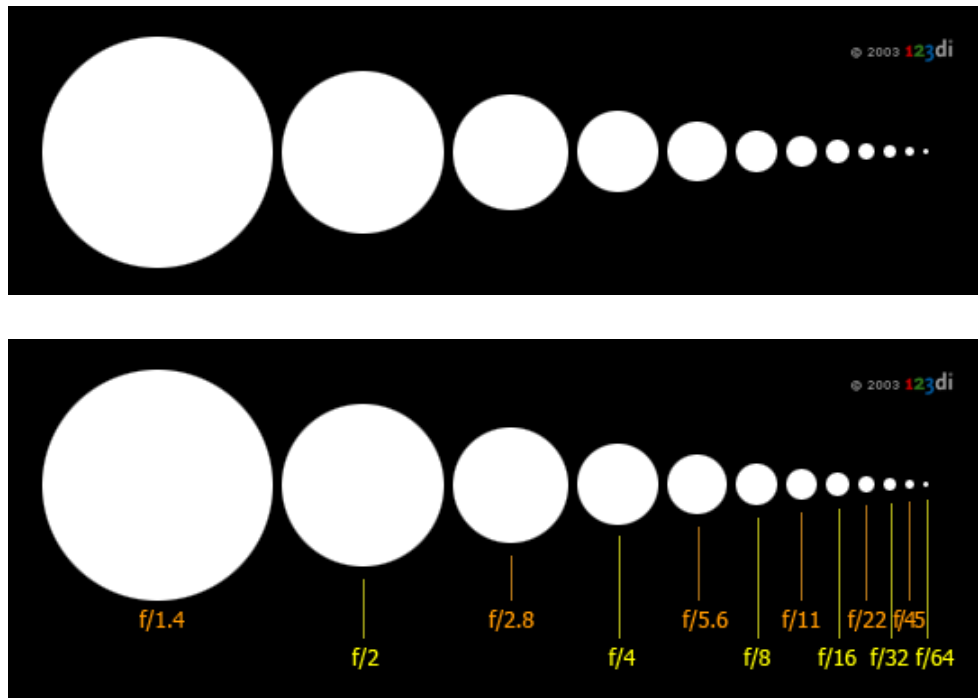
**Figura 4.3** a) Cámara de alta velocidad Fastec; b) Lente de 25mm utilizado.

En un lente fotográfico, las diferentes aperturas sucesivas de mayor a menor reducen la cantidad de luz que entra en la cámara de mitad en mitad. Para lograr esto, el diafragma reduce el diámetro de su apertura en un factor de 1.4 (la raíz cuadrada del número 2), de tal forma que la superficie de la apertura se reduce en la mitad con cada paso sucesivo, tal y como se muestra en la Figura 4.4.

Tomando como base los principios ópticos básicos, los tamaños y diámetros de la apertura dependen de la longitud de foco

Por ejemplo, un diámetro de apertura de 25 mm en un lente de 100 mm tiene el mismo efecto que un diámetro de 50 mm de apertura en un lente de 200 mm. Si se divide el diámetro de la apertura entre la longitud de foco, el resultado será  $\frac{1}{4}$  en ambos casos, independiente de la longitud focal. Expresar las aperturas como fracciones de la longitud de foco es más práctico para los fotógrafos que utilizar los tamaños absolutos de apertura. Estos valores “relativos” de apertura se llaman números-f o f-stops. En el lente, el valor de  $\frac{1}{4}$  se escribe como f/4 o F4 o 1:4. En consecuencia, la siguiente apertura tendrá un diámetro que es 1.41 veces más pequeña, de forma tal que el f-stop después de f/4 será  $f/4 \times 1.4$  es

decir  $f/5.6$ . Al cambiar la apertura del lente de  $f/4$  a  $f/5.6$  se logra una reducción a la mitad de la cantidad de luz que entra al sensor, sin importar la longitud de foco.



**Figura 4.4** Diámetros de apertura en el lente y su relación con el número f del lente fotográfico.

Dentro de las pruebas utilizadas en esta tesis, se utilizaron números f de 5.6 y 8, que previenen la entrada de una gran cantidad de luz al sensor de la cámara fotográfica.

### 4.2.3 Distancia focal

Se define la distancia focal como la existente entre el plano de la imagen y el plano de la óptica. Se mide en milímetros y varía en función del tipo de cámara. Así, mientras en una cámara tipo réflex de 35 mm maneja rangos entre 28 y 85 mm para las ópticas más comunes, en una cámara digital se tienen valores habituales entre 7 y 32 mm. Este parámetro afecta la ampliación y el ángulo de visión de los objetos.



## Capítulo 4. Velocimetría por Trazado de Burbujas

El plano de la imagen es la superficie del interior de la cámara donde se concentran los rayos de luz para lograr una imagen enfocada. En otras palabras, se trata del plano donde se encuentra el sensor electrónico.

La distancia focal corresponde a la distancia que existe entre el centro del lente y el sensor de la cámara cuando se forma la imagen del objeto que se encuentra en el infinito y a su vez está completamente enfocado (ver Figura 4.5b), para el caso del lente utilizado en este trabajo la distancia focal tiene un valor de 25 mm.

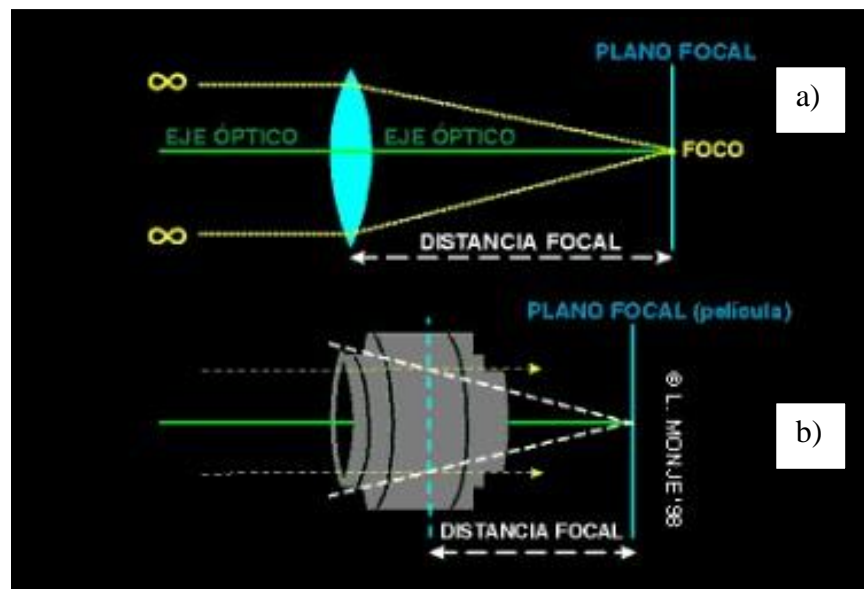


Figura 4.5 Esquema de la distancia focal para un lente óptico (a) y uno fotográfico (b).

### 4.2.4 Distancia entre la cámara y el sujeto en foco

Un último factor que se tomó en cuenta para la obtención de la profundidad de campo corresponde a la distancia entre la cámara y el sujeto en foco, también conocida como enfoque (ver Figura 4.6). Este parámetro permite definir las distancias (L), a las cuales se ubica el punto de foco de la escena que se desea fotografiar. Para el caso de las pruebas realizadas en este trabajo de investigación la distancia de trabajo se definió en  $L=1.1$ .



**Figura 4.6** Perilla de regulación para la definición de la distancia (L) entre cámara y sujeto de foco.

Una vez determinados los valores de estos tres parámetros fotográficos, se puede estimar la profundidad de campo de las fotografías capturadas. La profundidad de campo se calculó por medio de las ecuaciones propuestas por Ray, 2002, donde el límite más próximo de nitidez, R, y el límite más lejano de nitidez, S, del DOF se expresan como  $R=Lf^2/(f^2+NLC)$  y  $S=Lf^2/(f^2-NLC)$ , en los que f es la distancia focal del lente de la cámara central, C es el valor del círculo de confusión que depende de la cámara utilizada ( $C=0.01$ ) y N es el número f de la apertura de la cámara. Una vez definidos ambos extremos de nitidez para esta región, la profundidad de campo, se calcula por medio de la siguiente expresión  $D=S-R$ . En la mayor parte de los casos presentados en esta tesis el  $DOF = 0.22$  m.

### 4.2.5 Fotografías de alta velocidad (imágenes naturales)

Una vez definidos los parámetros fotográficos asociados a la escena de estudio, el paso siguiente en la metodología consiste en las fotografías monocromáticas. Para ello, la cámara de alta velocidad fue ubicada de forma perpendicular a la dirección de flujo de las olas y al cristal del canal de oleaje, tal y como se muestra en la Figura 4.7.



**Figura 4.7** Ubicación de la instrumentación utilizada para el desarrollo de la técnica del BIV.

El intervalo de tiempo entre cada fotografía se definió de tal manera que fue posible dar seguimiento al movimiento de las burbujas entre cuadros fotográficos consecutivos. Este intervalo quedó definido como  $dt=0.000992$  s, es decir se capturaron 1008 fotos por segundo, con una resolución de 1120 x 618 pixeles. En la Figura 4.8 se muestran seis instantes no consecutivos obtenidos por la cámara de alta velocidad, en los que se aprecia el impacto y propagación de la ola sobre la rampa impermeable.

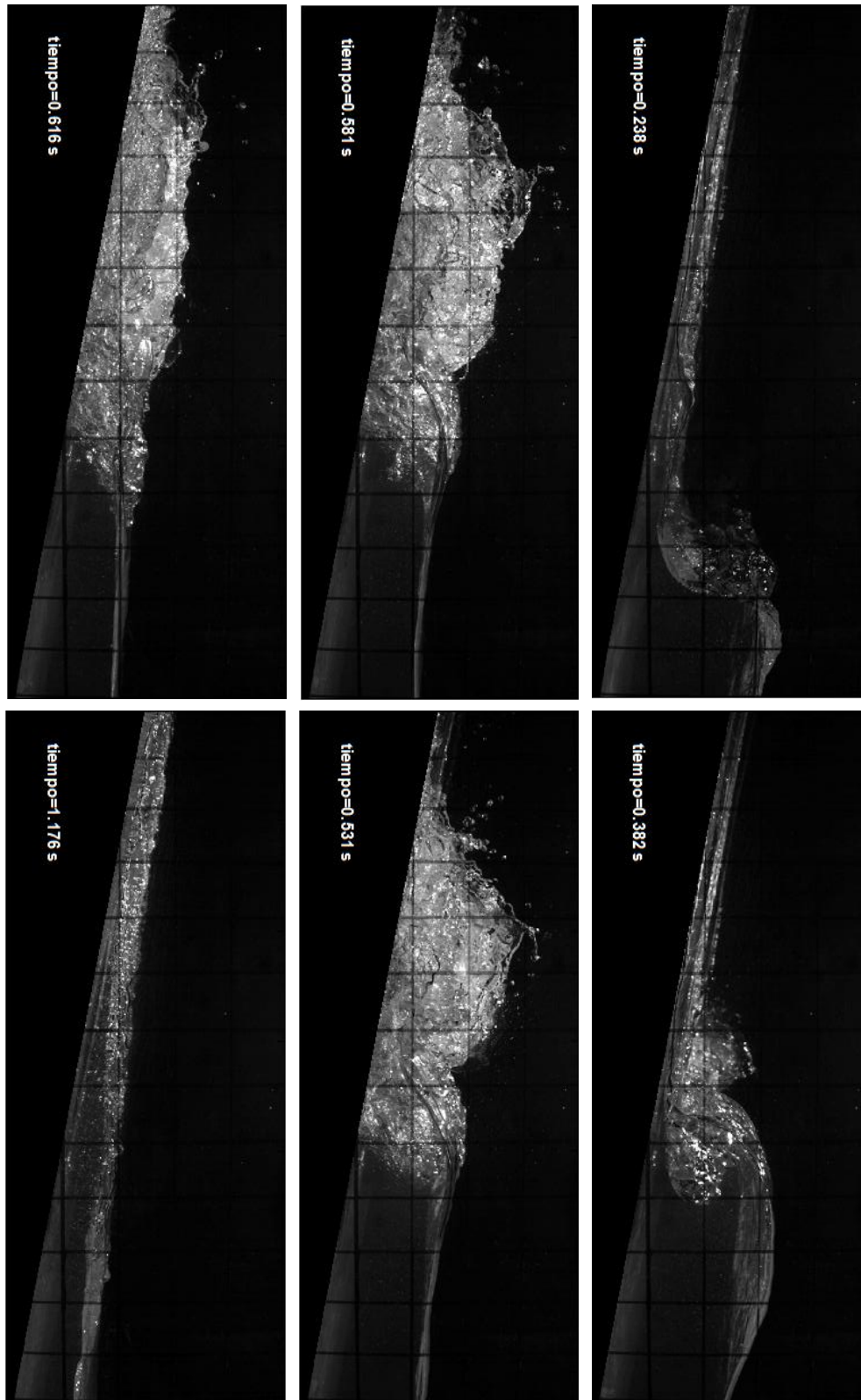


Figura 4.8 Instantes no consecutivos de imágenes naturales para una ola en rotura ( $H=10\text{cm}$ ,  $T=1.5\text{s}$ )

### 4.2.6 Procesamiento de imágenes (inversión de color y recorte de la zona de interés)

Una vez capturadas las fotografías, se utiliza una técnica de inversión de color conocida como seguimiento de sombras o “shadowgraphy”, la cual ha sido empleada con éxito por investigadores como Hassan *et al.* (1998), Nishino *et al.* (2000), Lindken y Merzkirch (2002). Este método consiste en utilizar una fuente de luz muy intensa sobre el objeto que se desea seguir en las imágenes (ej. burbujas), con el propósito de que una vez invertida la imagen el objeto de interés aparezca negro en fondo blanco.

El procesamiento de las imágenes monocromáticas consiste en realizar la inversión de color de las imágenes naturales, y con ello la obtención de una mejor identificación respecto a las formas y texturas de las burbujas, generadas en la zona de rotura. Con este procedimiento la visualización de las burbujas es mucho más clara y su identificación en la fotografía es inmediata.

A manera de ejemplo, la Figura 4.9 presenta los instantes mostrados en la Figura 4.8 una vez que se ha realizado la inversión de color. Es evidente que en todas las fotografías mostradas, las burbujas presentes en el fluido son resaltadas por medio de la aplicación de esta técnica y aparecen como puntos negros en una imagen predominantemente blanca. Así, las burbujas funcionan como trazadores del campo de velocidades de un fluido altamente caótico y turbulento. Este esfuerzo de investigación representa el primer estudio de aplicación de la técnica BIV para flujos generados por oleaje en rotura sobre una playa impermeable. Es evidente que para el caso de estudio, la técnica del BIV proporciona una herramienta ideal para conocer las características del flujo en la zona de rotura del oleaje.

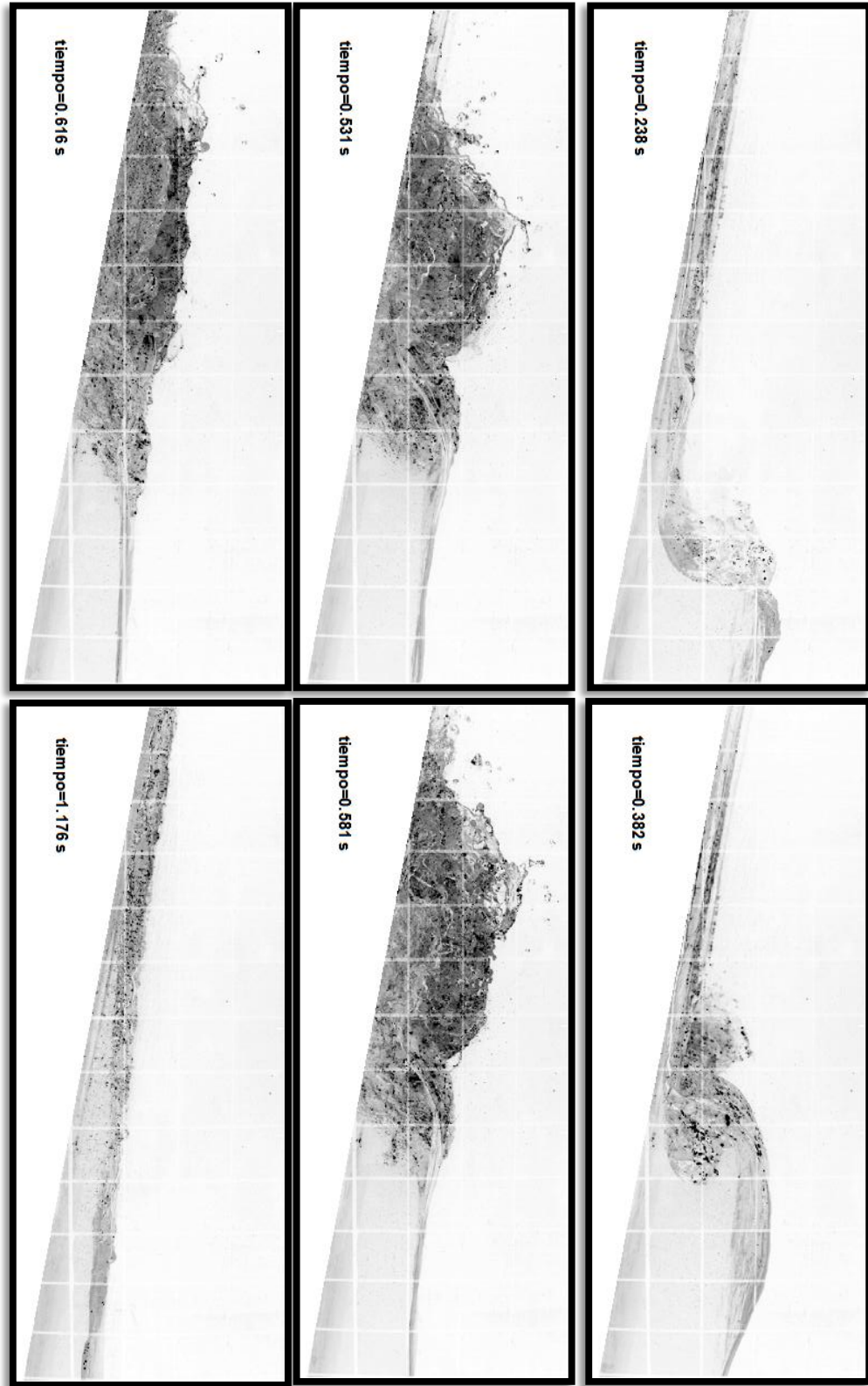
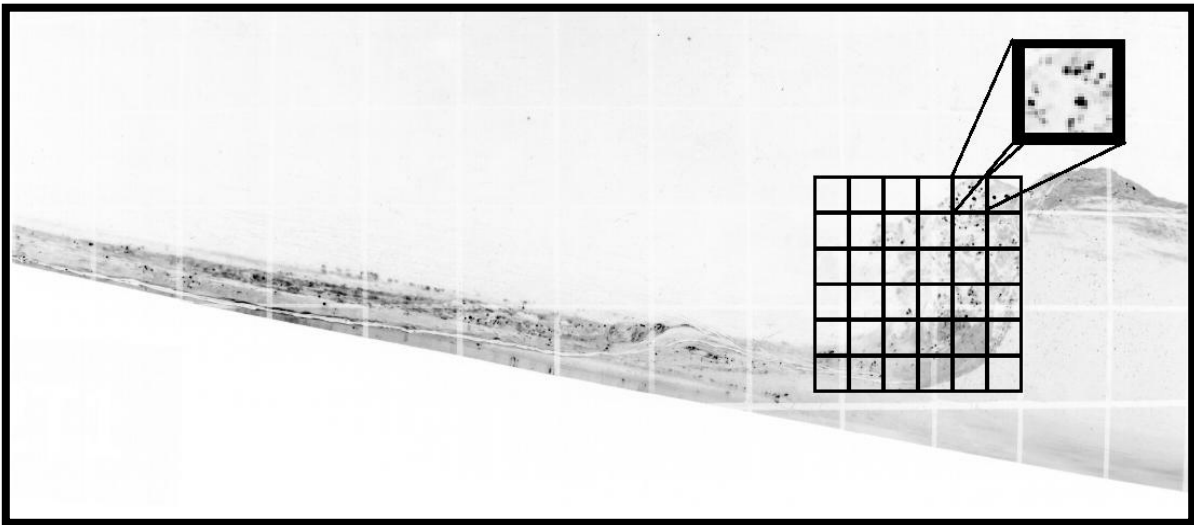


Figura 4.9 Ejemplo de las imágenes procesadas con la técnica de inversión de color (H=10cm; T=1.5s).

### 4.2.7 Algoritmo de correlación

El cuarto paso en la aplicación de la técnica BIV consiste en la aplicación del algoritmo de correlación llamado diferencia de mínimos cuadrado (MQD). Este algoritmo, es exactamente el mismo que se utiliza en los registros digitales de trazado de partículas con rayo láser (PIV) (Gui y Merzkirch, 1996). El método MQD se utiliza para el cálculo de los desplazamientos de las burbujas entre dos fotografías consecutivas. Este desplazamiento se determina en número de pixeles dentro de la fotografía.

Para ello se define un área de interrogación que representa un número limitado de pixeles, mucho más pequeño que el de la fotografía completa. De tal suerte que el algoritmo se repite de forma iterativa hasta cubrir toda la superficie de la misma, esta zona de interrogación, está definida en nuestro trabajo por un área de 32 pixeles en la vertical por 32 pixeles en la horizontal, lo que representa una subregión física en la foto de tamaño constante donde se aplica el algoritmo. La Figura 4.10 ilustra de forma gráfica la definición del área de interrogación para una de las fotografías adquiridas en este estudio. En el pequeño recuadro se aprecian claramente las burbujas a las que se les da seguimiento en las fotografías consecutivas.



**Figura 4.10** Definición del área de interrogación de 32x32 pixeles empleada para la aplicación del MQD en este estudio.

## Capítulo 4. Velocimetría por Trazado de Burbujas

La Figura 4.11 presenta una explicación gráfica del funcionamiento del algoritmo de correlación MQD. En ella se identifican dos imágenes consecutivas en el eje vertical (ej. tiempo), de tal manera que en la primera zona de interrogación señalada como  $g_1(i,j)$  se busca un patrón o textura (ej. burbuja) de tamaño  $M$  por  $N$  pixeles mostrado en la Figura 4.11 como un recuadro en gris oscuro  $G_1$ , con coordenadas de localización  $(x_0, y_0)$ , dentro del área de interrogación. En la fotografía posterior y dentro de la misma región de interrogación se localiza al patrón identificado en la fotografía anterior en su nueva posición (debida al movimiento del fluido) identificando en la imagen como  $G_2$ . La comparación de las posiciones de ambos patrones  $G_1$  y  $G_2$  dentro del área de interrogación determina una distancia de desplazamiento  $S$ .

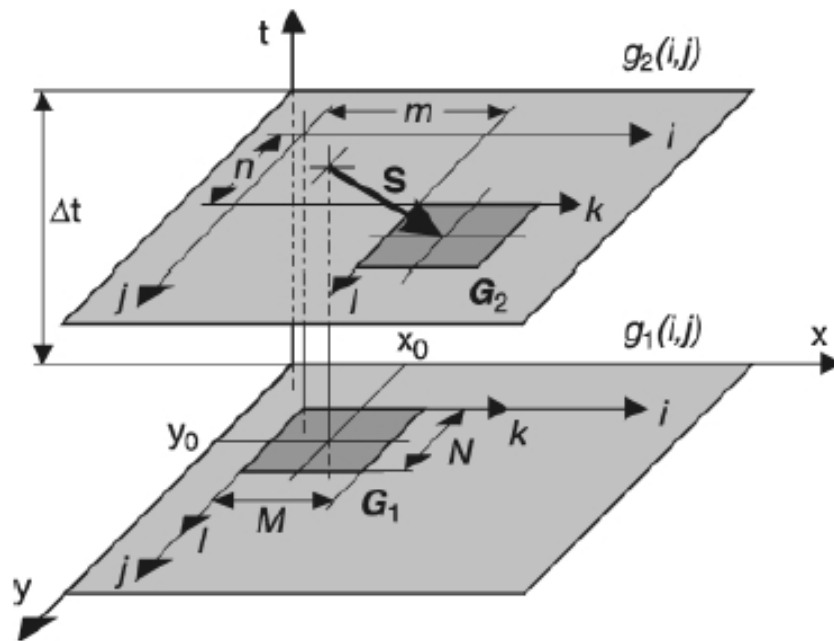
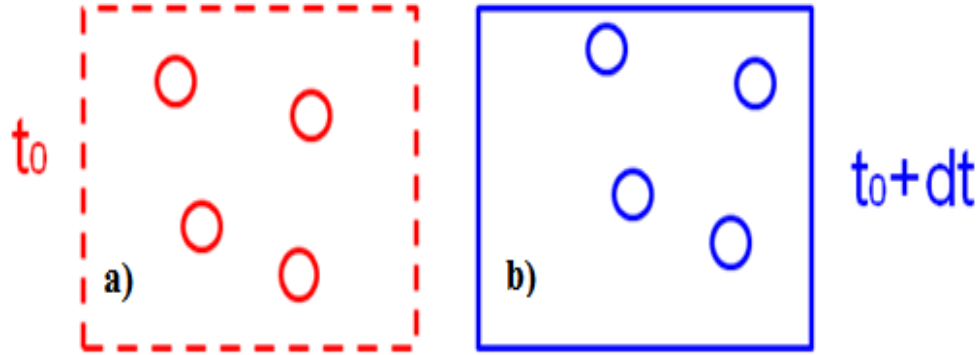


Figura 4.11 Seguimiento de partículas superponiendo dos imágenes consecutivas.

En la Figura 4.12 se presenta de forma gráfica el desplazamiento de las partículas dentro de una misma área de interrogación. El panel izquierdo ilustra la posición de cuatro partículas en un tiempo  $t_0$ , mientras que el panel derecho identifica las mismas partículas en la siguiente fotografía tomada en un tiempo  $t_0 + dt$ . Es evidente que la posición de las cuatro partículas ha sido modificada de uno a otro instante consecutivo.





**Figura 4.12** Ejemplo de ubicación de burbujas o partículas dentro de una misma área de interrogación en dos fotografías consecutivas.

Si  $G_1$  y  $G_2$  son áreas limitadas de tamaño  $M \times N$  pixeles, estas pueden ser representadas en dos matrices tal que:

$$G_1 = \{G_{k,l}^a\} = \begin{pmatrix} G_{11}^a & G_{21}^a & \cdots & G_{M1}^a \\ G_{12}^a & G_{22}^a & \cdots & G_{M2}^a \\ \vdots & & & \vdots \\ G_{1N}^a & G_{2N}^a & & G_{MN}^a \end{pmatrix} \quad (\text{Ecuación 4.1})$$

y

$$G_2 = \{G_{k,l}^b\} = \begin{pmatrix} G_{11}^b & G_{21}^b & \cdots & G_{M1}^b \\ G_{12}^b & G_{22}^b & \cdots & G_{M2}^b \\ \vdots & & & \vdots \\ G_{1N}^b & G_{2N}^b & & G_{MN}^b \end{pmatrix} \quad (\text{Ecuación 4.2})$$

Y la diferencia en la información capturada entre ambas matrices queda definida por:

$$|G_1 - G_2| = \sqrt{\sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{N-1} (G_{k,l}^a - G_{k,l}^b)^2} = \sqrt{\sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} [g_1(i, j) - g_2(i+m, j+n)]^2}$$

(Ecuación 4.3)

Donde,  $g_1(i,j)$  y  $g_2(i,j)$ , son los valores sombreados de los pixeles  $(i,j)$  en los dos registros del campo de imagen de partículas separados por un intervalo de tiempo  $\Delta t$ . Por su parte,

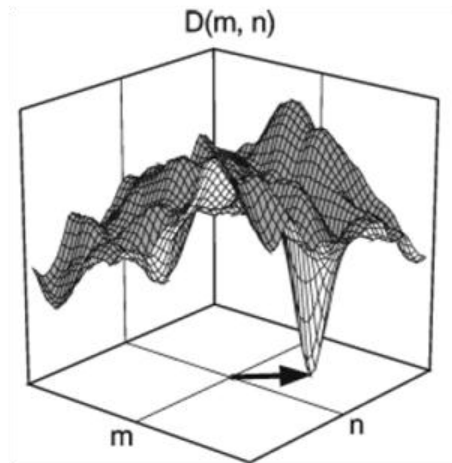
## Capítulo 4. Velocimetría por Trazado de Burbujas

(m, n) representan la posición del patrón  $G_2$  relativa a  $G_1$ . Naturalmente, las áreas cubiertas por los patrones  $G_1$  y  $G_2$  representan fracciones pequeñas de la totalidad del área de interrogación.

De acuerdo con la ecuación (4.3) el desplazamiento del patrón de seguimiento puede ser definido a partir de la diferencia cuadrática mínima (MQD), tal que la función  $D(m, n)$ , de desplazamiento entre  $G_1$  y  $G_2$ , queda definida por:

$$D(mn) = \frac{1}{MN} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} [g_1(i, j) - g_2(i+m, j+n)]^2 \quad (\text{Ecuación 4.4})$$

Si se varían los valores de m y n en dos imágenes consecutivas, el MQD es similar a un algoritmo de correlación cruzada, con la diferencia de que en el MQD el mínimo es el que indica el desplazamiento (ver Figura 4.13).



**Figura 4.13** Evaluación de funciones D por medio de un método MQD.

De acuerdo a Willert y Gharib (1991) se define a la función de correlación entre un par de imágenes  $g_1(i,j)$  y  $g_2(i,j)$ , por medio de la siguiente expresión matemática expresada en un plano infinito ( $-\infty < i < +\infty, -\infty < j < +\infty$ ) tal que:

$$\Phi(m, n) = \frac{\sum_{i=-\infty}^{+\infty} \sum_{j=-\infty}^{+\infty} g_1(i, j) \cdot g_2(i+m, j+n)}{\sum_{i=-\infty}^{+\infty} \sum_{j=-\infty}^{+\infty} g_1(i, j) \cdot \sum_{i=-\infty}^{+\infty} \sum_{j=-\infty}^{+\infty} g_2(i, j)}$$

(Ecuación 4.5)

## Capítulo 4. Velocimetría por Trazado de Burbujas

---

En la práctica, es evidente que  $g_1(i,j)$  y  $g_2(i,j)$ , están limitados por un plano de dimensiones finitas (ej. el área de interrogación). La aplicación de la transformada rápida de Fourier para determinar la correlación en una ventana con tamaño de  $M \times N$  pixeles, requiere suponer que  $g_1(i,j)$  y  $g_2(i,j)$ , están distribuidas de forma periódica en el plano  $i,j$  a saber:

$$\left. \begin{aligned} g_1(i, j) &= g_1(i + kM, j + lN) \\ g_2(i, j) &= g_2(i + kM, j + lN) \end{aligned} \right\} k, l = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$$

(Ecuación 4.6)

Si se omite el denominador constante expresado en la ecuación (4.5) la función de correlación queda definida por:

$$\Phi(m, n) = \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} g_1(i, j) \cdot g_2(i + m, j + n)$$

(Ecuación 4.7)

En este método se asume que el par de áreas de interrogación tienen valores continuos de distribución de grises  $g_1(x,y)$  y  $g_2(x,y)$  y que el patrón al que se le da seguimiento en ambas imágenes está encuadrado en los rangos de coordenadas de  $[x_0, x_1]$ ,  $[y_0, y_1]$ . La función continua de correlación se determina, entonces, por:

$$\Phi(m, n) = \int_{y_0}^{y_1} \int_{x_0}^{x_1} g_1(x, y) \cdot g_2(x + m, y + n) dx dy \quad \text{(Ecuación 4.8)}$$

Si el patrón descrito en la imagen por  $g_1(x,y)=f(x,y)$  es desplazado una distancia  $(m^*, n^*)$ , el valor de esta distribución de grises en la segunda imagen está definido por  $g_2(x,y)=f(x-m^*, y-n^*)$ . La suposición clave del método estriba en que todas las partículas trazadoras que aparecen en la imagen o ventana de interrogación se desplazan exactamente la misma distancia  $(m^*, n^*)$ . En otras palabras que no hay distorsión en el patrón de burbujas. Por lo tanto, la función de correlación y sus derivadas parciales se escriben como:

## Capítulo 4. Velocimetría por Trazado de Burbujas

---

$$\Phi(m, n) = \int_{y_0}^{y_1} \int_{x_0}^{x_1} f(x, y) \cdot f(x + m - m^*, y + n - n^*) dx dy$$

$$\Phi_m^{\cdot}(m, n) = \int_{y_0}^{y_1} \int_{x_0}^{x_1} f(x, y) \cdot f_{x+m-m^*}^{\cdot}(x + m - m^*, y + n - n^*) dx dy$$

$$\Phi_n^{\cdot}(m, n) = \int_{y_0}^{y_1} \int_{x_0}^{x_1} f(x, y) \cdot f_{x+n-n^*}^{\cdot}(x + m - m^*, y + n - n^*) dx dy$$

(Ecuación 4.9)

El símbolo  $\cdot$  significa la derivada respecto a cada dirección espacial de ambas funciones, la de autocorrelación y la  $f$ .  $\Phi(m, n)$  debe de tener un máximo en el punto de desplazamiento  $(m^*, n^*)$  con derivadas parciales  $\Phi_m^{\cdot}, \Phi_n^{\cdot}$  iguales a cero. En otras palabras se deben cumplir las condiciones de la siguiente expresión:

$$\Phi_m^{\cdot}(m^*, n^*) = \int_{y_0}^{y_1} \int_{x_0}^{x_1} f(x, y) \cdot f_x^{\cdot}(x, y) dx dy$$

$$= \frac{1}{2} \int_{y_0}^{y_1} g_1(x_1, y)^2 dy - \frac{1}{2} \int_{y_0}^{y_1} g_1(x_0, y)^2 dy = 0$$

(Ecuación 4.10)

$$\Phi_n^{\cdot}(m^*, n^*) = \int_{y_0}^{y_1} \int_{x_0}^{x_1} f(x, y) \cdot f_y^{\cdot}(x, y) dx dy$$

$$= \frac{1}{2} \int_{x_0}^{x_1} g_1(x_1, y_1)^2 dx - \frac{1}{2} \int_{x_0}^{x_1} g_1(x, y_0)^2 dy = 0$$

(Ecuación 4.11)

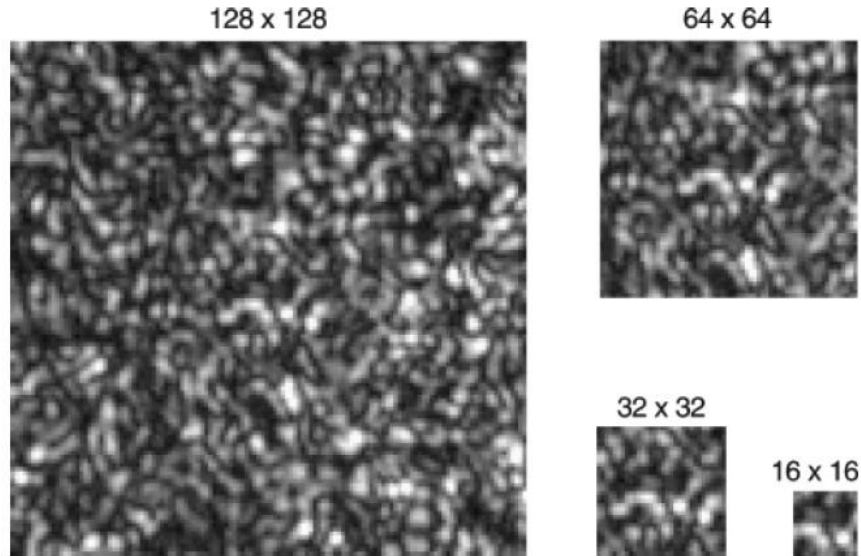
Con el propósito de que se satisfagan las igualdades de las expresiones (4.10) y (4.11), la suma de las distribuciones de grises al cuadrado a lo largo de los bordes paralelos y opuestos de cada patrón de rastreo debe ser idéntica. En los métodos PIV, si la ventana de interrogación es muy grande y la distribución de los patrones de rastreo es estocástica, la condición que se presenta en estas ecuaciones puede ser aproximada (ej. no exacta). Esto significa que la posición del máximo de correlación  $\Phi(m, n)$  puede no coincidir perfectamente con el valor verdadero del desplazamiento  $(m^*, n^*)$ . En el caso del método

MQD, Gui (1997) demostró que la condición expresada en estas ecuaciones (4.10 y 4.11) es cubierta a cabalidad. Así el mínimo de la función  $D(m,n)$  de acuerdo a la expresión (4.4) determina el desplazamiento verdadero ( $m^*,n^*$ ).

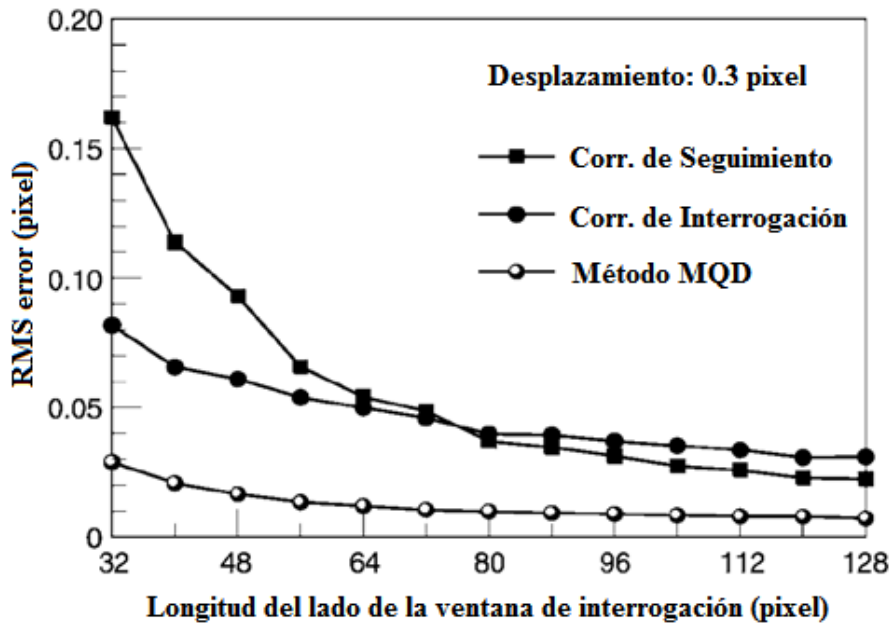
### 4.2.7.1 Influencia del tamaño de la ventana

Es conocido que el tamaño de la ventana de interrogación tiene una influencia clara en la precisión de los métodos PIV. Como se ha visto, esta región comprende un área de dimensión definida que será utilizada para llevar a cabo el MQD a lo largo de toda la imagen que se desea analizar, a fin de establecer el campo de velocidad de flujo en esa imagen. Ejemplos de cuatro diferentes tamaños de ventanas de interrogación se ilustran en la Figura 4.14 para el caso de una medición de manchas con rayo láser.

Diversos investigadores experimentales han reportado que el sistema PIV, que tiene como base un método de correlación simple, tiende a subestimar los valores reales de velocidad en un flujo. Esto es particularmente cierto en los casos en los que se utilizan tamaños de ventana de interrogación muy pequeños (Freek *et al.* 1996,1997). Gui y Merzkirch (2000) demostraron que si se utilizan algoritmos de correlación tipo PIV, es necesario considerar una resolución mayor (ventanas de interrogación más pequeñas) para obtener resultados similares a aquellos extraídos por medio de la técnica MQD. Estos últimos no son tan dependientes del tamaño de la ventana de análisis (ver Figura 4.15).



**Figura 4.14** Cuatro diferentes tamaños de ventana de interrogación para el caso de manchas de rayo láser (modificada de Gui y Merzkirch, 2000).



**Figura 4.15** Dependencia del error cuadrático medio en función del tamaño de la ventana de interrogación.

### 4.2.7.2 Aceleración del MQD por medio de la Transformada Rápida de Fourier (TRF)

Cabe señalar que la evaluación de imágenes por medio de la técnica MQD, en su forma original presentada en la ecuación (4.4) requiere de grandes capacidades de cómputo. Con el propósito de acelerar el procesamiento de la información con este método, se emplea la técnica de la Transformada Rápida de Fourier (TRF), así la función de interrogación  $D(m,n)$  se sustituye por una función equivalente  $D^*(m,n)$  que de acuerdo a Gui y Merzkirch (1996) se define como:

$$\begin{aligned}
 D^*(m,n) &= M \cdot N \cdot D(m,n) - \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} g_1(i,j)^2 \\
 &= Q(m,n) - 2\Phi(m,n) \\
 \text{Con: } Q(m,n) &= \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} g_2(i+m, j+n)^2
 \end{aligned}$$

(Ecuación 4.12)

donde  $\Phi(m,n)$  es la función de seguimiento de la correlación tal y como se definió en la ecuación (4.7). Dado que  $g_1$  y  $g_2$  no se asumen como funciones periódicas, el cálculo de esta función de correlación no puede ser acelerado por medio del uso directo de la TRF. Sin embargo, la técnica de la TRF puede utilizarse para calcular  $\Phi^*(m,n)$  si se emplea una técnica de barrido similar a la que se describe en Gui y Merzkirch (1998).

El procedimiento comprende los siguientes pasos:

1. Definir la periodicidad de  $M^*$ ,  $N^*$  para una función de correlación periódica  $\Phi^*(m,n)$  enteros

$$\begin{cases} M^* = 2^\alpha & \text{si } 2^{\alpha-1} < M + 2\rho \leq 2^\alpha \\ N^* = 2^\beta & \text{si } 2^{\beta-1} < N + 2\rho \leq 2^\beta \end{cases} \quad \alpha, \beta : \text{enteros}$$

(Ecuación 4.13)

## Capítulo 4. Velocimetría por Trazado de Burbujas

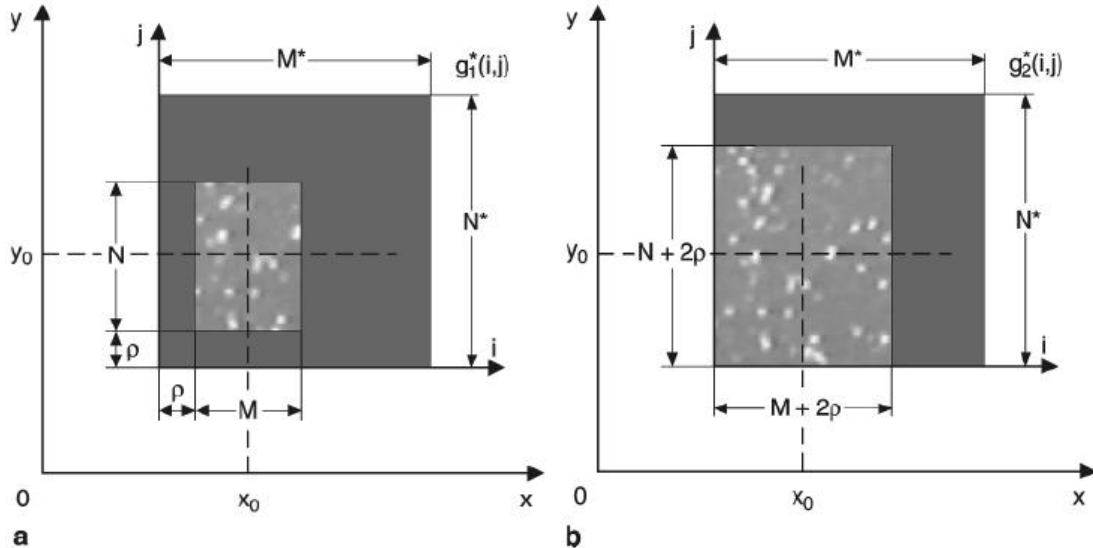
2. Definir una función  $g_1^*(i, j)$  dentro de la región  $[0 \leq i < M^*, 0 \leq j < N^*]$  ver Figura 4.16a, tal que:  $g_1^*(i, j) = g_1(i - \rho, j - \rho)$  si  $\rho \leq i < M + \rho$  y  $\rho \leq j < N + \rho$  ó  $g_1^*(i, j) = 0$  en cualquier otro sitio del dominio.
3. Definir una función  $g_2^*(i, j)$  dentro de la región  $[0 \leq i < M^*, 0 \leq j < N^*]$  ver Figura 4.16b, tal que:  $g_2^*(i, j) = g_2(i - \rho, j - \rho)$  si  $\rho \leq i < M + 2\rho$  y  $\rho \leq j < N + 2\rho$  ó  $g_2^*(i, j) = 0$  en cualquier otro sitio del dominio.
4. Determinar las funciones periódicas  $g_1^*(i, j)$ ,  $g_2^*(i, j)$

$$\begin{cases} g_1^*(i + kM^*, j + lN^*) = g_1^*(i, j) \\ g_2^*(i + kM^*, j + lN^*) = g_2^*(i, j) \end{cases} \quad k, l = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots$$

5. Calcular la función de correlación  $\Phi^*(m, n)$  por medio de la TRF

$$\Phi^*(m, n) = \sum_{i=0}^{M^*-1} \sum_{j=0}^{N^*-1} g_1^*(i, j) \cdot g_2^*(i+m, j+n)$$

(Ecuación 4.14)



**Figura 4.16** Definición de las funciones correlacionadas para el cálculo de la función de seguimiento de correlación  $\Phi(m, n)$  con la TRF.



Donde  $\rho$  es el radio de seguimiento, que determina la componente máxima del desplazamiento de la partícula (o burbuja) dentro de la imagen, que puede ser estimada por medio del algoritmo. De acuerdo con Gui (1997) la función  $\Phi^*(m,n)$  es exactamente igual a  $\Phi(m,n)$  en la región definida por  $[-\rho \leq m < \rho, -\rho \leq n < \rho]$ . De esta forma, si  $g_2(i,j)^2$  ha sido evaluada con anterioridad en la zona de interrogación, el cálculo de  $Q(m,n)$  sólo requiere de sumatorias que pueden realizarse de forma rápida. La nueva evaluación de la función  $D^*(m,n)$  se puede realizar por medio del cálculo de  $\Phi(m,n)$  y  $Q(m,n)$ .

### 4.2.8 Cálculo del campo de velocidades

Una vez estimados los desplazamientos de los trazadores (ej. burbujas) entre ambas imágenes consecutivas a través del algoritmo de correlación MQD, el cómputo del campo de velocidad para toda la imagen se obtiene por medio de una simple división de los desplazamientos obtenidos sobre el intervalo de tiempo entre las dos fotografías consecutivas. Cabe mencionar que sólo se obtiene un vector de desplazamiento por área de interrogación y que está definido en un cierto número de pixeles (que representa el promedio del desplazamiento de todas las burbujas que aparecen en esa área).

Para obtener las velocidades en unidades de velocidad (ej. cm/s o m /s) se requiere un factor de escala que revele la proporción entre cm y pixeles en la imagen. Así, la expresión que se utiliza para el cálculo de las velocidades en la zona de rotura, está dada por:

$$\mathbf{V} = \mathbf{k} \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (\text{Ecuación 4.15})$$

Donde:

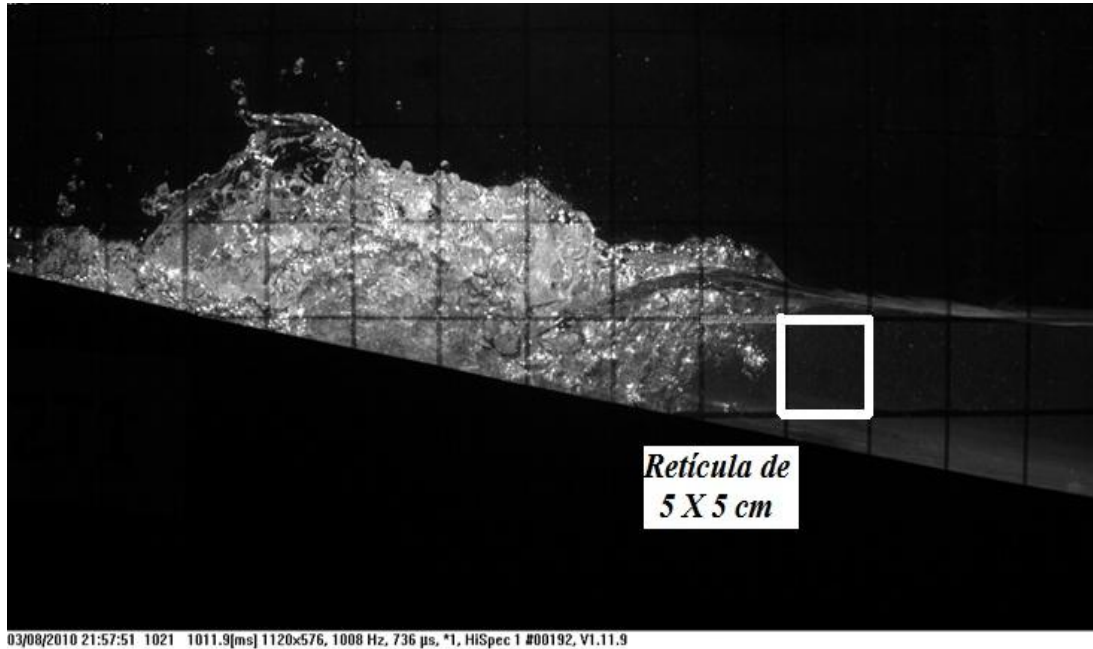
**k**: Es el factor de proporción para ambas dimensiones  $(k_x, k_y)$  que define la relación pixel/cm dentro de las fotografías.

$\Delta x$ : representa el desplazamiento de las burbujas, estimado por medio del algoritmo MQD.

$\Delta t$ : define el intervalo de tiempo entre dos fotografías consecutivas.

## Capítulo 4. Velocimetría por Trazado de Burbujas

Para la definición del parámetro de proporción  $k$ , se dibujó en la pared del canal de cristal templado, una retícula cuadrada con dimensiones de 5 cm x 5 cm, esto permitió estimar para todas las fotografías un factor de proporción entre los centímetros observados en la imagen y los pixeles que contienen a esa región. La Figura 4.17 presenta una muestra de las fotografías obtenidas en este trabajo de investigación en la que se resalta la retícula dibujada sobre la pared del canal.



**Figura 4.17** Imagen de muestra en la que se hace referencia a la retícula cuadrada para la definición del factor de proporción  $k$  en todas las fotografías.

### 4.3 Validación de la técnica BIV

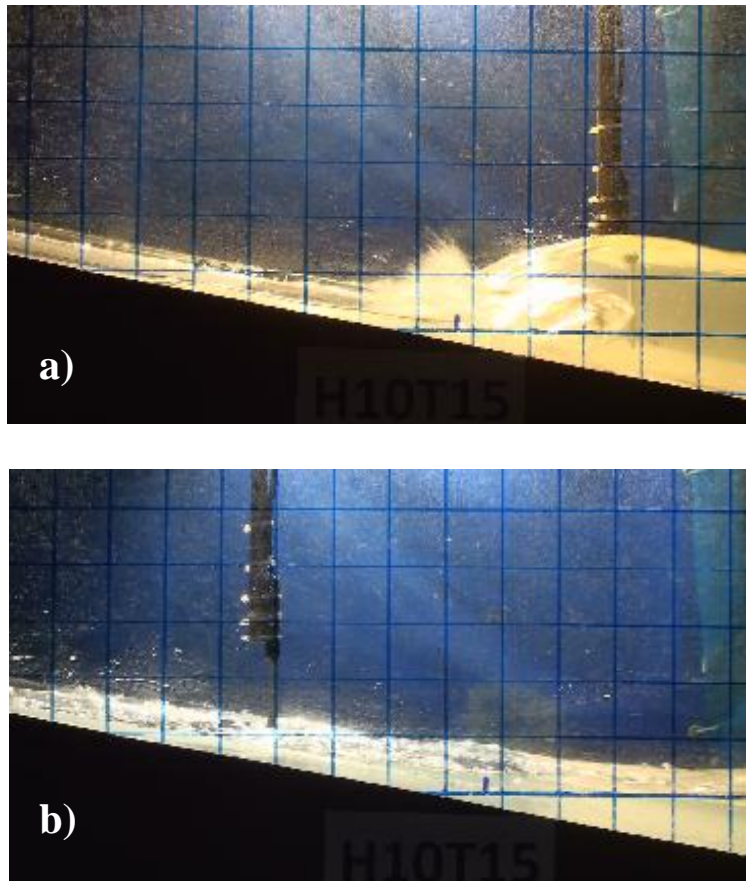
Con el propósito de verificar que las velocidades obtenidas por medio de la técnica BIV, representan el campo de velocidades “real” del fluido, se realizaron dos pruebas de validación pensadas para el fenómeno de rotura del oleaje en voluta que representa el caso de estudio del presente trabajo de investigación.

Cabe señalar que la aplicación de esta técnica para flujos que resultan de la rotura del oleaje sobre una rampa impermeable, no había sido reportada en la literatura. En consecuencia, el trabajo experimental que forma la base de esta tesis, representa un caso inédito. De hecho,

## Capítulo 4. Velocimetría por Trazado de Burbujas

estos resultados experimentales están reportados en los artículos de Pedrozo-Acuña *et al.* (2011) y Rivillas-Ospina *et al.* (2011).

Las dos pruebas utilizadas en el proceso de validación, fueron seleccionadas con base en el nivel de energía que contienen, así, se eligieron dos pruebas con el mismo periodo de ola  $T=1.5$  s y con diferente altura de ola  $H=0.10$  m y  $H=0.18$  m. La referencia a la realidad se estableció por medio de las mediciones obtenidas a través de un velocímetro acústico en dos posiciones a lo largo de la rampa, con regímenes hidrodinámicos completamente distintos, una correspondiente a la zona de rotura (justo detrás del jet) y otra en la zona de vaivén de las olas (Ver Figura 4.18).

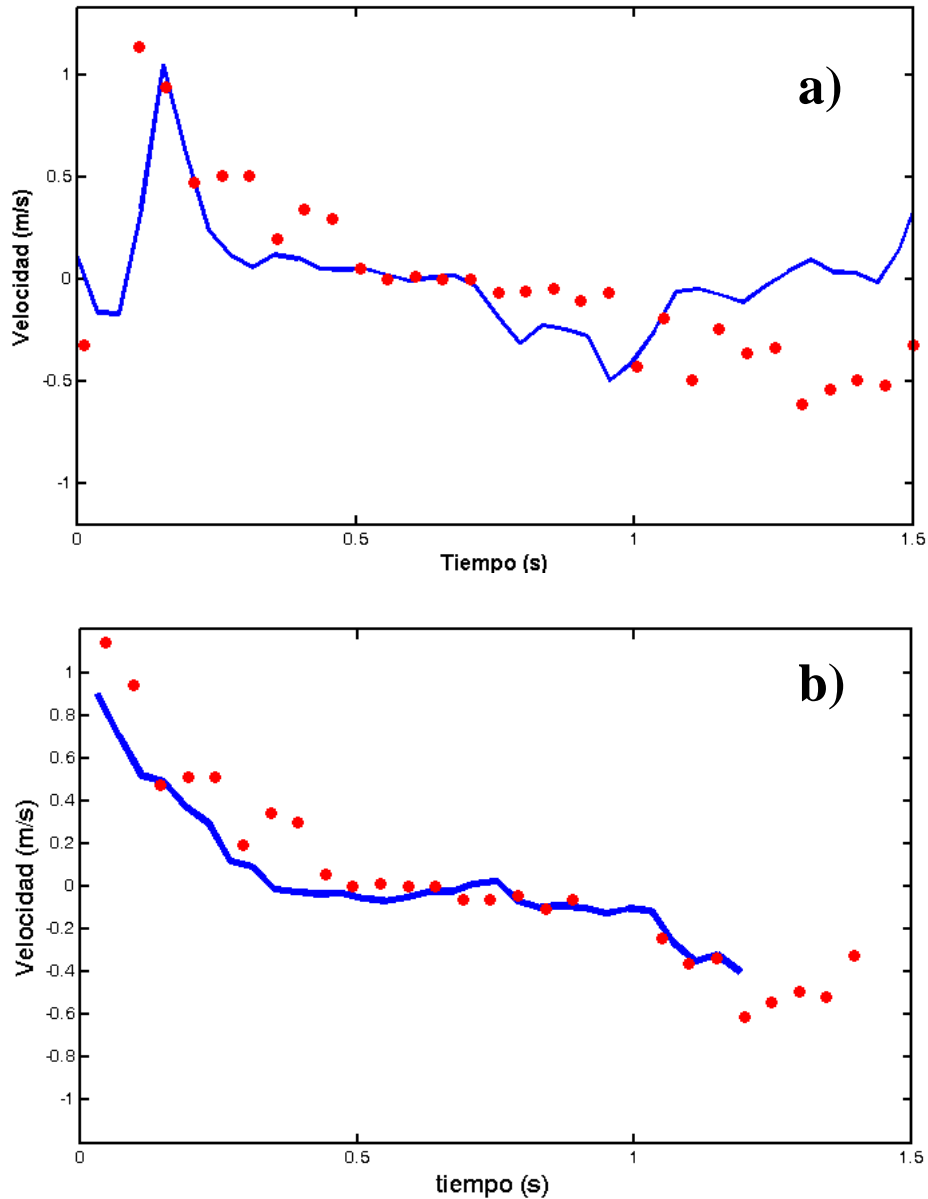


**Figura 4.18** Ubicación del velocímetro acústico sobre la rampa impermeable (a) zona de rotura; (b) zona de vaivén.

Los resultados obtenidos en ambas regiones para las condiciones de una ola definida por  $H=0.10$  m y  $T=1.5$  s, se muestran en la Figura 4.19, el panel (a) ilustra los resultados para la zona de rotura mientras que el panel (b) presenta los resultados para la zona de vaivén. En

## Capítulo 4. Velocimetría por Trazado de Burbujas

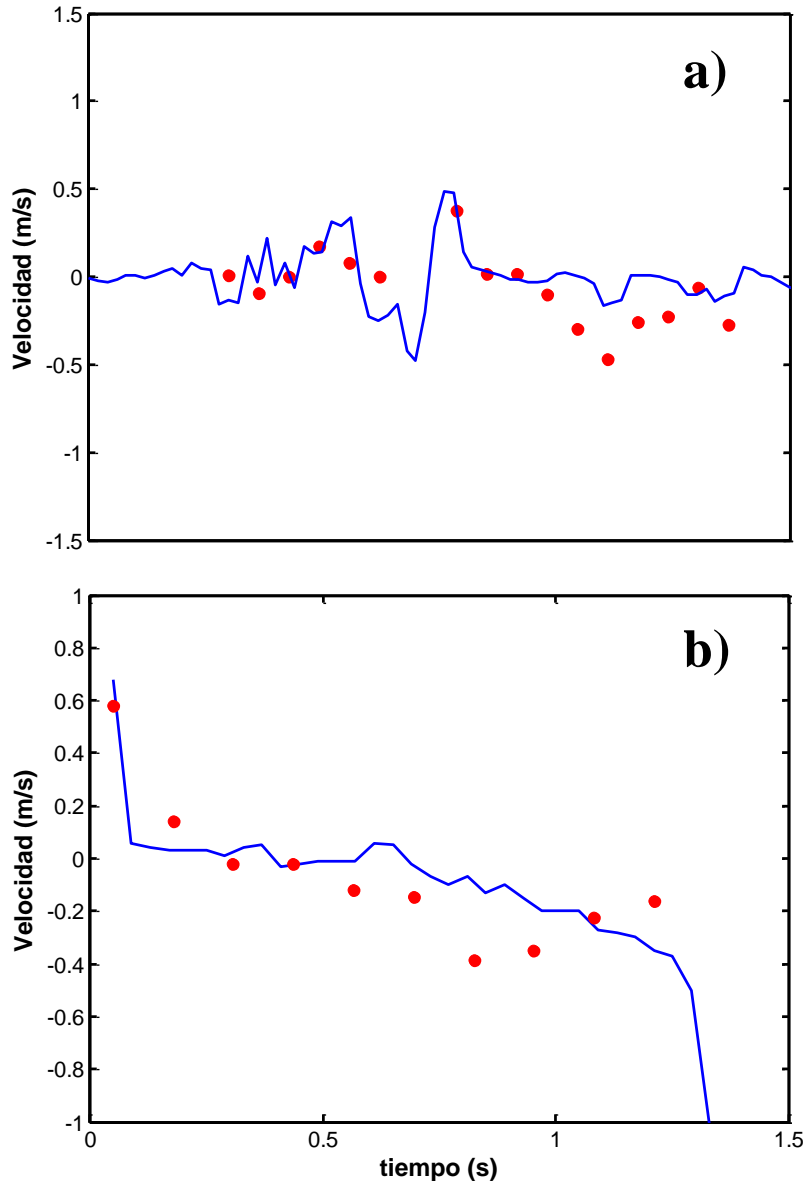
ambos paneles, la línea sólida representa la medición del ADV para un periodo de ola (ej. 1.5s), mientras que los puntos representan las velocidades horizontales obtenidas por medio de la aplicación BIV. En ambas regiones se observa una buena correspondencia entre los valores de velocidad obtenidos por ambas técnicas de medición.



**Figura 4.19** Comparación de velocidades horizontales en las zonas de rotura (a) y vaivén (b) para una ola de  $H=0.10$  m y  $T=1.5$  s; línea sólida – Mediciones ADV; puntos Mediciones BIV.

## Capítulo 4. Velocimetría por Trazado de Burbujas

Por otra parte, la Figura 4.20 presenta el mismo tipo de resultados para una ola más energética con altura de ola de  $H=0.18$  m y  $T=1.5$  s. Al igual que en el caso anterior se observa una buena correspondencia entre las velocidades obtenidas por medio de la técnica BIV con aquellas medidas por el ADV. Estos resultados revisten de confiabilidad a la implementación realizada de la técnica BIV para medir el campo de velocidades en la zona de rotura.



**Figura 4.20** Comparación de velocidades horizontales en las zonas de rotura (a) y vaivén (b) para una ola de  $H=0.18$  m y  $T=1.5$  s; línea sólida – Mediciones ADV; puntos Mediciones BIV.

**Capítulo 5**  
**RESULTADOS**

### 5. Análisis de Resultados

#### 5.1 Introducción

La comprensión de los flujos en la zona de cercanías de la costa, representa uno de los retos más complejos dentro del campo de la ingeniería costera (Govender *et al.*, 2002; Bathkyar *et al.* 2010). La predicción de la cinemática del oleaje en la costa es de suma importancia para determinar zonas vulnerables a erosión e inundación ante eventos extremos, así como la probabilidad de fallo de estructuras de protección costera (Pedrozo-Acuña y Torres-Freyermuth, 2011).

En dicha zona los procesos disipativos como la rotura y la fricción de fondo están presentes y controlan el límite de ascenso máximo de las olas (inundación) en el área de lavado (swash). De todos los procesos de transformación del oleaje, la rotura es, sin duda, el proceso más llamativo y al mismo tiempo, el menos entendido de todos. Esto se debe a que el oleaje en rotura es un flujo turbulento, lo que significa que es altamente aleatorio e inestable, y por lo tanto impredecible.

El trabajo experimental realizado en esta tesis contribuye al esclarecimiento de los procesos asociados a la rotura más intensa que se presenta en la naturaleza. Este capítulo presenta los resultados referentes al campo de velocidad determinado en la zona de cercanías de la costa, en condiciones de laboratorio sobre una playa idealizada construida en el canal de oleaje del Instituto de Ingeniería de la UNAM. En particular, se destaca del presente trabajo el análisis de incertidumbre realizado a las mediciones experimentales, el cual provee información valiosa sobre la aplicabilidad de las diversas técnicas de medición implementadas.

Se presentan, entonces, los resultados derivados de la técnica no intrusiva descrita en este trabajo (BIV) y se contrasta esta información con la obtenida por medio de técnicas de medición tradicionales como es el corrientímetro acústico por efecto Doppler. La comparación se realiza en dos zonas con condiciones hidrodinámicas distintas sobre la playa (rompientes y lavado), de tal suerte que los datos medidos ofrezcan información valiosa para experimentos futuros.

5.2 Selección de la información

Dada la magnitud del esfuerzo experimental realizado en este proyecto de investigación, se seleccionaron sólo una parte de los resultados experimentales, por lo que las demás pruebas realizadas en laboratorio se podrán consultar en un anexo de este trabajo. A fin de ilustrar el análisis de resultados y la calidad de la información disponible con dos condiciones de oleaje. Estas corresponden a las pruebas caracterizadas por  $H=10$  cm;  $T=1.5$  s (energía moderada) y  $H=18$  cm;  $T=1.5$  s (energía intensa). En ambas pruebas se realizaron mediciones con la técnica de trazado de burbujas y se utilizó el corrientímetro acústico (ADV) a fin de tener mediciones puntuales de la velocidad en diferentes posiciones sobre la rampa impermeable. La Figura 5.1 presenta una vista general de la disposición de los instrumentos de medición en el canal de oleaje del Instituto de Ingeniería. Los recuadros inferiores (a y b) de la misma Figura detallan la ubicación seleccionada para las mediciones puntuales realizadas con el corrientímetro acústico para ambas pruebas  $H=18$  cm;  $T=1.5$  s (b) y  $H=10$  cm;  $T=1.5$  s (c).

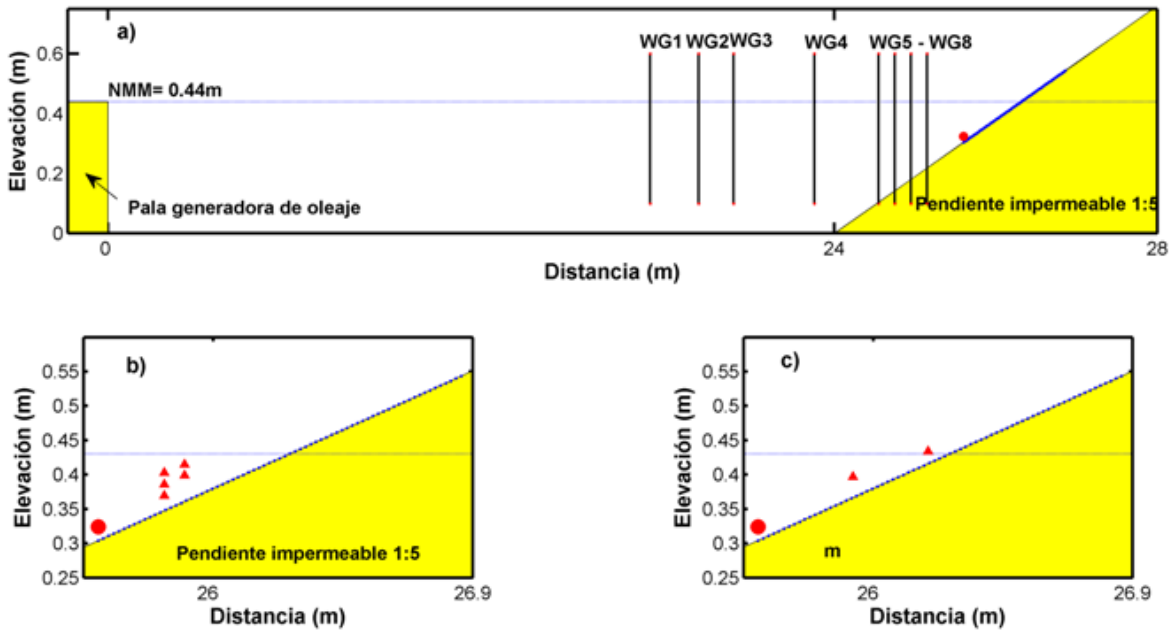


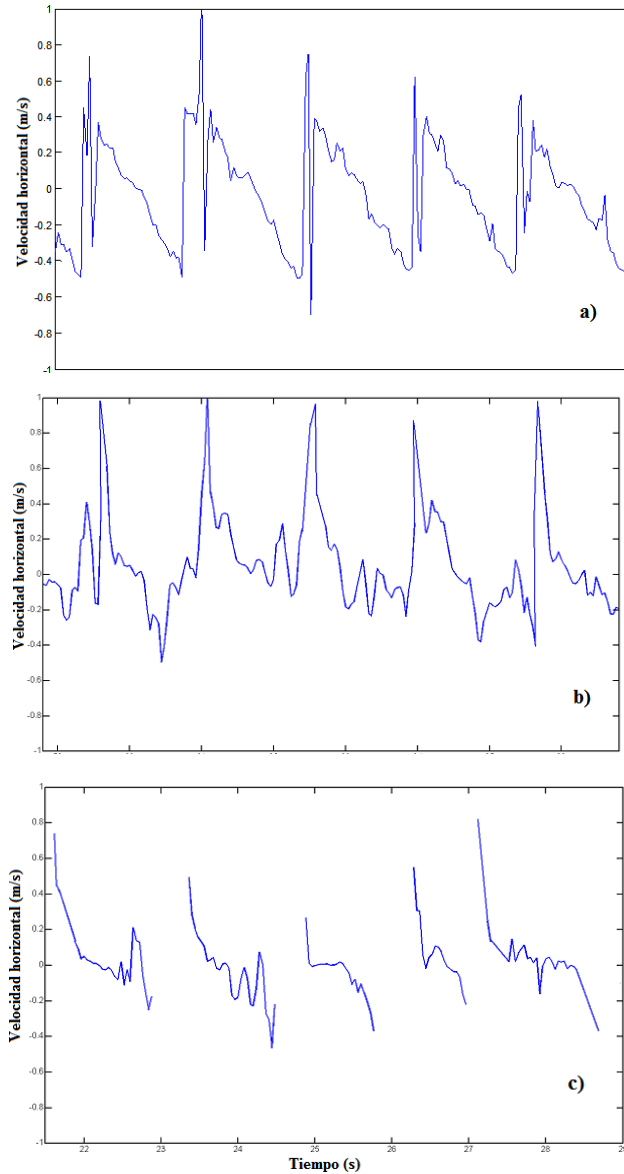
Figura 5.1 a) Instalación experimental en laboratorio; b) Mediciones detalladas con ADV para  $H=18$ cm,  $T=1.5$ s y c)  $H=10$ cm,  $T=1.5$ s.  $\Delta$  Ubicación de ADV;  $\bullet$  inicio del proceso de rotura.



### 5.3 Análisis de incertidumbre en series temporales acústicas

El análisis de incertidumbre comprende una evaluación del nivel de confiabilidad que se tiene en un registro medido. De esta forma, el primer paso consistió en la revisión individual de las series obtenidas con el corrientímetro acústico. A manera de ejemplo, la Figura 5.2 presenta las velocidades registradas con este instrumento, para la prueba de  $H=10$  cm  $T=1.5$  s, en un punto ubicado en la vertical a  $h=1.8$  cm sobre la pendiente impermeable. El recuadro a) muestra un ejemplo de mediciones de componente horizontal de la velocidad para un punto localizado antes de la zona de rotura del oleaje. En esta serie temporal es posible identificar la típica forma de diente de sierra, que resulta del proceso de someramiento que sufre el oleaje conforme se aproxima a las costas. En el recuadro b) se observa la serie temporal de la misma componente pero en un punto localizado en la vecindad del punto de impacto de las olas sobre la rampa impermeable, el cual para efectos prácticos será denominado punto de rotura. Finalmente, en el recuadro inferior c) se ilustra la serie temporal medida dentro de la zona de lavado de las olas. En este punto, es evidente la gran asimetría que presenta el flujo, observándose un predominio del mismo con dirección hacia el mar. Este tipo de registro muestra un comportamiento muy parecido con registros realizados en playas naturales en campo por diversos investigadores (Masselink y Russell, 2006).

Dado que las condiciones hidrodinámicas en la rotura varían de ola a ola, el análisis de incertidumbre para las mediciones obtenidas con el corrientímetro acústico involucró el cálculo de una velocidad media para una serie de eventos, es decir olas. Para ello se seleccionaron 20 olas de cada serie temporal medida, de tal suerte que se pudiera realizar un promedio de fase de estos eventos y con ello determinar la velocidad media. Adicionalmente, en cada punto de análisis se calculó la desviación estándar de los datos experimentales respecto a esta media, de tal suerte que se pudiera estimar la confiabilidad de las mediciones realizadas.



**Figura 5.2** Muestra de mediciones con ADV ( $H=10$  cm;  $T=1.5$  s) –a) Para un punto localizado antes de la zona de rotura; b) Punto localizado cerca del impacto del oleaje en voluta; c) Punto localizado en la zona de lavado.

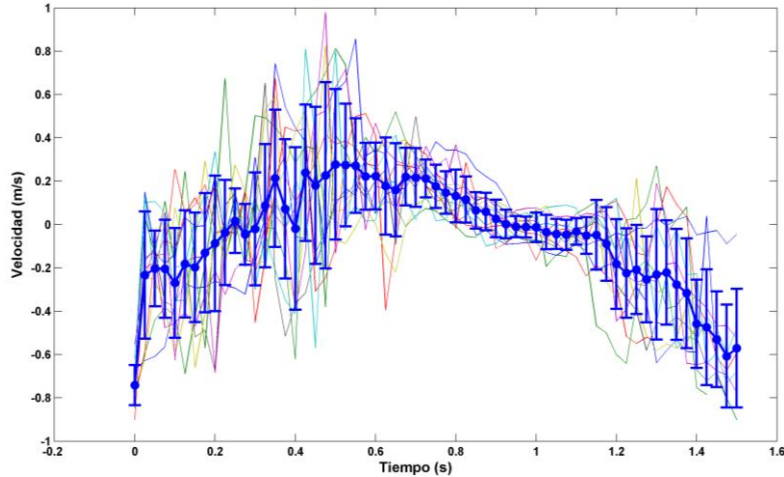
#### 5.4 Resultados prueba $H=18$ cm, $T=1.5$ s

La Figura 5.2 muestra las mediciones de la componente horizontal de la velocidad obtenidas para los eventos de ola a ola seleccionados de la prueba  $H=18$  cm,  $T=1.5$  s. Estas series temporales corresponden a un punto ubicado antes de la zona de rotura, a una distancia  $x=1.83$  m con respecto al pie de la rampa y una distancia vertical de  $z=2.2$  cm

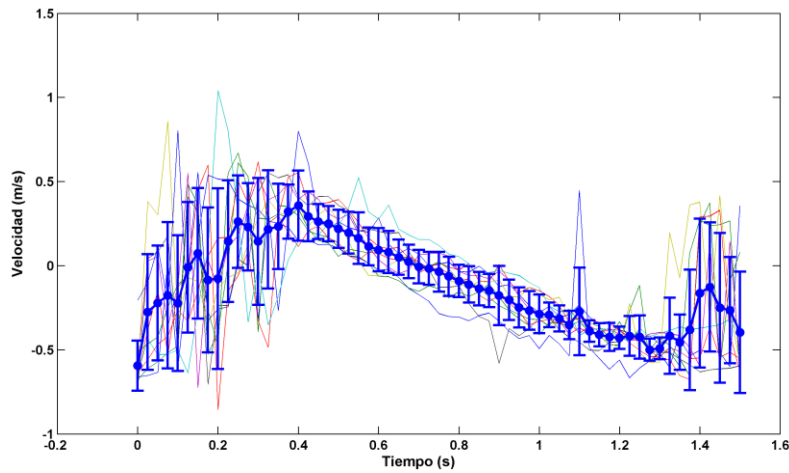
respecto del fondo (ver Figura 5.1a). Adicionalmente, y con el propósito de observar la variación vertical del campo de velocidades medido con este instrumento, se presentan las series temporales en la misma posición horizontal (a 1.83 m del pie de la rampa impermeable) y a 5.5 cm del fondo. Estas mediciones están ilustradas en la Figura 5.3. En ambas figuras se ilustra, por medio de una línea gruesa, la velocidad media calculada de los eventos individuales en ambos puntos. Mientras que las variaciones correspondientes a  $\pm\sigma$  (desviación estándar) respecto a la media, se indican con las barras verticales.

El comportamiento medio del paso de la ola que se registró en la serie temporal más cercana al fondo (Figura 5.3), señala una mayor incertidumbre al inicio del evento (primeros 0.5 s). Adicionalmente, en un tiempo posterior, al inicio del flujo de retorno ( $t=0.65$  s), el error estimado para esta técnica de medición se reduce considerablemente, lo que indica que el nivel de precisión del corrientímetro acústico es mucho mayor durante la ausencia de burbujas de aire.

Respecto a los resultados más cercanos a la superficie libre del agua, a una altura de 5.5 cm del fondo, la Figura 5.4 indica que la confiabilidad de la medición con el corrientímetro acústico es mucho mayor. Sin embargo, se reporta un incremento en la incertidumbre registrada al inicio y final del paso de la ola sobre el sensor, esto se debe a la dinámica inducida por el proceso de rotura en voluta, el cual incorpora una considerable cantidad de aire y turbulencia que producen una desviación de la magnitud de la velocidad respecto a su valor medio.

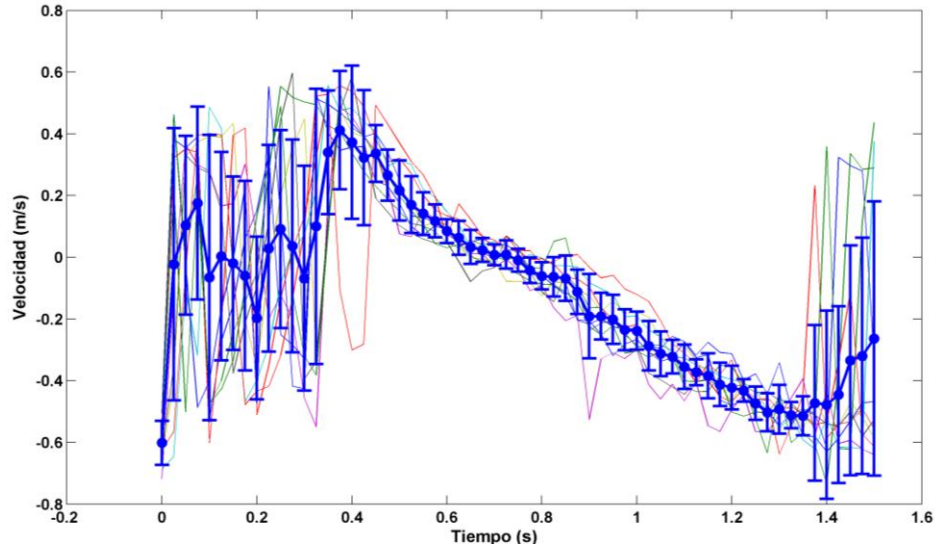


**Figura 5.3** Velocidad media horizontal (●) e incertidumbre (\_\_\_) para  $x=1.83$  m,  $z=2.2$  cm y condición de oleaje  $H=18$  cm y  $T=1.5$  s.



**Figura 5.4** Velocidad media horizontal (●) e incertidumbre (\_\_\_) para  $x=1.83$  m,  $z=5.5$  cm y condición de oleaje  $H=18$  cm y  $T=1.5$  s.

Este análisis también se realizó en un punto localizado en el punto de rotura, cerca de la zona de impacto de las olas al romper sobre la rampa impermeable. La Figura 5.5 resume las mediciones obtenidas para la componente horizontal de la velocidad en un punto ubicado a 1.83 m del pie de la rampa impermeable y a 3.8 cm del fondo. En esta Figura es todavía más evidente el incremento en la incertidumbre al inicio del paso de la ola, que es resultado de la presencia de grandes cantidades de turbulencia por la rotura de la ola. De hecho es posible observar que conforme evoluciona el evento en el tiempo, la turbulencia es arrastrada por el flujo dado que al paso del frente de la ola la incertidumbre en las mediciones es considerablemente reducida.



**Figura 5.5** Velocidad media horizontal (●) e incertidumbre (—) para  $x=1.83$  m,  $z=3.8$  cm y condición de oleaje  $H=18$  cm y  $T=1.5$  s.

Por último, las Figuras 5.6 y 5.7 presentan las mediciones obtenidas en un punto ubicado en la zona de lavado sobre la pendiente impermeable. Con el propósito de observar la variación vertical de las mediciones y su incertidumbre en esta región hidrodinámica, la Figura 5.6 ilustra los resultados obtenidos a 3.8 cm del fondo, mientras que la Figura 5.7 muestra los resultados asociados a un punto ubicado a 5.4 cm del fondo, es decir, más cercano a la superficie libre del agua.

De la comparación de ambas figuras, es posible determinar que el comportamiento de la incertidumbre en los datos obtenidos por medio del velocímetro acústico, es muy similar en ambos puntos. Esto indica una estructura vertical del flujo uniforme en esta zona, lo anterior está en concordancia con las hipótesis hidrodinámicas básicas que se utilizan en el modelado matemático del oleaje en aguas someras, donde se asumen velocidades idénticas en la vertical. En este caso, la incertidumbre registrada en ambas series temporales, tiene la misma magnitud y no varía en función de la evolución temporal del evento.

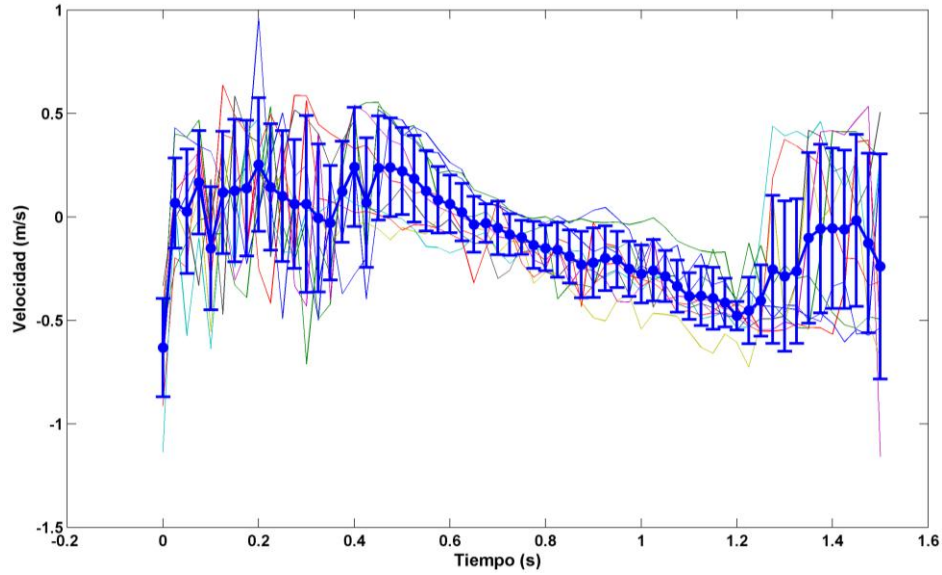


Figura 5.6 Velocidad media horizontal (●) e incertidumbre (\_\_\_) para  $x=1.91$  m,  $z=3.8$  cm y condición de oleaje  $H=18$  cm y  $T=1.5$  s.

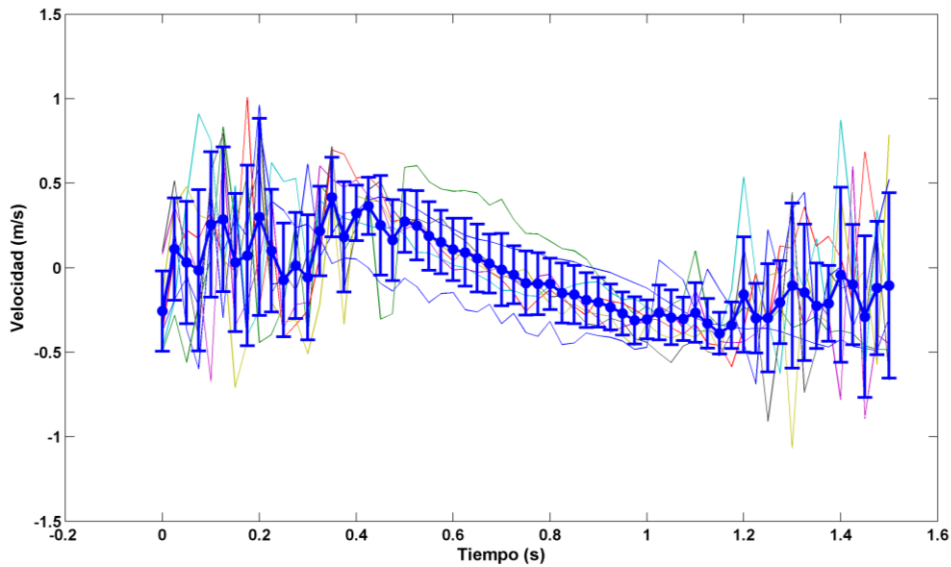


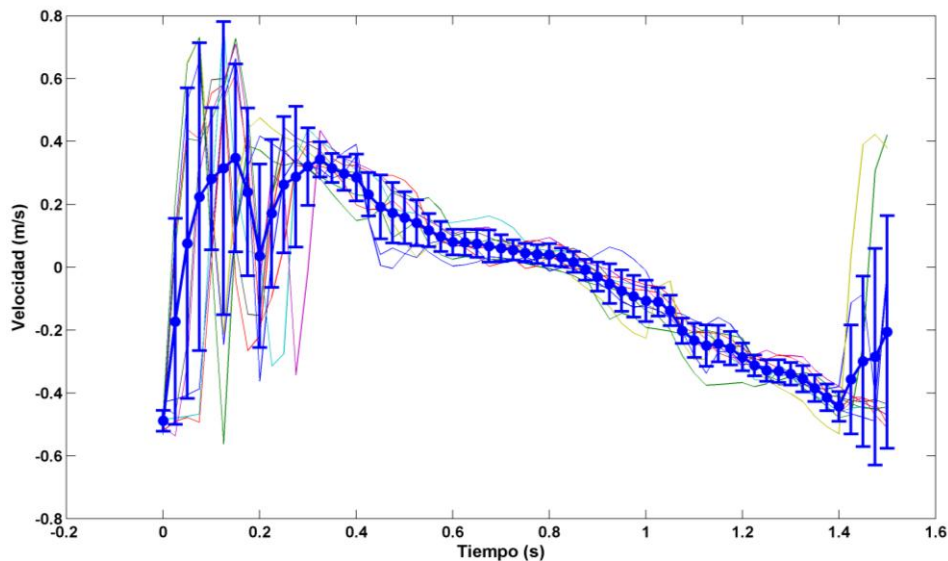
Figura 5.7 Velocidad media horizontal (●) e incertidumbre (\_\_\_) para  $x=1.91$  m,  $z=5.4$  cm y condición de oleaje  $H=18$  cm y  $T=1.5$  s.

### 5.5 Resultados prueba $H=10$ cm; $T=1.5$ s

Con el propósito de estudiar la variación de la incertidumbre de las mediciones del velocímetro acústico en condiciones de rotura en voluta, se determinó el análisis de una

condición de oleaje con menor contenido de energía es decir, con una altura de ola más pequeña definida por  $H=10$  cm y  $T=1.5$  s.

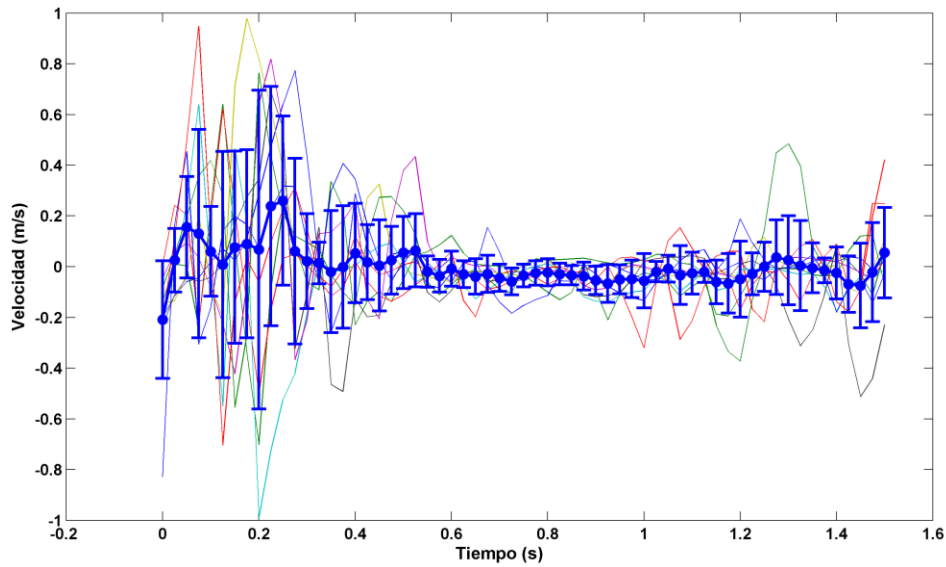
La Figura 5.8 presenta los resultados obtenidos en el punto de rotura de las olas a una distancia horizontal  $x=1.93$  m con respecto al pie de la rampa, a una elevación de 3.2 cm sobre el fondo impermeable. (Ver figura 5.1b). De manera similar a lo reportado en el caso anterior, la Figura 5.8 indica un aumento considerable en la incertidumbre de los datos al inicio del paso de la ola por el sensor. Esta se debe, a la incorporación de aire y la producción de turbulencia que se genera como resultado de la rotura de la ola. Adicionalmente, la incertidumbre se ve reducida conforme evoluciona temporalmente el evento, lo que indica la advección de la turbulencia junto con el frente de la ola en ascenso sobre la pendiente. Para el régimen hidrodinámico dado por esta condición de oleaje no se consideraron mediciones a lo largo de la columna de agua dado que la cantidad de agua que asciende y desciende sobre la rampa impermeable se ve considerablemente reducida.



**Figura 5.8** Velocidad media horizontal (●) e incertidumbre (\_\_\_) para  $x=1.93$  m,  $z=3.2$  cm y condición de oleaje  $H=18$  cm y  $T=1.5$  s.

Por otra parte, los resultados correspondientes a la zona de lavado bajo esta condición de oleaje se reportan en la Figura 5.9, en la que se ilustran las velocidades horizontales obtenidas con el velocímetro acústico en un punto ubicado a una distancia de 2.24 m respecto al pie de la rampa y a una distancia vertical de 1.8 cm sobre el fondo definido por la rampa impermeable (Ver figura 5.1a). En estos resultados, es posible notar el crecimiento

de la incertidumbre al inicio del evento, es decir, cuando el remanso turbulento pasa por el instrumento de medición. Conforme el evento avanza, la incertidumbre se ve notablemente reducida, junto con la magnitud de la velocidad registrada la cual es negativa pero con una magnitud muy pequeña. Esto es resultado de la menor cantidad de energía involucrada en la generación de la dinámica de fluidos en este punto.



**Figura 5.9** Velocidad media horizontal (●) e incertidumbre (—) para  $x=2.24$  m,  $z=1.8$  cm y condición de oleaje  $H=18$  cm y  $T=1.5$  s.

### 5.6 Análisis de incertidumbre en datos de velocidad del BIV

Al igual que con el corrientímetro acústico, el trabajo desarrollado en esta tesis contempla el análisis de incertidumbre de las mediciones obtenidas a partir de la técnica de trazado de burbujas (BIV). Para ello, se seleccionaron dos puntos de análisis sobre la pendiente impermeable ubicados en la zona de rotura y en la zona de lavado.

Para este propósito, se requirió de 20 repeticiones del experimento en laboratorio, de tal suerte que se pudiera contar con eventos individuales e independientes del mismo fenómeno (ola en voluta). Esto permitió la cuantificación de la velocidad media de fase y la desviación estándar asociada a este valor durante la acción de una ola completa. El promedio de fase se determina entonces con la siguiente ecuación:



$$\langle u_k \rangle = \frac{1}{N} \sum_{l=1}^N u_k^{(l)} = U_k \quad (\text{ec. 5.1})$$

Donde el símbolo  $\langle \rangle$  representa el promedio de fase,  $k$  es la componente de velocidad obtenida de los instantes de las mediciones de velocidad  $l^{\text{th}}$ ,  $N$  es el número total de velocidades instantáneas en esa fase y  $u_k^{(l)}$  es el valor instantáneo de velocidad obtenida por cada evento. Así entonces, el campo de velocidad media resulta del promedio del conjunto de 20 mediciones de velocidades instantáneas repetidas ( $N=20$  eventos).

La Figura 5.10 resume los resultados obtenidos para una ola con  $H=10$  cm y  $T=1.5$  s respecto al valor medio de la componente horizontal de la velocidad estimada en la zona de rotura, junto con su incertidumbre asociada definida esta por  $\pm\sigma$ . En esta Figura se observa un incremento en la incertidumbre registrada al inicio del evento, es decir, asociada al fenómeno de rotura en voluta. Sin embargo, posterior al tiempo definido por  $t=1$  s, se aprecia una considerable reducción de la incertidumbre lo que indica la correcta aplicación y confiabilidad de esta técnica en esta región.

Por otra parte, la Figura 5.11 ilustra los resultados obtenidos en la zona de lavado con la misma técnica. En este caso, se observa una considerable reducción en la incertidumbre registrada a lo largo del evento. Lo que a su vez indica la gran confiabilidad de esta técnica en esta región hidrodinámica. Una posible explicación de la confiabilidad registrada en esta técnica para esta zona, consiste en el alto contenido de burbujas que hay presentes en el flujo. Esto indica la pertinencia del empleo de esta técnica de medición no intrusiva en la zona de lavado.

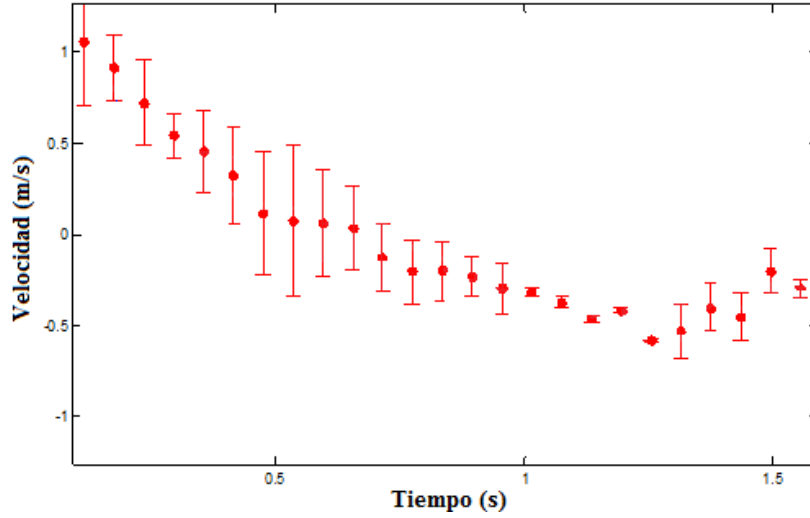


Figura 5.10 (●) Velocidades medias calculadas e (—) incertidumbre en las mediciones obtenidas por el BIV. Zona de rompientes (H=10 cm; T=1.5 s)

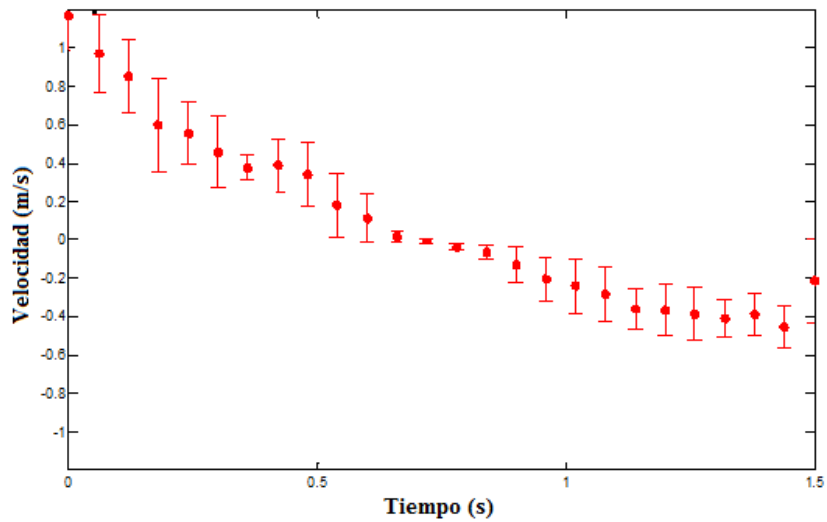


Figura 5.11 (●) Velocidades medias calculadas e (—) incertidumbre en las mediciones obtenidas por el BIV. Zona de lavado (H=10 cm; T=1.5 s)

### 5.6.1 Incertidumbre asociada a la distancia focal

Además de la incertidumbre asociada a la repetitividad del experimento y la turbulencia generada en las mediciones de oleaje en rotura, cuando se utiliza una técnica óptica como BIV, es necesario evaluar los valores de velocidad obtenidos en función de un parámetro

fotográfico conocido como distancia focal. Esta distancia representa la distancia a la que se colocó la cámara de alta velocidad respecto al objeto de estudio.

Para ello, se realizaron un conjunto de mediciones con tres diferentes distancias focales definidas a través de los parámetros fotográficos que se presentan en la Tabla 5.1. Así las distancias focales estudiadas en este trabajo de investigación están dadas por  $L_1=1.13\text{m}$ ;  $L_2=1.23$  y  $L_3=1.33\text{m}$ .

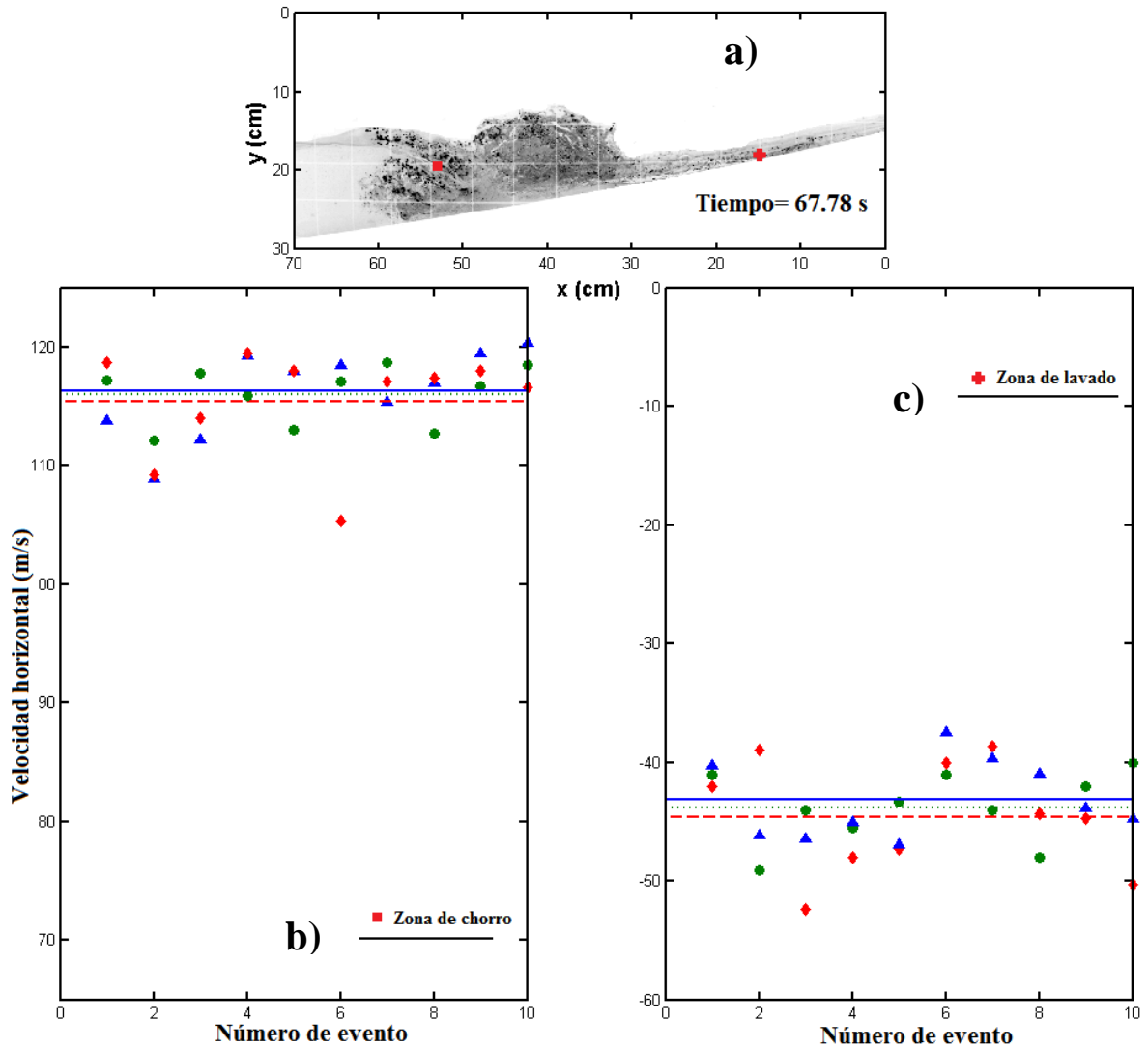
**Tabla 5.1** Parámetros fotográficos seleccionados para las tres distancias focales (L) estudiadas

	<b>L1</b>	<b>L2</b>	<b>L3</b>
<b>f-stop</b>	f/8.0	f/5.6	f/5.6
<b>Diámetro de pupila (mm)</b>	3.125	4.464	4.464
<b>Distancia focal del lente (mm)</b>	25	25	25
<b>L (m)</b>	1.13	1.23	1.33
<b>Profundidad de campo (m)</b>	0.21	0.22	0.18

La Figura 5.12 presenta el análisis de la variación en las velocidades instantáneas registradas con las tres distancias focales elegidas. El recuadro a) indica los puntos de análisis seleccionados dentro de las fotografías, donde se aprecia un punto correspondiente al chorro generado por el colapso de la ola en voluta y otro a la zona de lavado. Adicionalmente, en los recuadros a) y b) se presentan las velocidades medias obtenidas para la componente horizontal del flujo asociada a cada distancia focal, junto con los valores instantáneos de velocidad estimados para cada evento. Para todos los experimentos realizados, se utiliza el mismo algoritmo de correlación (por mínimos cuadrados) y el mismo tamaño de ventana de interrogación en la imagen definida por 32 x 32 píxeles.

De acuerdo con los resultados que se ilustran en esta figura, es posible determinar que un cambio en la distancia focal de la cámara no incide de manera significativa sobre el valor medio estimado para la componente horizontal de la velocidad del flujo. Las tres líneas

horizontales aparecen muy cerca una de otra, lo que indica la robustez de la técnica de medición.



**Figura 5.12** (a) Localización de los puntos seleccionados; Velocidades horizontales instantáneas derivadas del BIV, estimadas con diferentes distancias focales ( $H=10$  cm;  $T=1.5$  s). Panel (b) zona de chorro y panel (c) zona de lavado.  $\blacktriangle$  –  $L=0.9$  m;  $\bullet$  –  $L=1.1$  m;  $\blacklozenge$  –  $L=1.0$  m. Línea de velocidades medias estimadas  $L=0.9$  m; - - -  $L=1.1$  m; . . . ,  $L=1.0$  cm.

Con el objeto de cuantificar numéricamente las desviaciones que se encontraron en función de la distancia focal empleada en la técnica de medición, la tabla 5.2 presenta un resumen con la velocidad media y su desviación estándar asociada estimadas para las tres distancias focales utilizadas. En esta tabla se reportan las similitudes de los valores promedio estimados y la pequeña desviación estándar encontrada para los tres casos. Estos resultados dan confianza en los valores reportados por esta técnica de medición no intrusiva.

**Tabla 5.2** Velocidades medias y desviación estándar de velocidad horizontal estimada con la técnica BIV en tres diferentes distancias focales.

$(cm/s)$	L1	L2	L3
$\langle U_{swash} \rangle$	-43.14	-43.81	-44.67
$\langle U_{jet} \rangle$	116.29	115.37	115.95
$Sd_{\langle U_{swash} \rangle}$	3.29	3.02	4.80
$Sd_{\langle U_{jet} \rangle}$	3.67	4.60	2.45

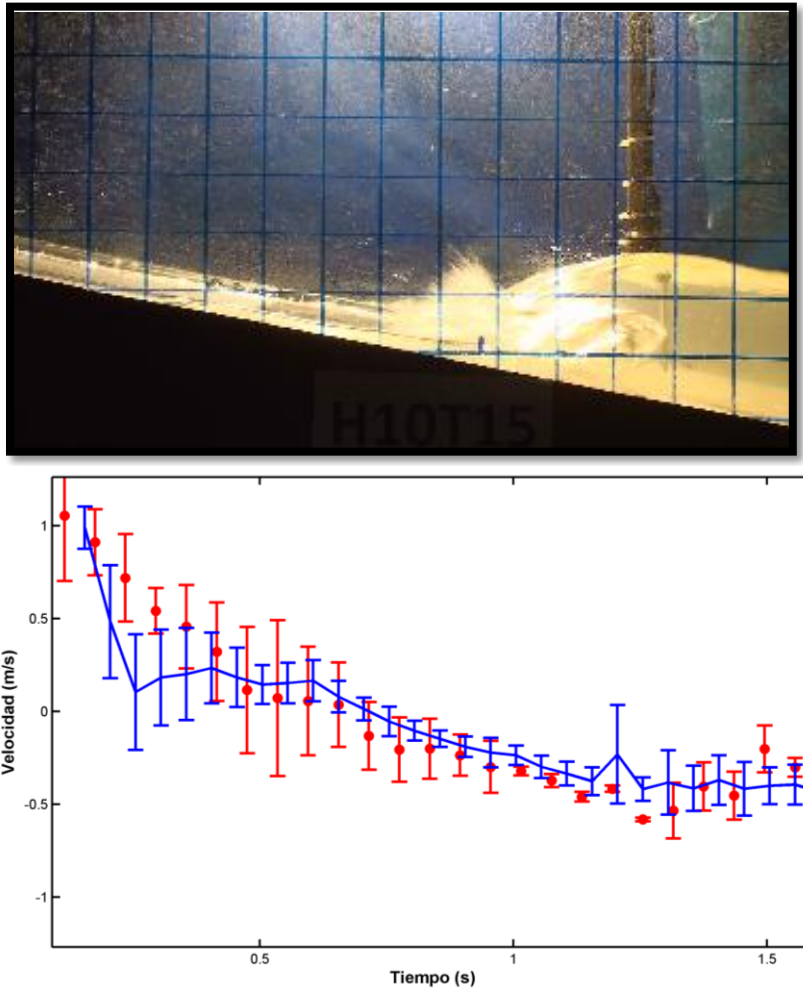
### 5.7 Comparación y validación de series temporales en la zona de rotura (BIV/ADV)

Una parte importante de la investigación realizada consistió en la comparación y validación de ambas técnicas de medición utilizadas. Por una parte el velocímetro acústico y por otra la técnica no intrusiva conocida como BIV, esta comparación se llevó a cabo en dos puntos seleccionados sobre la pendiente impermeable ubicados en la zona de rompientes (Surf) y la zona de lavado (swash).

La Figura 5.13 presenta la comparación del valor medio estimado para la componente horizontal de la velocidad de flujo en la zona de rompientes. La línea continua corresponde al valor medio estimado con el velocímetro acústico, mientras que los puntos rojos corresponden al valor medio calculado por la técnica de trazado de burbujas. En ambos casos, las barras asociadas representan la desviación estándar con respecto a la media de cada medición.

De acuerdo a los resultados obtenidos, las mediciones registradas con el velocímetro acústico tienen asociadas una mayor incertidumbre en comparación con los mismos valores ilustrados para la técnica del BIV. Sin embargo, cabe resaltar que la confiabilidad obtenida por ambas técnicas de medición en este punto es aceptable, por lo que su uso puede ser

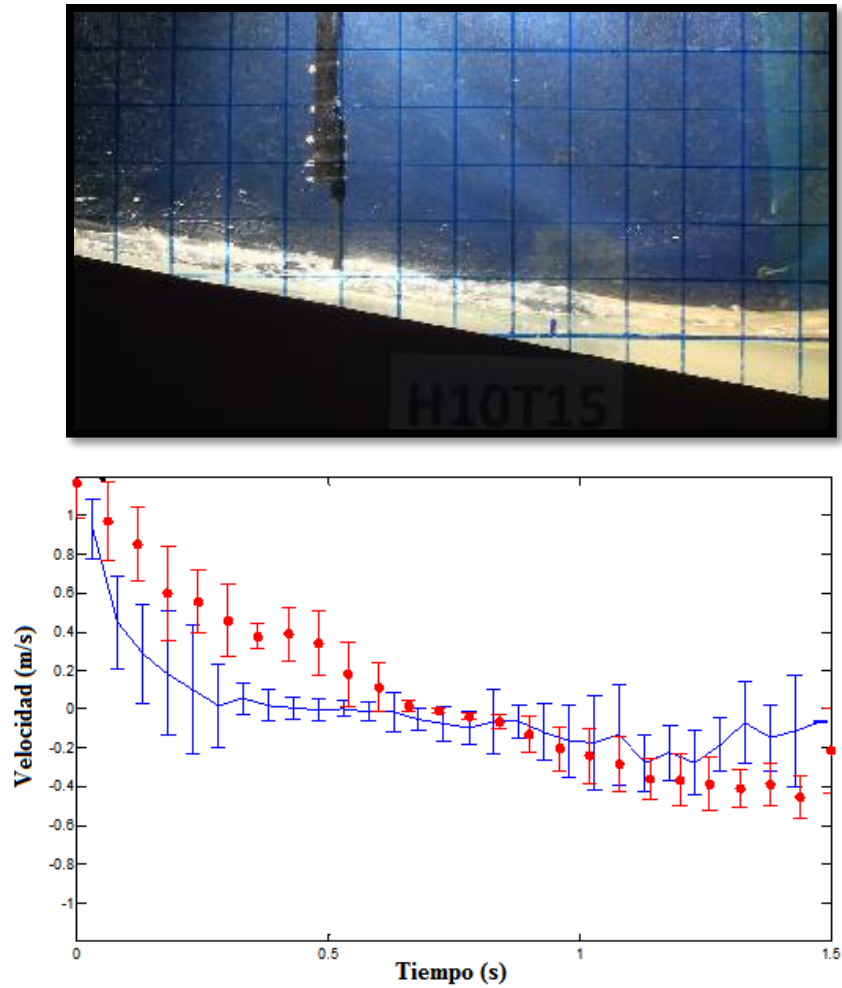
considerado apropiado.



**Figura 5.13** Comparación de velocidades horizontales en las zona de rompientes, (—) línea continua representa mediciones obtenidas con el ADV); (●) representa mediciones obtenidas con BIV).

Por otro lado, los resultados asociados a la zona de lavado se presentan en la Figura 5.14. En donde se aprecia que las velocidades medias obtenidas con el velocímetro acústico tienen una mayor cantidad de incertidumbre en comparación con la desviación reportada por la técnica del BIV. Esto se debe a la gran cantidad de burbujas que están incorporadas en el flujo dentro de esta región, lo que se traduce en mucha turbulencia registrada por el velocímetro acústico. En contraste, las barras de incertidumbre asociadas a la técnica no intrusiva, indican su pertinencia en flujos aireados y turbulentos como es el caso. Por

consiguiente el desempeño de la técnica BIV en la zona de lavado, es superior al de un velocímetro acústico el cual queda expuesto al ruido que se genera por la presencia del flujo turbulento.



**Figura 5.14** Comparación de velocidades horizontales en las zona de rompientes, (—) línea continua representa mediciones obtenidas con el ADV; (●) representa mediciones obtenidas con BIV.

### 5.8 Evolución espacio-temporal del campo de velocidades

Una vez validada la técnica de velocimetría por trazado de burbujas, es posible construir mapas espacio-temporales de la evolución del campo de velocidades durante la rotura del oleaje. Estos mapas proveen la posibilidad de determinar la magnitud de la velocidad en cualquier punto de la fotografía, lo cual representa otra de las ventajas de esta técnica no intrusiva en comparación con técnicas de medición puntual. Así, es posible dar seguimiento a la evolución de la dinámica de fluidos asociada al fenómeno de rotura del oleaje. En esta sección se presentan los mapas espacio-temporales del campo de velocidades, estimados para los dos casos de estudio seleccionados  $H=10$  cm  $T=1.5$  s y  $H=18$  cm  $T=1.5$  s.

Los resultados del campo de velocidades determinado para una ola en rotura definida por  $H=10$  cm y  $T=1.5$  s se presentan en la Figura 5.15, donde los recuadros superiores presentan la fase inicial del evento de rotura del oleaje cuando la ola peraltada arriba a la zona de rotura y colapsa sobre la pendiente impermeable. Los recuadros centrales ilustran la evolución del impacto de la ola sobre la pendiente, de tal suerte que las velocidades máximas son claramente asociadas al chorro de agua que impacta sobre la pendiente. En estos recuadros se revela con lujo de detalle la complejidad del flujo durante el impacto de las olas sobre la pendiente impermeable. Por último, los recuadros inferiores presentan la naturaleza del campo de velocidades rumbo al final del evento, en la que es evidente la reducción en la magnitud de las velocidades registradas, como resultado de la pérdida de energía por el ascenso del oleaje sobre la pendiente.

Con el propósito de desglosar la naturaleza del campo de velocidades en función de las componentes horizontal y vertical del flujo, la Figura 5.16 presenta los mapas espacio temporales para los mismos instantes que la Figura 5.15 pero solo se representa a la componente horizontal del flujo. Estos mapas revelan la interacción que se da en la rotura, entre los flujos hacia la costa (positivos) y en dirección hacia el mar (negativos). Cabe señalar que el balance entre estos dos forzamientos es lo que determina la erosión o acumulación de material en una playa natural. Los recuadros superiores, indican de forma muy clara la interacción entre el flujo de retorno y la ola en ascenso a punto de romper



sobre la pendiente. Además, es evidente que la velocidad horizontal máxima registrada está íntimamente asociada al frente de la ola por colapsar (c).

Mientras que los recuadros (a) y (b), indican que al inicio del evento, las velocidades horizontales máximas se deben al flujo de retorno con dirección hacia el mar. Por otra parte, los recuadros intermedios registran el incremento en las velocidades horizontales hacia la costa que resultan del impacto de la ola sobre la pendiente (ver Figura 16d-f). Mientras que los paneles inferiores reportan una clara la disminución de la velocidad horizontal resultado de la terminación del evento de rotura asociado a esta ola.

De forma complementaria, la Figura 5.17 presenta los mapas espacio-temporales de la componente vertical de la velocidad de flujo. En los paneles (a) y (b) se registran pequeñas velocidades verticales asociadas al inicio de fase de rotura, lo que indica un predominio de la componente horizontal en el flujo, hasta el recuadro (c) en donde se muestra un claro incremento en las velocidades verticales con dirección hacia abajo, las cuales están naturalmente asociadas al proceso de impacto de la ola sobre la pendiente. Conforme avanza el evento, se observa una clara reducción en la magnitud de las velocidades verticales que se aprecia en los recuadros (d-f). Donde se aprecia que las máximas velocidades verticales registradas en estos instantes son resultado del impacto de la ola sobre la pendiente impermeable. Por último, en los recuadros inferiores (d-i) se reporta una considerable disminución en la magnitud de la componente vertical de la velocidad, lo que a su vez señala el final del ascenso de la ola.

Cabe señalar, que a través de los resultados mostrados en las Figuras 5.16 y 5.17 es posible identificar una de las limitaciones de la técnica desarrollada en esta tesis. Esto es, existen algunas zonas dentro del flujo en rotura que aparecen en blanco, lo que indicaría un valor nulo de la velocidad registrada en ese punto, esto se debe a que en algunas partes del campo de visión de la cámara no había presencia de burbujas, por lo que al no contar con ningun trazador en la imagen el algoritmo de correlación no determina ninguna velocidad asociada.

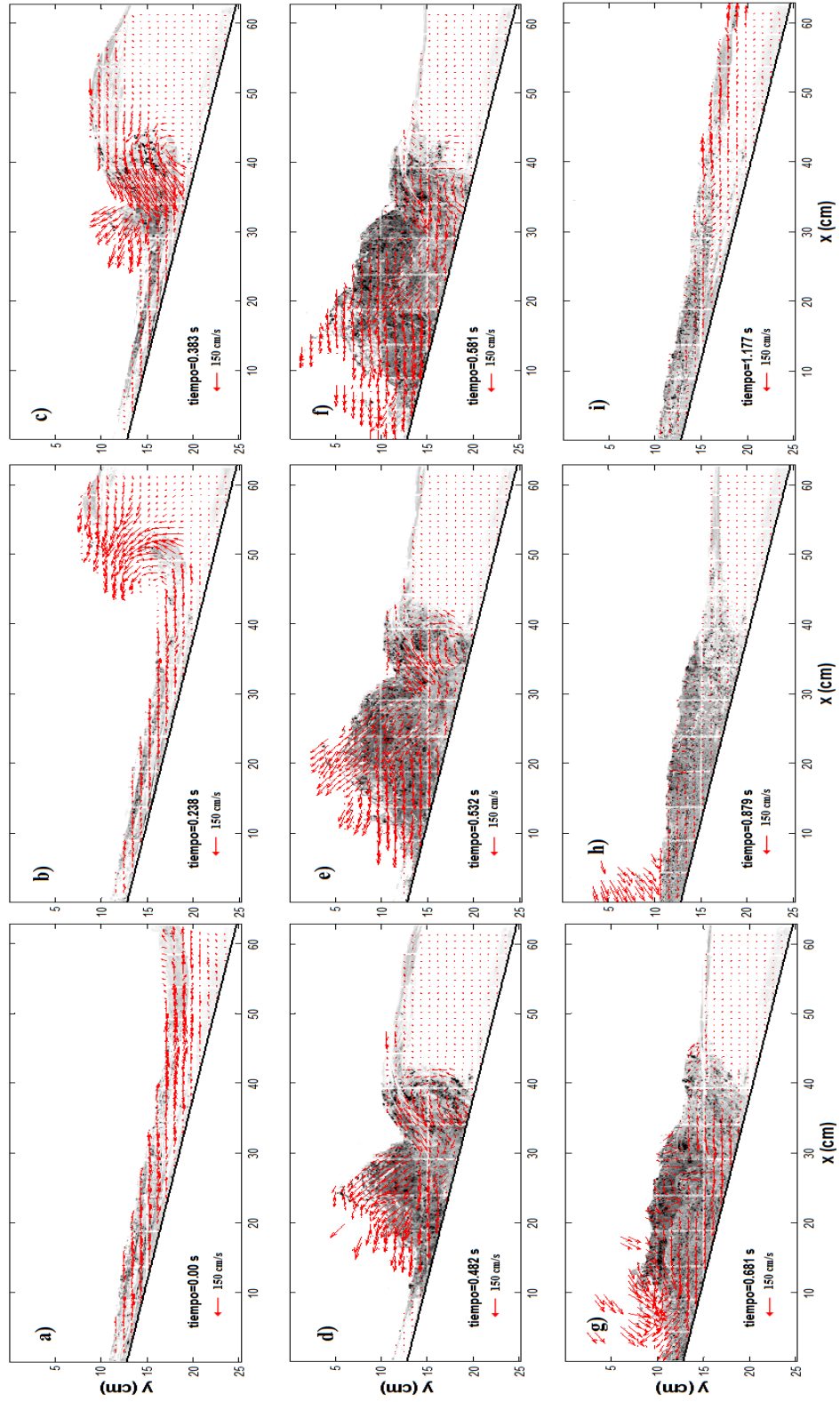


Figura 5.15 Instantes de campos de velocidad obtenidos con la técnica (BIV), para la fase de rotura en voluta ( $H=0.10$  m;  $T=1.5$  s).

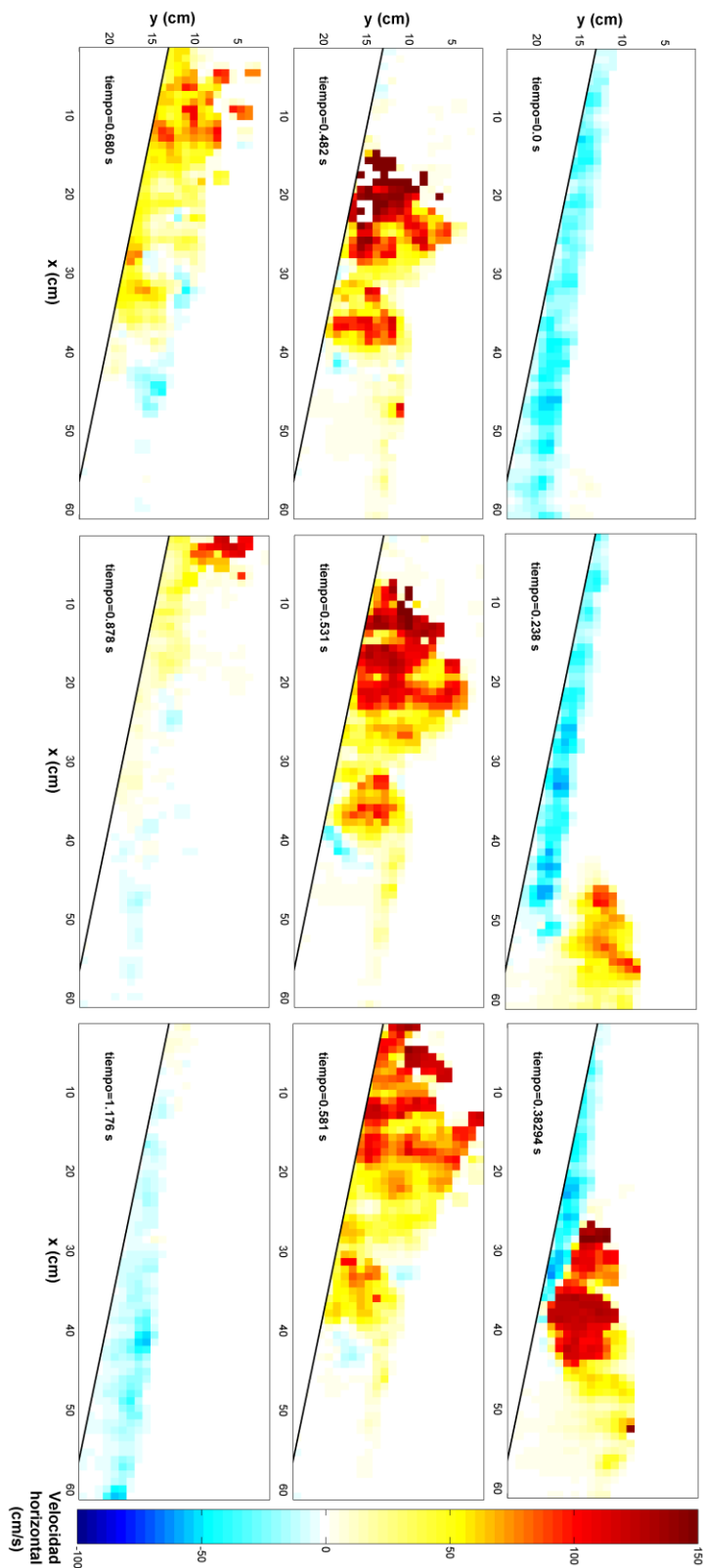


Figura 5.16 Resultados de la componente horizontal de la velocidad ( $H=10$  cm;  $T=1.5$  s).

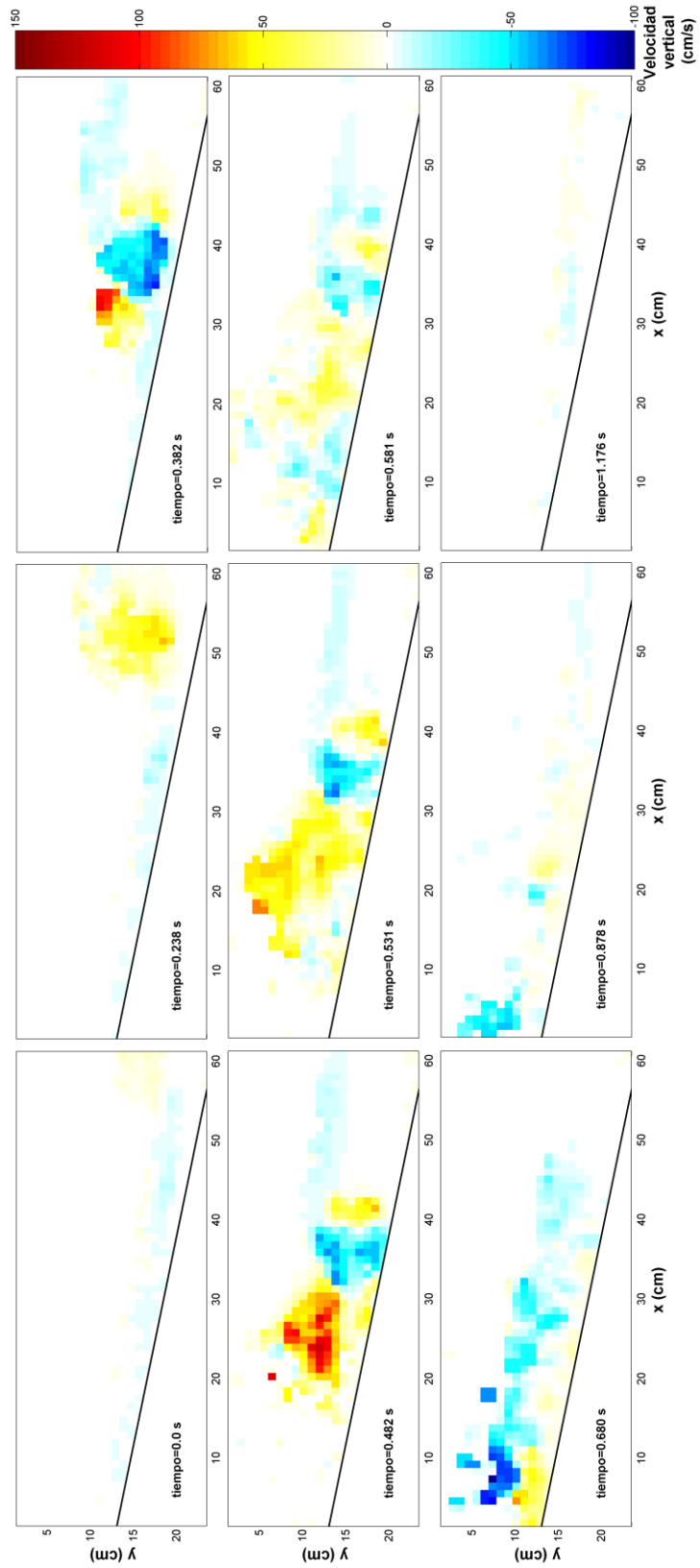


Figura 5.17 Resultados de la componente vertical de la velocidad (H=10cm; T=1.5s).

Con el propósito de mostrar la evolución espacio-temporal del campo de velocidades inducido por una ola más energética, se presentan también los resultados correspondientes a una ola con  $H=18$  cm y  $T=1.5$  s. La Figura 5.18 presenta la evolución espacio-temporal del campo de velocidades obtenido por medio de la técnica BIV implementada. Los recuadros superiores muestran el inicio del proceso de rotura con el colapso de la ola sobre la pendiente de la playa registrado en el panel (c). La magnitud registrada en el campo de velocidad de los paneles centrales, indican la gran fuerza que ejerce este tipo de rotura, ya que la magnitud de las flechas es considerablemente mayor que en el caso anterior (con menos energía). Por último, los paneles inferiores presentan el estado del campo de velocidades rumbo al final del evento, en los que se aprecia una reducción considerable de la magnitud de la velocidad y el comienzo del flujo de descenso para la siguiente ola.

Para este caso, y para los instantes representados en la Figura 5.18, también se considera la descomposición del campo de velocidades en sus componentes horizontal y vertical. Los resultados asociados a la componente horizontal se presentan en la Figura 5.19 donde en los paneles superiores se registra un incremento considerable en la magnitud de la corriente de retorno generada por el descenso de la ola. Mientras que el recuadro (c) de la misma figura, presenta las grandes magnitudes asociadas al impacto de la ola sobre la pendiente. Conforme el evento avanza en el tiempo, los paneles centrales indican un predominio del flujo hacia la costa con magnitudes considerables que superan en un 30 % la velocidad de propagación de una ola regular con las características descritas. Este incremento registrado en la velocidad horizontal del flujo es resultado directo de la dinámica de fluidos inducida por la rotura tipo voluta sobre la pendiente. Rumbo al final del evento, al igual que en el caso anterior se reporta una disminución considerable de la componente horizontal de la velocidad. De hecho, en el panel (h) se observa la separación del flujo horizontal en dos zonas claras una de ascenso y otra de descenso. De forma complementaria, en la Figura 5.20 se ilustran los resultados de la componente vertical de la velocidad de flujo durante la rotura del oleaje. En los paneles superiores se corrobora la naturaleza predominantemente horizontal del flujo ya que en el recuadro (a) se registra una velocidad horizontal muy pequeña. Mientras que en los recuadros (b) y (c) se revela una magnitud considerable de la componente vertical asociada al chorro de la ola que está por golpear la pendiente. En los

paneles centrales e inferiores, se observa la evolución del evento hacia su final, con una clara reducción en la magnitud de la componente vertical de la velocidad.

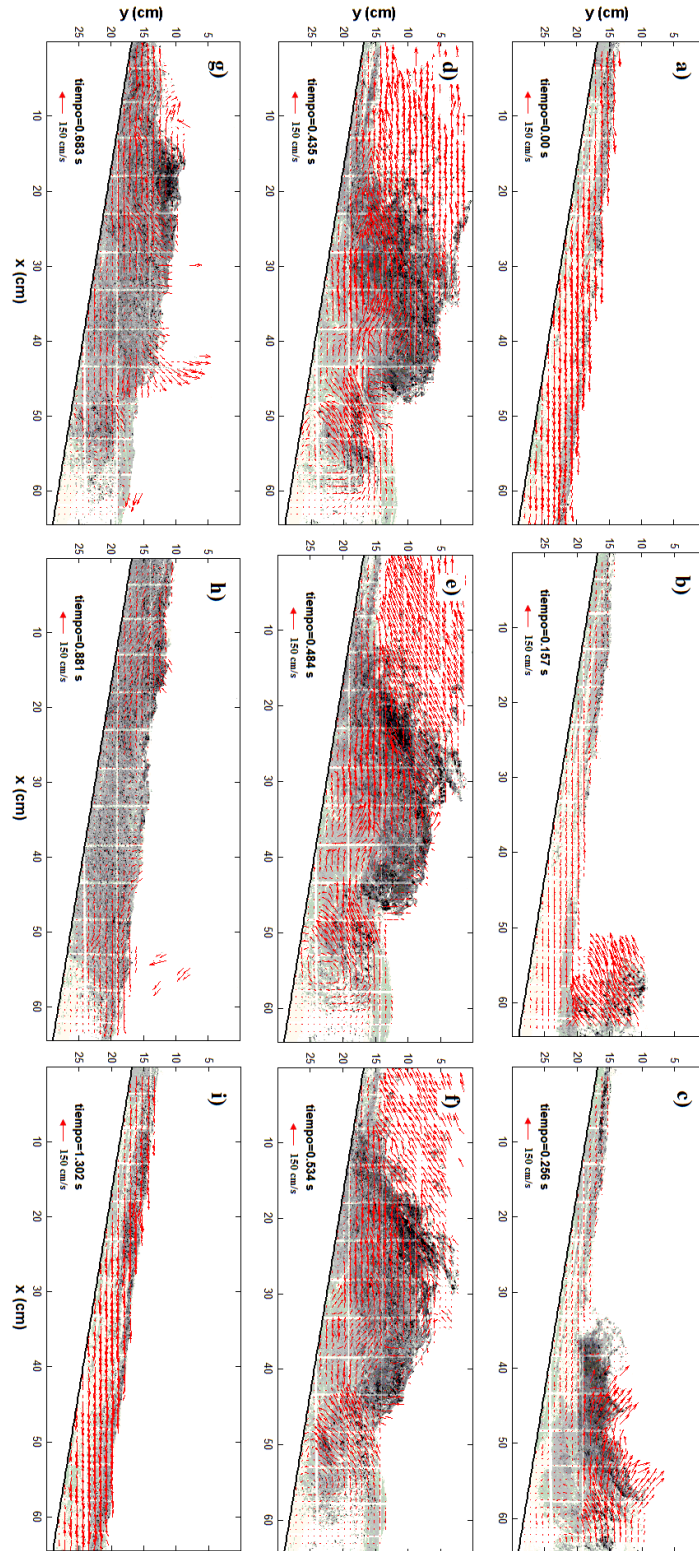


Figura 5.18 Instantes de campos de velocidad obtenidos con la técnica del (BIV), para la fase de rotura en voluta ( $H=0.18$  m;  $T=1.5$  s)

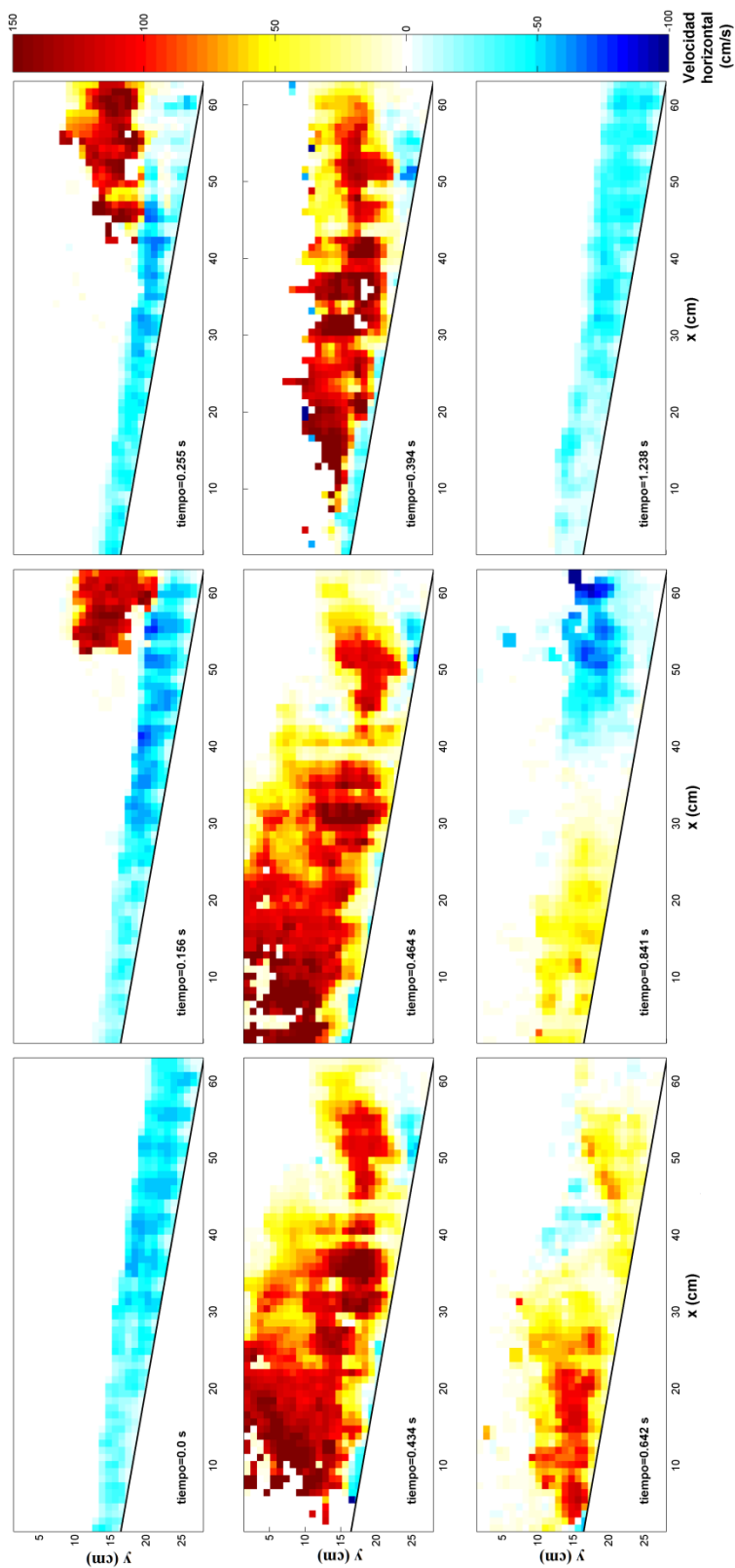


Figura 5.19 Resultados de velocidades horizontales (H=18 cm; T=1.5 s).



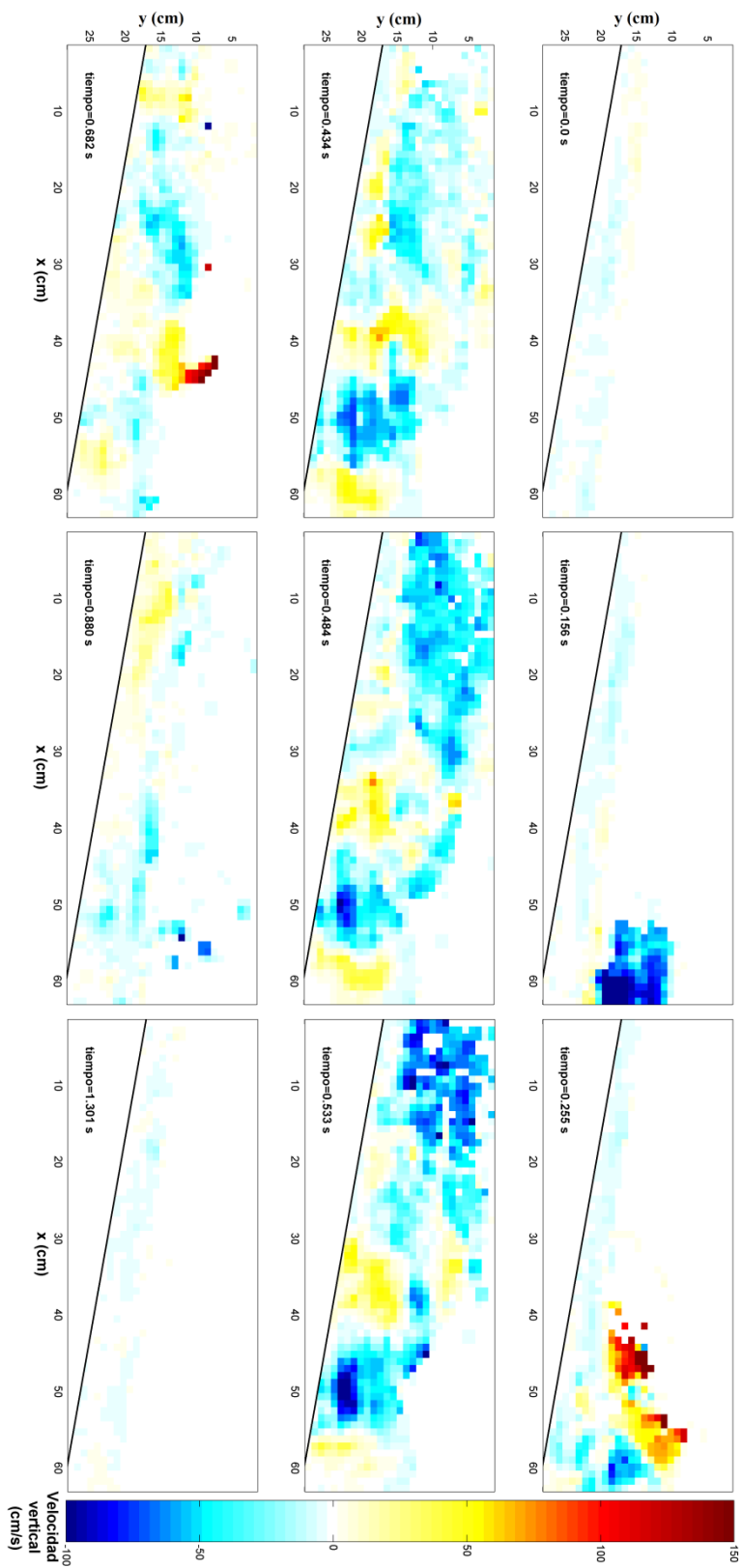


Figura 5.20 Resultados de velocidades verticales ( $H=18$  cm;  $T=1.5$  s).

**Capítulo 6**  
**CONCLUSIONES**

### 6. Conclusiones

El trabajo experimental realizado en esta tesis contribuye al esclarecimiento de los procesos asociados generados en las zonas de rompientes y lavado. Los resultados referentes al campo de velocidad medido en estas zonas, se realizaron de manera satisfactoria en laboratorio sobre una playa de tipo impermeable construida en el canal de oleaje del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

Se obtuvieron resultados derivados de la técnica de trazado de burbujas (BIV) y la información obtenida con dicha técnica fue validada con un corrientímetro acústico por efecto Doppler (ADV). Dada la magnitud del esfuerzo experimental que se realizó en este proyecto de investigación, solo se seleccionaron parte de los resultados experimentales, a fin de ilustrar el análisis de resultados y la calidad de información disponible con dos condiciones de oleaje ( $H=10$  cm;  $T=1.5$  s) energía moderada y ( $H=18$  cm;  $T=1.5$  s) energía intensa.

La técnica de trazado de burbujas demostró una gran eficiencia en la obtención de campos de velocidad en las zonas de lavado y rompientes, lo que a su vez demuestra que tiene una gran ventaja ante técnicas de medición de flujo tales como PIV, PTV y LSV en los casos de flujos con alto contenido de burbujas, debido a que el láser con el cual se ilumina al flujo, sufre difracción por el alto contenido de burbujas de aire, provocando así una mala correlación en la obtención de vectores de velocidad.

Se realizó un análisis de incertidumbre el cual comprende una evaluación del nivel de confiabilidad en los registros de mediciones obtenidos. Este análisis se realizó tanto para la técnica de trazado de burbujas (BIV), como para las mediciones obtenidas con el corrientímetro acústico (ADV) en las zonas de rompientes y lavado. Para el cálculo de la incertidumbre en ambos conjuntos de datos obtenidos por el BIV y ADV, se utilizaron los promedios de fase para un periodo de ola, esto permitió identificar la desviación estándar en ambas mediciones.

Otra parte importante de la investigación realizada consistió en la comparación y validación de ambas técnicas de medición utilizadas. Por una parte el velocímetro acústico y por otra

la técnica no intrusiva conocida como BIV, esta comparación se llevó a cabo en dos puntos seleccionados sobre la pendiente impermeable ubicados en la zona de rompientes y la zona de lavado.

En general, las pruebas realizadas en este trabajo de investigación, presentan algunas diferencias respecto al valor de la desviación estándar que se registran en los datos. Un ejemplo de ello, se puede observar en las mediciones obtenidas por medio del velocímetro acústico, las cuales reportan mayor incertidumbre comparados con la que se obtiene con la técnica del BIV. Esto debido a que el flujo presenta una gran cantidad de burbujas de aire en las zonas de estudio. Sin embargo, cabe resaltar que la confiabilidad obtenida por ambas técnicas de medición es aceptable, por lo que el uso puede ser considerado apropiado.

Una vez validada la técnica de velocimetría por trazado de burbujas, fue posible construir mapas espacio-temporales de la evolución del campo de velocidades durante la rotura del oleaje. Estos mapas proveen la posibilidad de determinar la magnitud de la velocidad en cualquier punto de la fotografía, lo cual representa otra de las ventajas de la técnica de trazado de burbujas en comparación con técnicas de medición puntual. Así, es posible dar seguimiento a la evolución de la dinámica de fluidos asociada al fenómeno de rotura del oleaje.

### **6.1 Futuras líneas de investigación**

Debido a que el estudio de los procesos físicos que se generan en la zona de rompientes sigue siendo aún limitado es necesario seguir realizando trabajos de investigación en laboratorio que permitan un mejor entendimiento de los diversos procesos que se generan en estas zonas. Por tal motivo a continuación se mencionan algunas líneas de trabajo o investigación que más adelante podrían estudiarse.

- Trabajar con modelos de playa en laboratorio para el análisis sobre la evolución de la respuesta morfológica de playas ante la acción del oleaje.
- Realizar una combinación de técnicas como PIV y BIV, para un mejor estudio dentro de la zona de rompientes.

- Realizar estudios sobre el transporte de sedimentos por medio de la técnica de trazado de burbujas.
- Incrementar el área de estudio de la técnica de trazado de burbujas.

**Capítulo 7**  
**BIBLIOGRAFÍA**

## 7. Bibliografía

- **Adrián, R.J. & Yao, C.S.** 1984. Development of pulsed laser velocimetry (PLV) for measurement of fluid flow. In: Patterson G, Zakin J (ed). Proceedings of the 8<sup>th</sup> biennial symposium on turbulence, Rolla, Missouri, September 1984, pp. 170-186.
- **Bakhtyar, A.M.R., Barry, D.A, Yeganeh-Bakhtiary, A, Zou, Q.P.** 2010. Air-water two-phase flow modeling of turbulent surf and swash zone wave motions. *Adv Water Resour* 33(12):1560–1574.
- **Brown, G. L., Roshko, A.** 1974. On density effect and large structure in turbulent mixing layers. *J. Fluid Mech.* 64 775-816.
- **Chang, K.A., Liu, P.L.F.,** 1998. Velocity, acceleration and vorticity under a breaking wave. *Physics of Fluids* 10 (1), 327–329.
- **Chang, K.A. & Liu, P. L.F.** 1999. Experimental investigation of turbulence generated by breaking waves in water of intermediate depth. *Phys. Fluids* 11: 3390-3400.
- **Cowen, E.A., Sou, I.M., Liu, P.L.F., Raubenheimer, B.,** 2003. Particle image velocimetry measurements within a laboratory generated swash zone. *Journal of Engineering Mechanics*, 129 (10), 1119–1129.
- **Cox, D. T., Kobayashi, N., and Okayasu, A.,** 1994. Vertical Variations of Fluid Velocities and Shear Stress in Surf Zones. *Coastal Engineering, (Conferencia)* 98-112
- **Cox, D. T., Hobensack, W. A., and Sukumaran, A.** 2000. Bottom stress in the inner surf and swash zone. *Proc., 27<sup>th</sup> Int. Conf. on Coastal Engineering, ASCE, Reston, Va.,* 108–119.

- **Cox, D. T., and S. L. Anderson, 2001.** Statistics of intermittent surf zone turbulence and observations of large eddies using PIV, *Coastal Eng. J.*, 43, 121–131.
- **Freek, C., Wüste, A., Hentschel, W. 1996.** A novel diode laser PIV/PTV system for the investigation of intake flows in i.c. engines, 8<sup>th</sup> Int. Symp. on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, July 8-11, Lisbon, Portugal.
- **Freek, C., Sousa, J.M.M., Hentschel, W., Merzkirch, W. 1997** Digital Image Compression PIV, a Tool for IC-Engine Research. 7<sup>th</sup> Int. Conf. on “Laser Anemometry Advances and Applications”, September 8-11, Karlsruhe.
- **Govender, K., Alport, M.J., Mocke, G., Michallet, H. 2002.** Video measurements of fluid velocities and water levels in breaking waves. *Physica Scripta* T97:152–159
- **Govender, K., G.P. Mocke and M.J. Alport,** Video-imaged surf zone wave and roller structures and flow fields, *Journal of Geophysical Research* 107 (C7) (2002a), p. 3072.
- **Gui, L., Merzkirch, W., 1996.** A method of tracking ensembles of particle images. *Experiments in Fluids*, 21: 465-468.
- **Gui, L., 1997.** Methodische Untersuchungen zur Auswertung von Aufnahmen der digitalen Particle Image Velocimetry, Dissertation, Universitat Essen.
- **Gui, L., Merzkirch, W., 1998.** Generating arbitrarily sized interrogation windows for correlation-based analysis of particle image velocimetry recordings. *Experiments in Fluids*, 24: 66-6.



- **Gui, L., Merzkirch, W.**, 2000. A comparative study of the MQD method and several correlation-based PIV evaluation algorithms. *Experiments in Fluids* 28: 36-44.
- **Harris T. F. W., Jordan J. M., McMurry W. R., Verwey C. J. & Anderson F. P.**, 1963. Mixing in the surf zone. *Int. J. Air Wat. Pollut.*, 7: 649-67.
- **Hassan, Y. A., Schmidl, W. D. and Ortiz-Villafuerte, J.** 1998. Investigation of three-dimensional two-phase flow structure in a bubbly pipe *Meas. Sci. Technol.* 9: 309–26.
- **Hesselink, L.** 1988 Digital image processing in flow visualization. *Annu. Rev. Fluid Mech.* 20: 421-485.
- **Holland, K. T., Puleo, J. A., and Kooney, T. N.**, 2001. Quantification of swash flows using video-based particle image velocimetry. *Coastal Eng.*, 44: 65–77.
- **Horikawa, K.** 1978a. Nearshore current treatments and their applications to engineering problems, proc. 4<sup>th</sup> Conf. on Port and Ocean Eng. In Arctic Conditions, Memorial Univ. of Newfoundland, 84-114.
- **Horikawa, K.** 1981. Coastal sediment processes. *Ann. Rev. Fluid Mech.* 13: 9-32.
- **Keane, R.D. & Adrian, R.J.** 1990 Optimization of particle image velocimeters. Part I: Double-pulsed systems. *Meas. Sci. Technol.* 1:1202-1215.
- **Kimmoun, O. and Branger, H.**, 2007. A particle image velocimetry investigation on laboratory surf-zone breaking waves over a sloping beach, *Journal of Fluid Mechanics* 588, pp. 353–397.

- **Lindken, R. and Merzkirch, W.**, 2002. A novel PIV technique for measurements in multi-phase flows and its application to two-phase bubbly flows. *Experiments in Fluids*, 3: 814-525.
- **Madsen, P. A., Sorensen, O. R. & Schäffer, H. A.** 1997. Surf zone dynamics simulated by a Boussinesq type model. Part I. Model description and cross-shore motion of regular waves. *Coastal Engineering*. 32: 255–287.
- **Markus, R., Willert, C., and Kompenhans, J.** 1998. Particle Image Velocimetry
- **Masselink, G. and Russell, P.E.**, 2006. Flow velocities, sediment transport and morphological change in the swash zone of a dissipative and reflective beach. *Marine Geology*, 227, 227-240.
- **Merzkirch, W.** 1974. *Flow Visualization*. New York: academic. 250 pp.
- **Nadaoka, K., 1986.** A fundamental study on shoaling and velocity field structure of water waves in the nearshore zone. Tech. Report No. 36, Dept. Civ. Eng., Tokyo Inst. Tech., Japan.
- **Nadaoka, K., Hino, M., and Koyano, Y.** 1989. Structure of the turbulent flow field under breaking waves in the surf zone, *Journal of Fluid Mechanics*, 204: 359-387.
- **Nishino, K., Kato, H. and Torii, K.** 2000. Stereo imaging for simultaneous measurement of size and velocity of particles in dispersed two-phase flow *Meas. Sci. Technol.* 11: 633-45.
- **Pedrozo-Acuña, A., Simmonds, D.J., Otta, A.K. and Chadwick, A.J.**, 2006. On the cross-shore profile change of gravel beaches. *Coastal Engineering*, 53(4): 335-347.

- **Pedrozo-Acuña, A., Ruiz de Alegría-Arzaburu, A., Torres-Freyermuth, A., Mendoza, E., Silva R.,** 2011. Laboratory investigation on pressure gradients induced by plunging breakers. *Coastal Engineering* 58 (8), 722-738.
- **Pedrozo-Acuña, A., Torres-Freyermuth, A.** 2011. Sobre el uso de las ecuaciones de Navier-Stokes con el promedio de Reynolds en el campo de la ingeniería de costas, *Revista Tecnología y Ciencias del Agua, IMTA, Vol. II, No.2, abril-junio*, pp.51-67.
- **Pedrozo-Acuña, A.** 2011. *Introducción a la morfodinámica costera*. Serie Docencia, Instituto de Ingeniería, ISBN en trámite.
- **Peregrine, D.H.,** 1983. Breaking waves on beaches. *Annual Review Fluid Mechanics*. 15, 149–178.
- **Perlin, M., He, J., Bernal, L.P.,** 1996. An experimental study of deep water plunging breakers. *Physics of Fluids* 8: 2365–2374.
- **Rivillas-Ospina, G., Pedrozo-Acuña, A., Silva R., Torres-Freyermuth, A., Gutiérrez, C.** 2011. Estimation of the velocity field induced by plunging breakers in the surf and swash zones. *Experiments in Fluids*, (DOI 10.1007/s00348-011-1208-x)
- **Ray SD.,** (2002). *Applied photographic optics*. Focal, Oxford, pp 215–233.
- **Ryu, Y., Chang, K.A., Lim, H.J.** 2005. Use of bubble image velocimetry for measurement of plunging wave impinging on structure and associated greenwater. *Meas Sci Technol*. 16:1945–1953.
- **Sasaki, T., Horikawa, K., and Hotta, S.** 1976. Nearshore current system on a gently sloping beach, *proc. 15<sup>th</sup> Conf. Coastal Eng., Honolulu*, 626-644.

- **Shin, S., Cox, D.,** 2006. Laboratory observations of inner surf and swash-zone hydrodynamics on a steep slope. *Continental Shelf Research* 26: 56-573.
- **Sonu, C.** (1969) Tethered balloon for study of coastal dynamics. American Soc. Photogrametry Tech. Rep.no. 66. pp. 91-103.
- **Ting, F.C.K. and Kirby, J.T.,** 1994. Observation of undertow and turbulence in a laboratory surf zone. *Coastal Eng.*, 24(1-2): 51-80.
- **Ting, F.C.K. and Kirby, J.T.,** 1995. Dynamics of surfzone turbulence in a strong plunging breaker. *Coastal Eng.*, 24: 177-204.
- **Ting, F.C.K. and Kirby, J.T.,** 1996. Dynamics of surfzone turbulence in a spilling breaker. *Coastal Eng.*, 27: 131-160.
- **Uberoi, M. S., Kovasnay, L. S. G.** 1955. Analysis of turbulent density fluctuations by the shadow method. *J. Appl. Phys.* 26: 19-24.
- **Westerweel, J.** 1993. Analysis of PIV interrogation with low pixel resolution. In: Cha SS, Trolinger JD (eds) *Optical diagnostics in fluid and thermal flow*. SPIE, Bellingham, Washington, pp 624-635.
- **Willert, C.E., Gharib M.** 1991. Digital particle image velocimetry. *Experiments in Fluids*, 10:181-193.

## **ANEXO A**



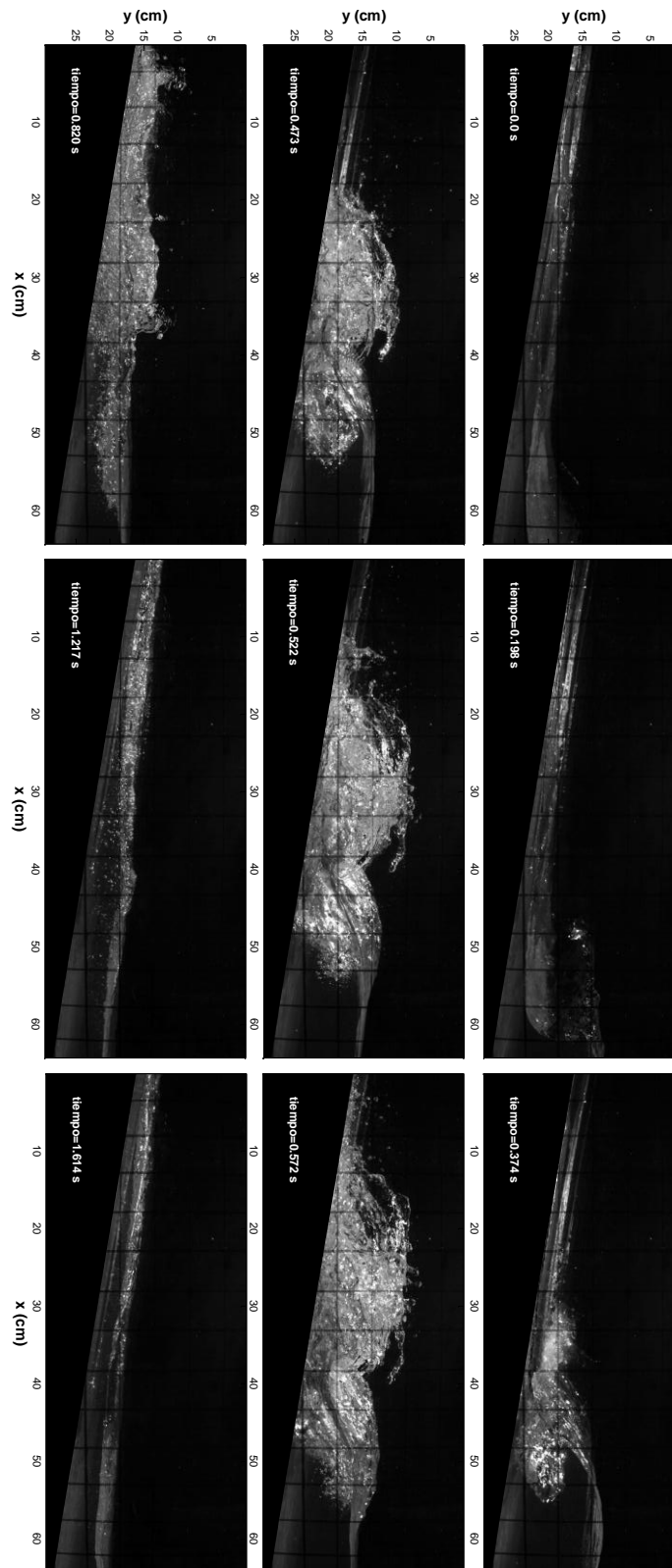
**ANEXO A.**

En la presente sección se muestran los resultados de las 11 pruebas restantes realizadas en este trabajo de investigación, inicialmente se muestran esquemas de fotografías naturales obtenidas con una cámara de alta velocidad marca Fastec (HisPec), con resolución de 1120 x 618 pixeles descrita a detalle en el capítulo 3. Posteriormente se muestran esquemas del procesamiento de imágenes naturales (inversión de color), descrito en el capítulo 4.

Mediante la utilización del algoritmo de correlación conocido como Diferencia de Mínimos Cuadrados MQD, el cual identifica los movimientos de las burbujas que aparecen en dos fotografías consecutivas, se logro obtener los esquemas del campo de velocidades que aquí se muestran. Finalmente se exponen los esquemas de los resultados de las velocidades horizontales y verticales.

A continuación en la siguiente tabla se muestra el orden en que se presentan las pruebas.

Nombre	H (cm)	T (s)	Ir (0-)	$\tan \beta$
H10T20	10	2.0	1.2463	0.2
H12T10	12	1.0	0.7047	0.2
H14T10	14	1.0	0.6525	0.2
H14T12	14	1.2	0.7540	0.2
H15T15	15	1.5	0.8524	0.2
H15T20	15	2.0	1.0176	0.2
H16T10	16	1.0	0.6103	0.2
H16T12	16	1.2	0.7053	0.2
H17T10	17	1.0	0.5921	0.2
H17T12	17	1.2	0.6650	0.2
H18T20	18	2.0	0.9289	0.2



**Figura A.1** Instantes no consecutivos de imágenes naturales para una ola en rotura (H=10cm, T=2.0s).



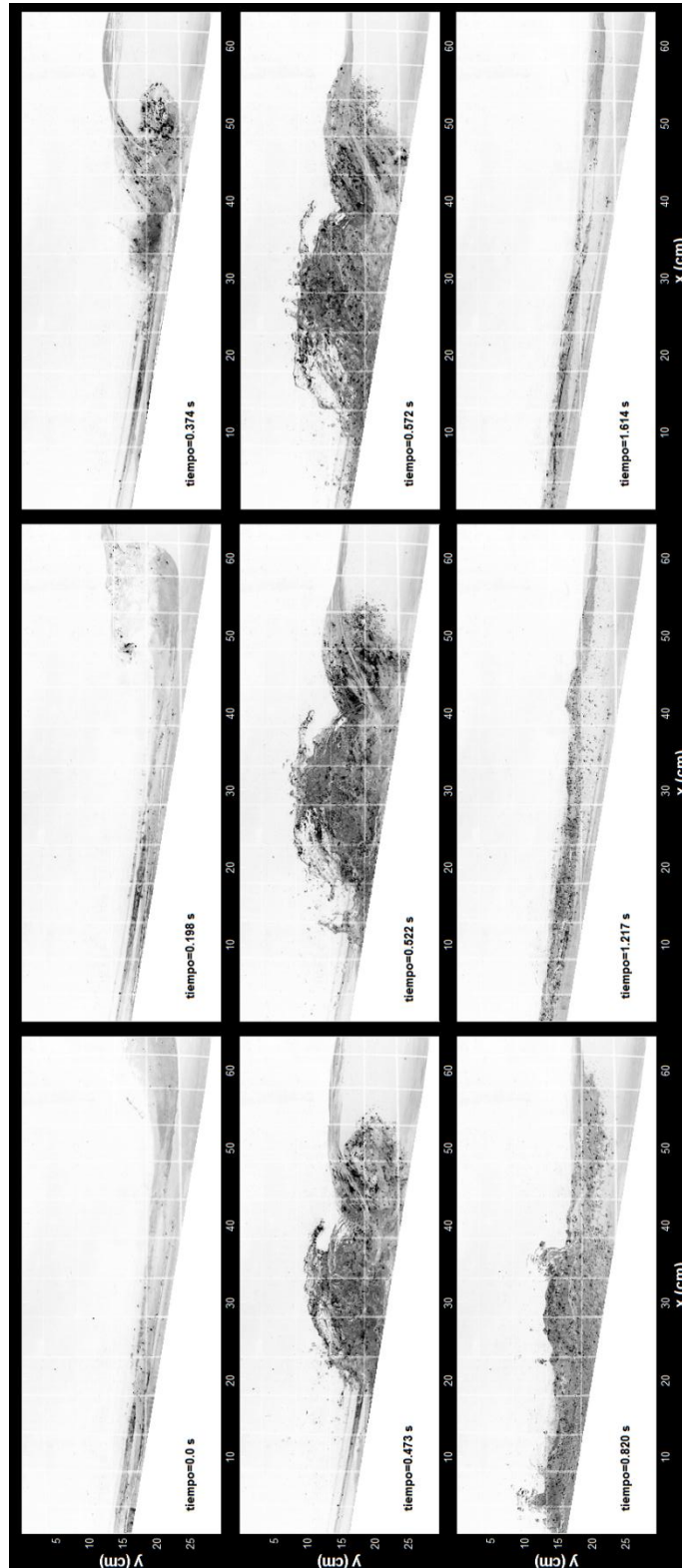
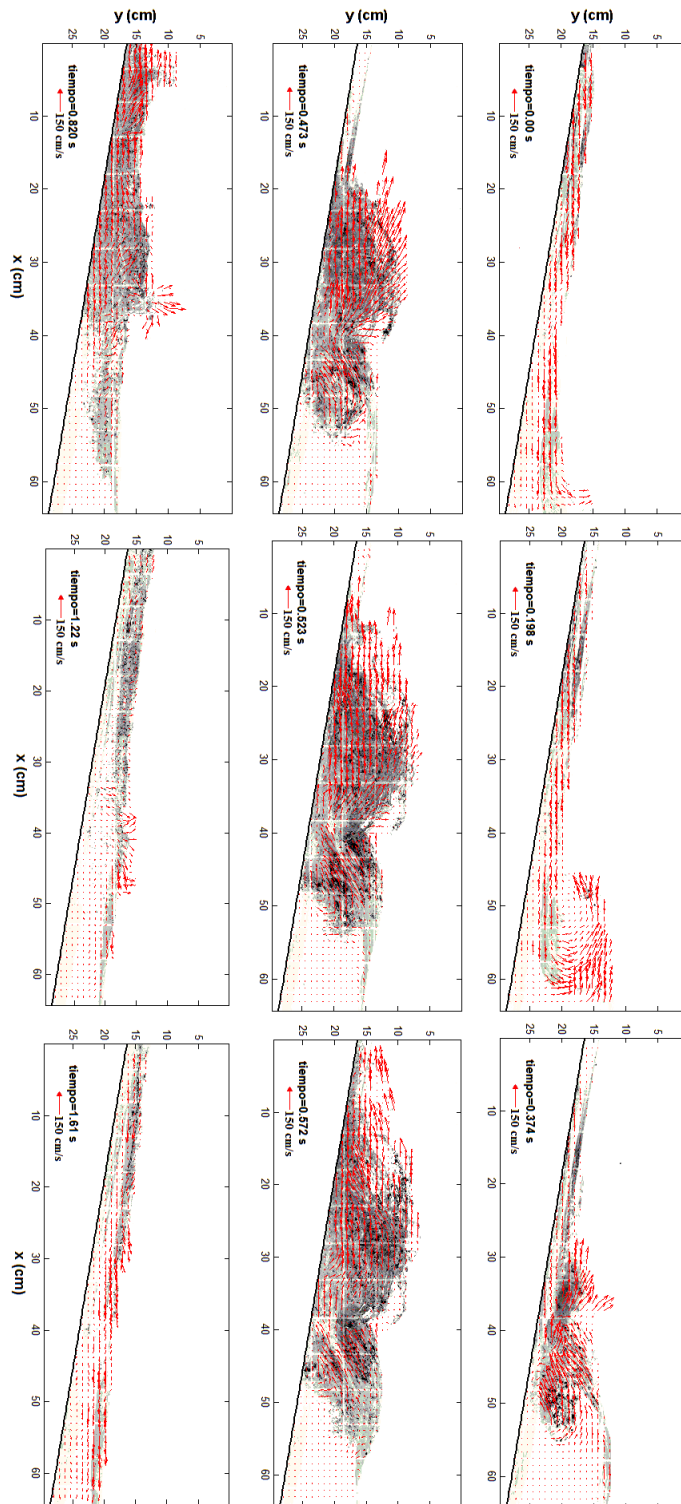


Figura A.2 Ejemplo de las imágenes procesadas con la técnica de inversión de color (H=10cm; T=2.0s).



**Figura A.3** Instantes de campos de velocidad obtenidos con la técnica (BIV), para la fase de rotura en voluta (H=0.10 m; T=2.0 s).

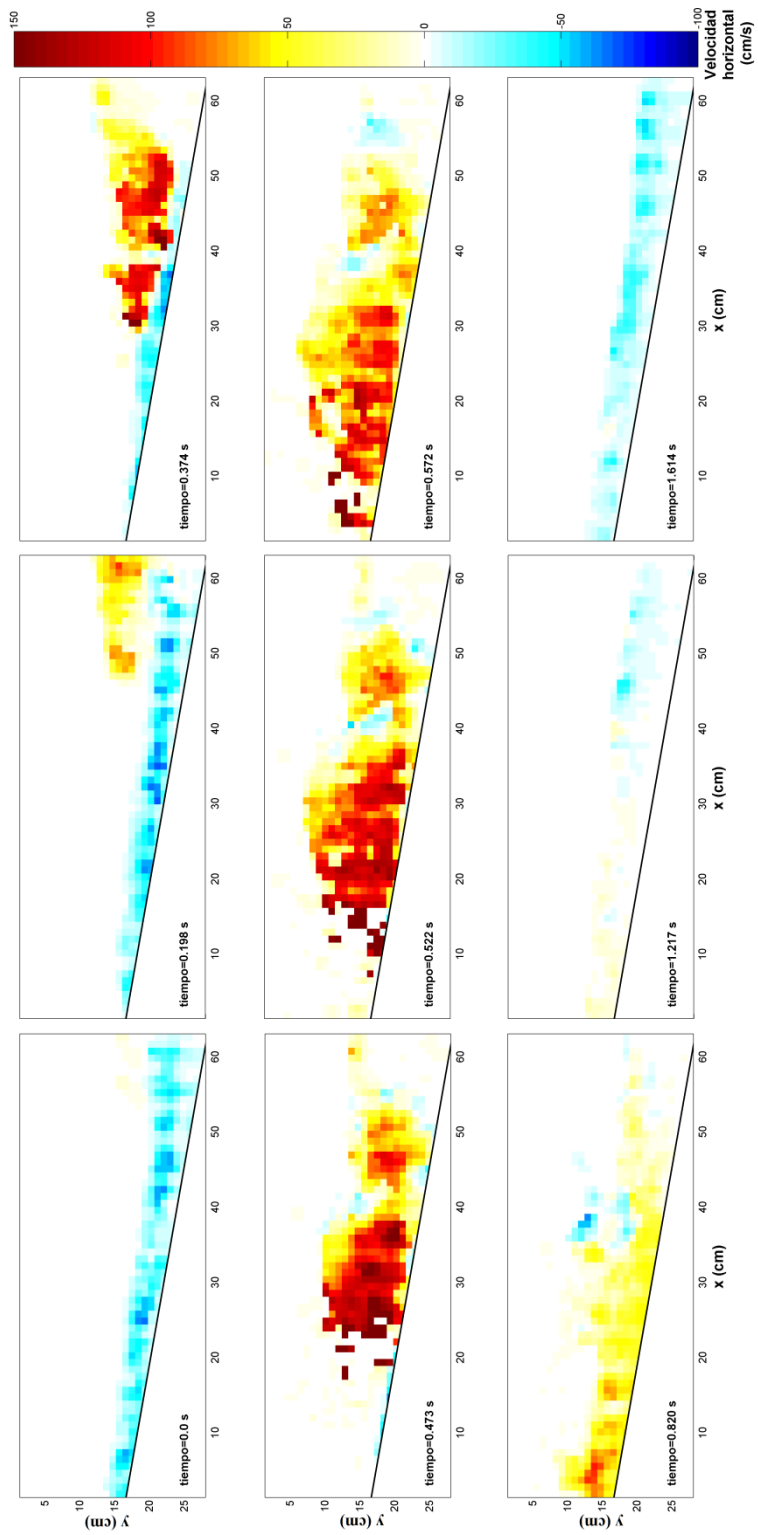
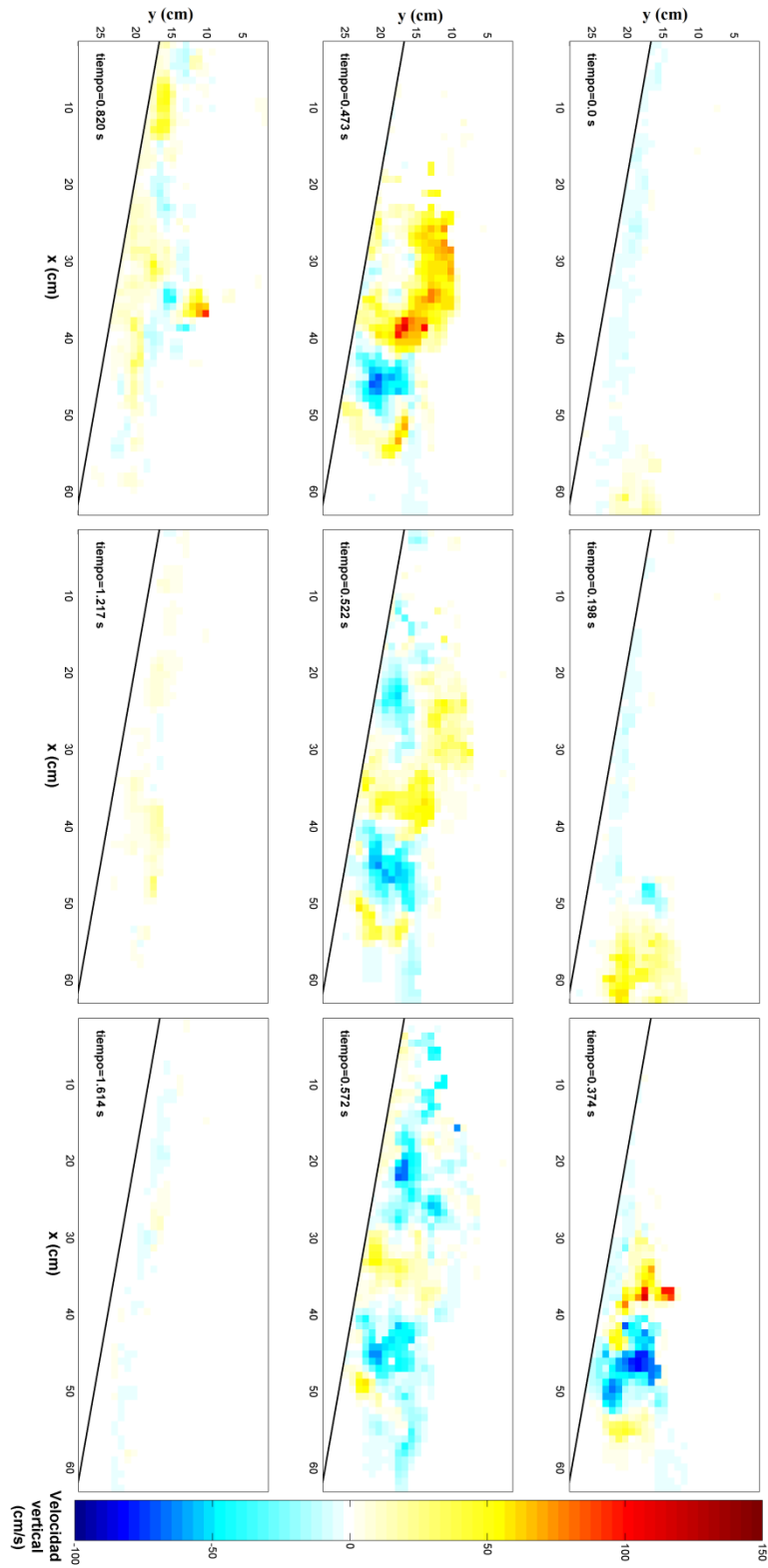
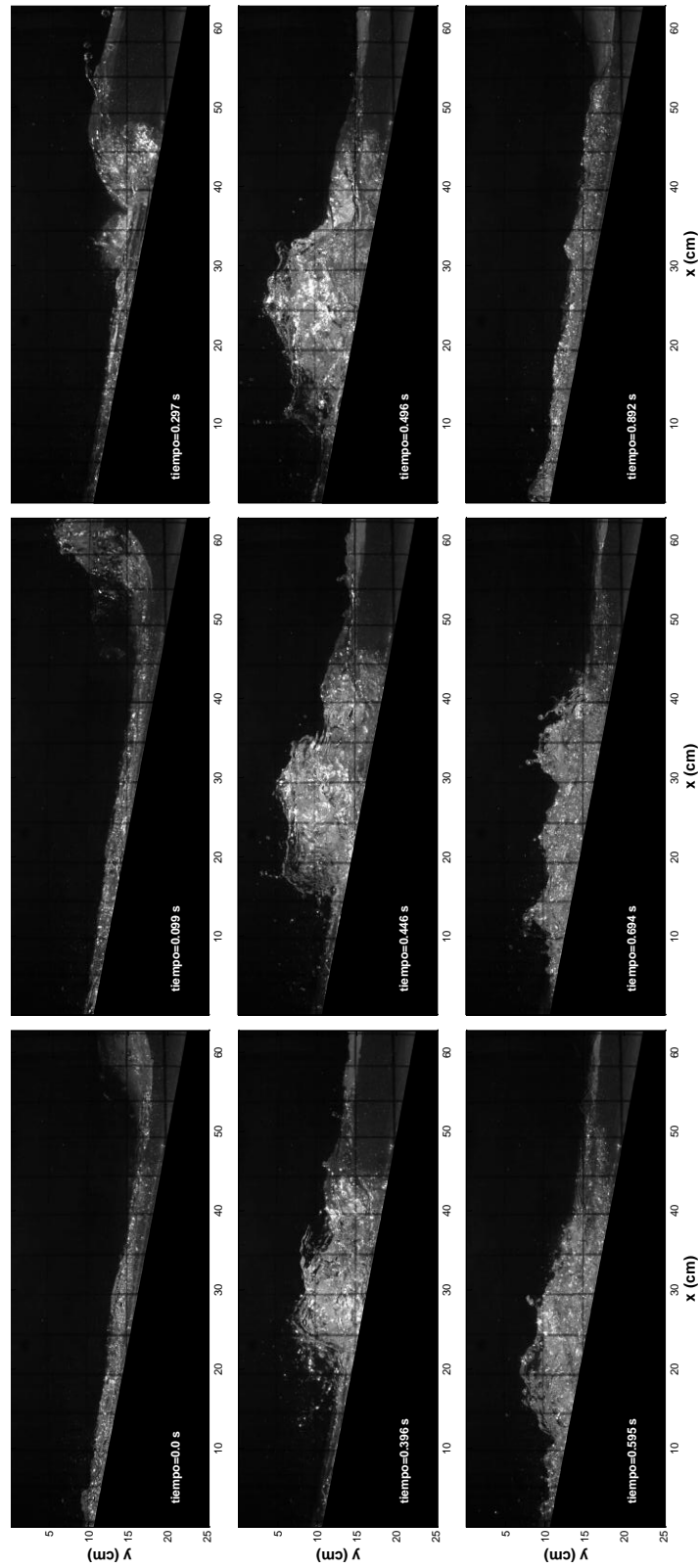


Figura A.4 Resultados de la componente horizontal de la velocidad (H=10 cm; T=2.0s).



**Figura A.5** Resultados de la componente vertical de la velocidad (H=10 cm; T=2.0 s).



**Figura A.6** Instantes no consecutivos de imágenes naturales para una ola en rotura (H=12 cm, T=1.0 s).

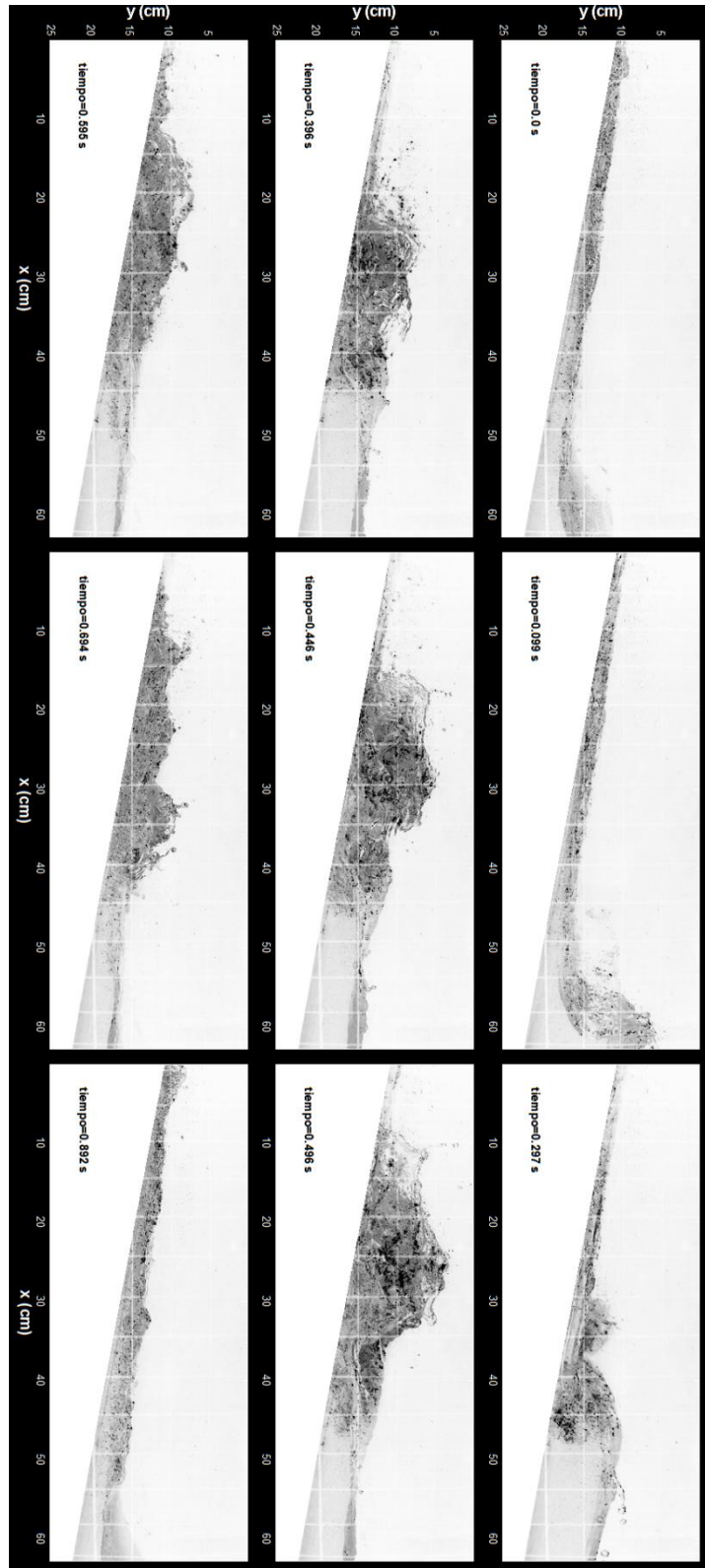
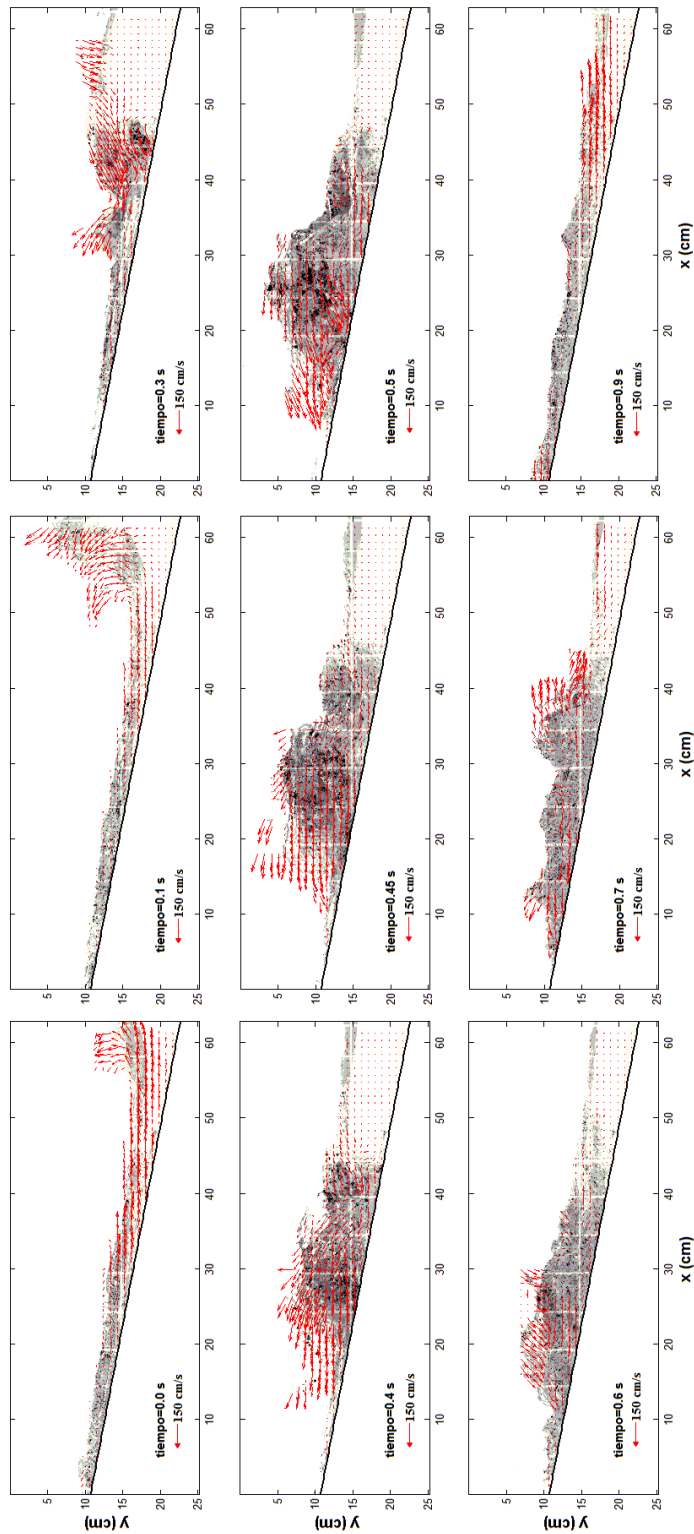


Figura A.7 Ejemplo de las imágenes procesadas con la técnica de inversión de color (H=12 cm; T=1.0 s).



**Figura A.8** Instantes de campos de velocidad obtenidos con la técnica (BIV), para la fase de rotura en voluta (H=12 cm; T=1.0 s).

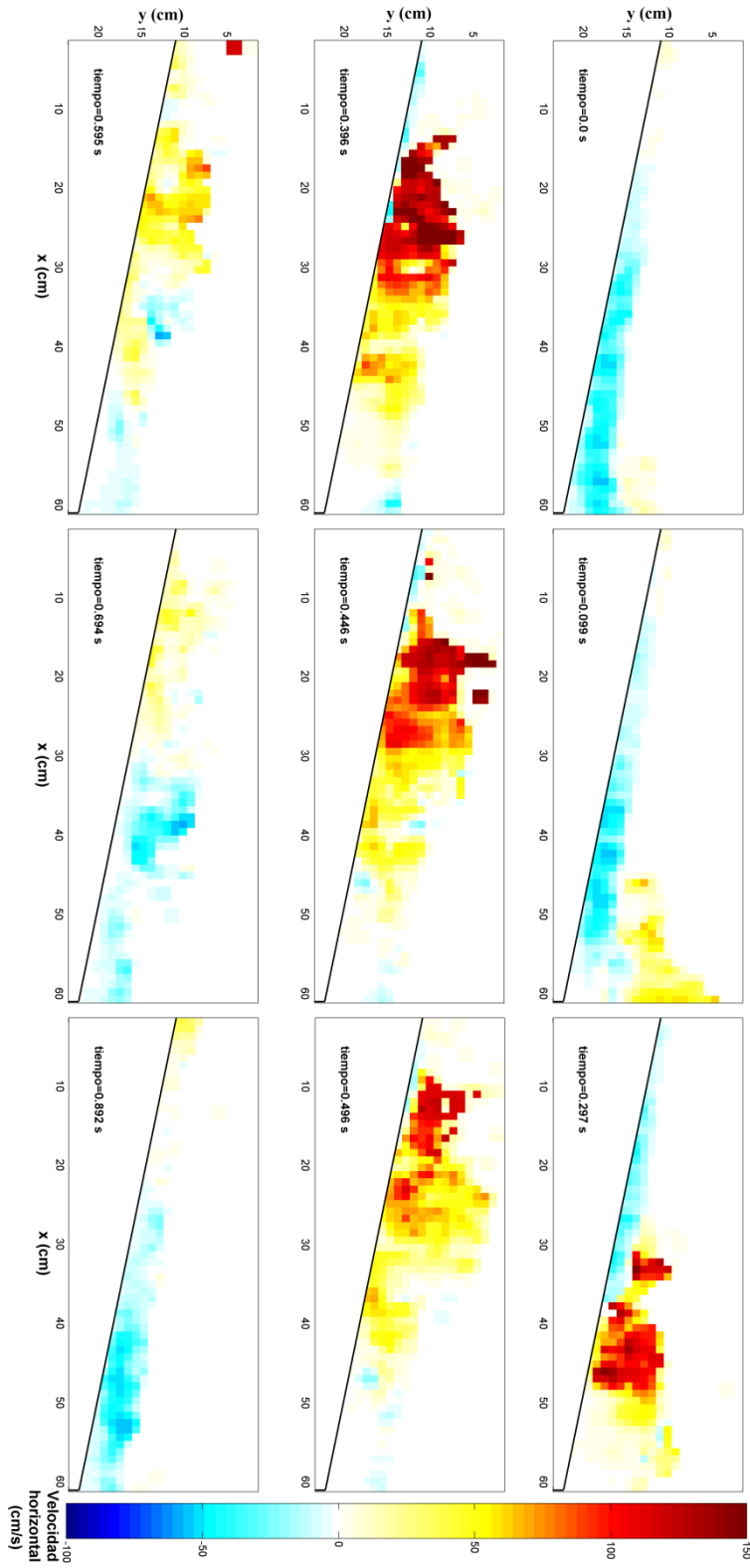
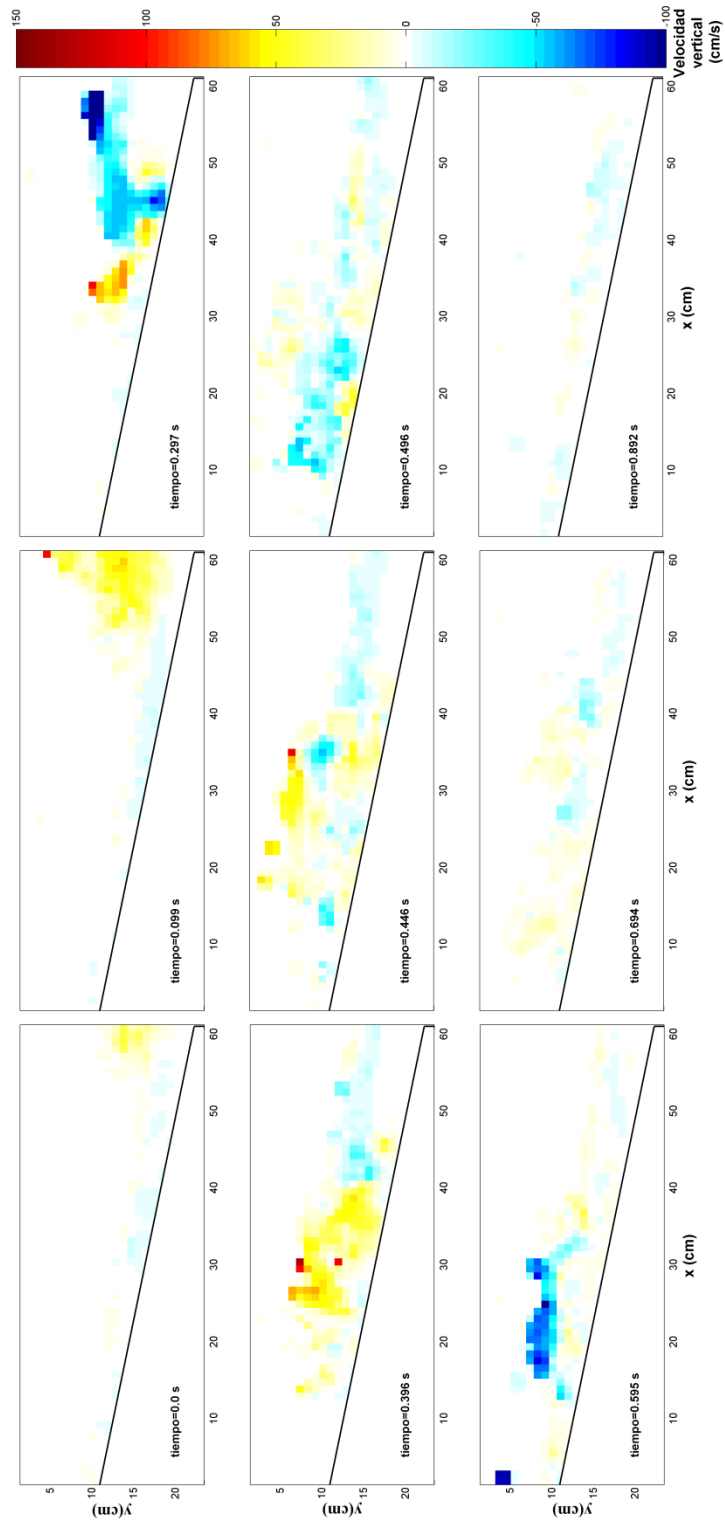


Figura A.9 Resultados de la componente horizontal de la velocidad (H=12 cm; T=1.0 s).





**Figura A.10** Resultados de la componente vertical de la velocidad (H=12 cm; T=1.0 s).

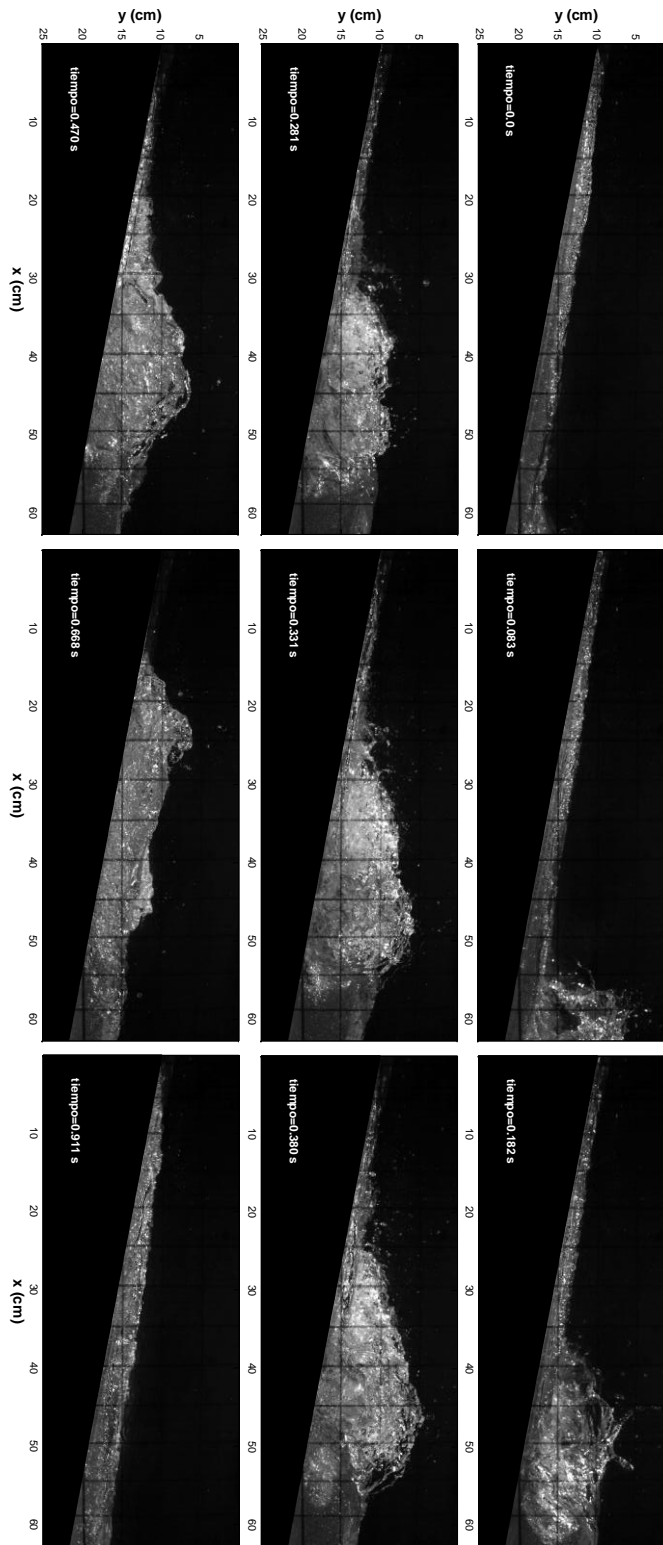


Figura A.11 Instantes no consecutivos de imágenes naturales para una ola en rotura (H=14 cm, T=1.0 s).

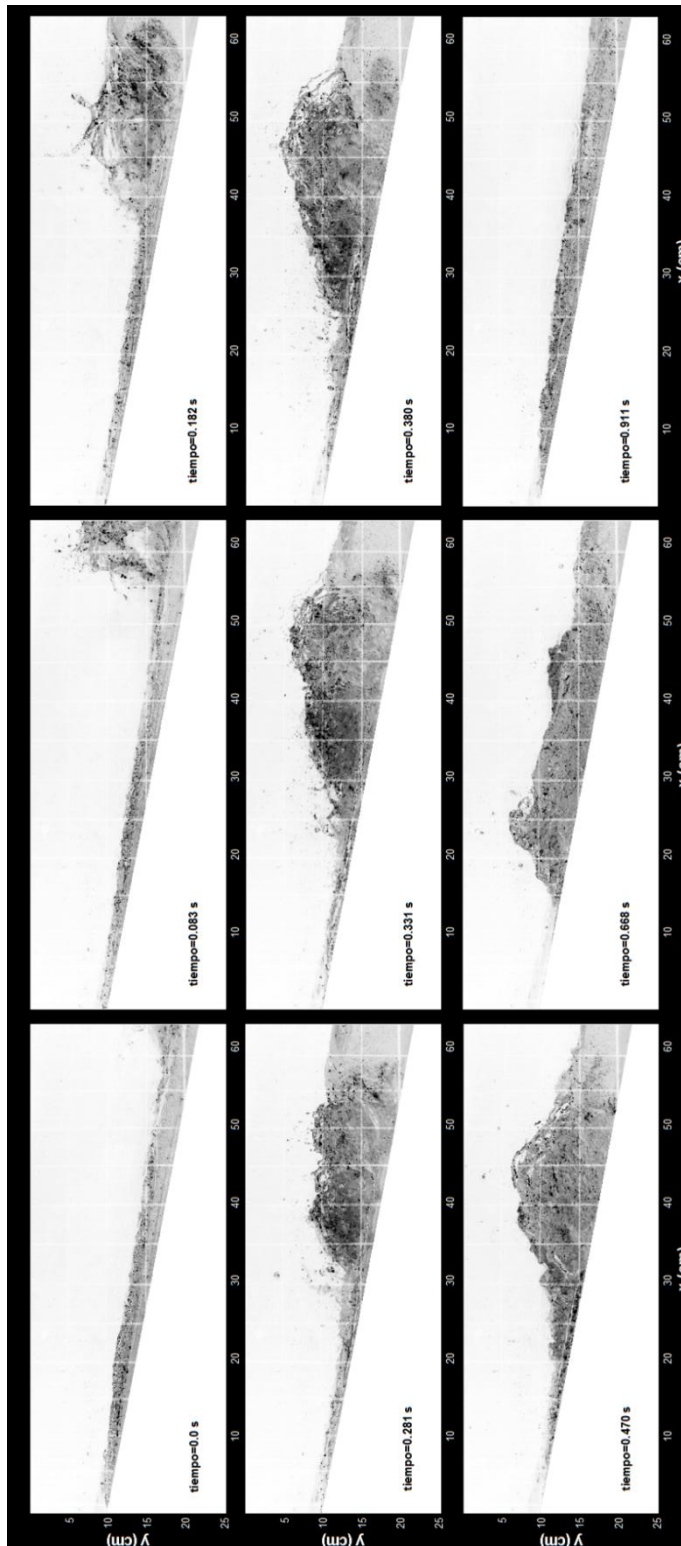
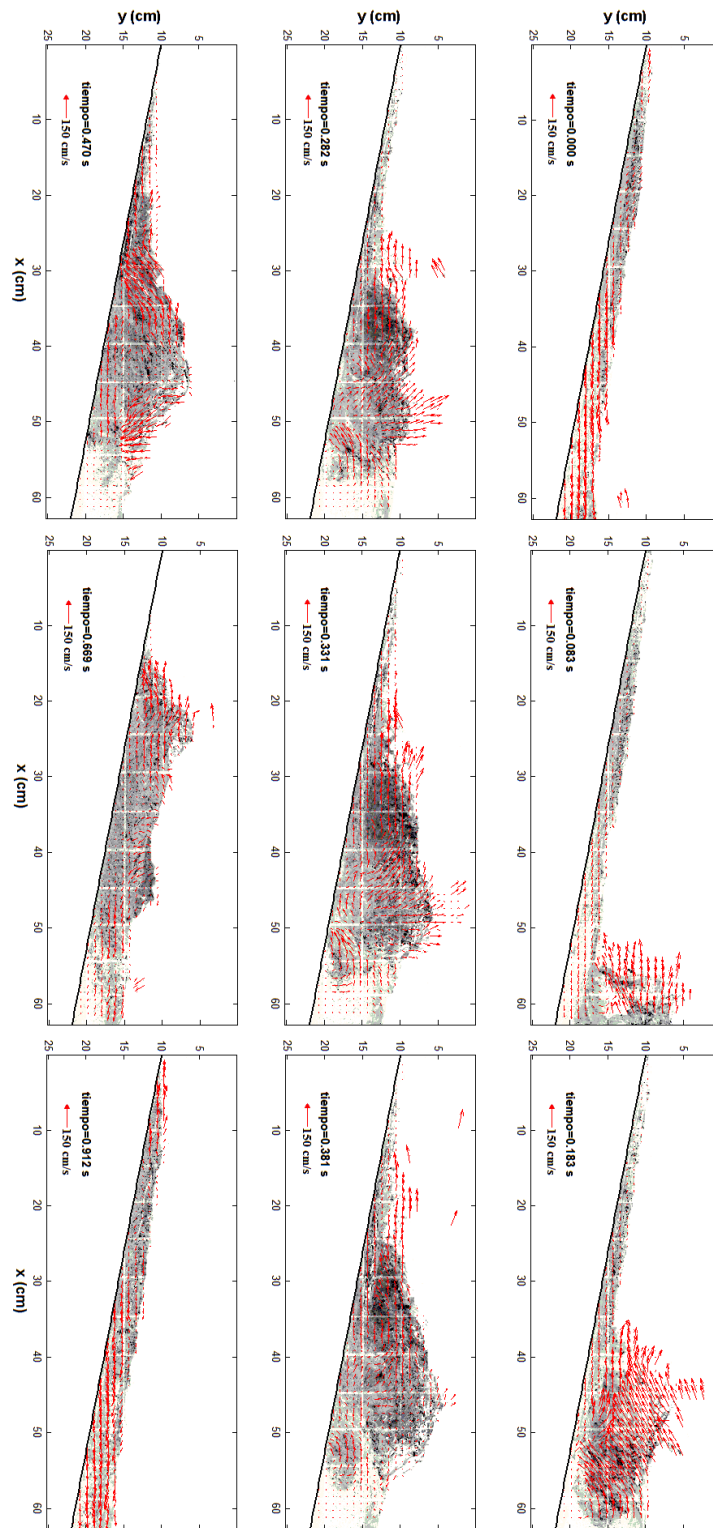
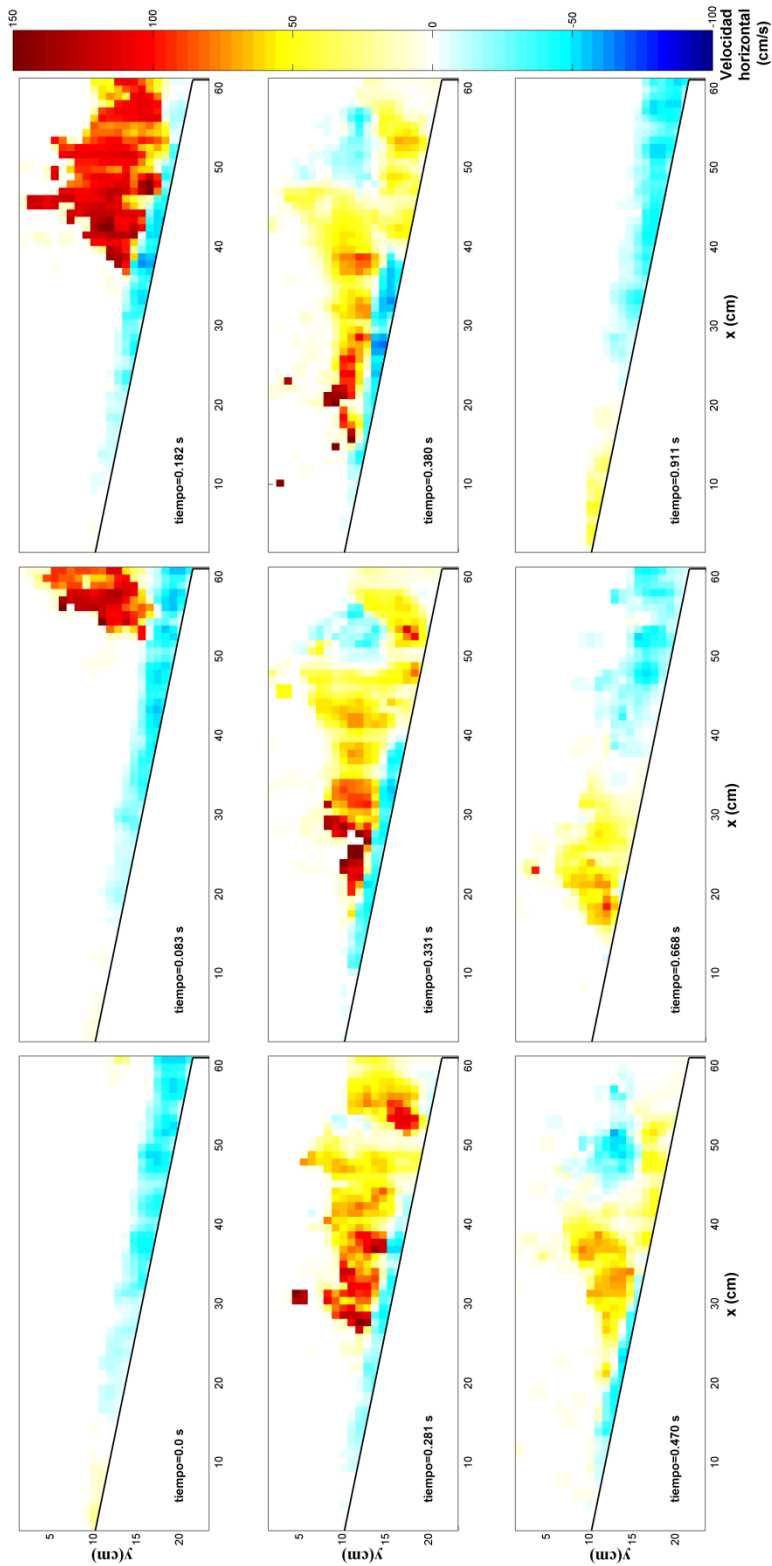


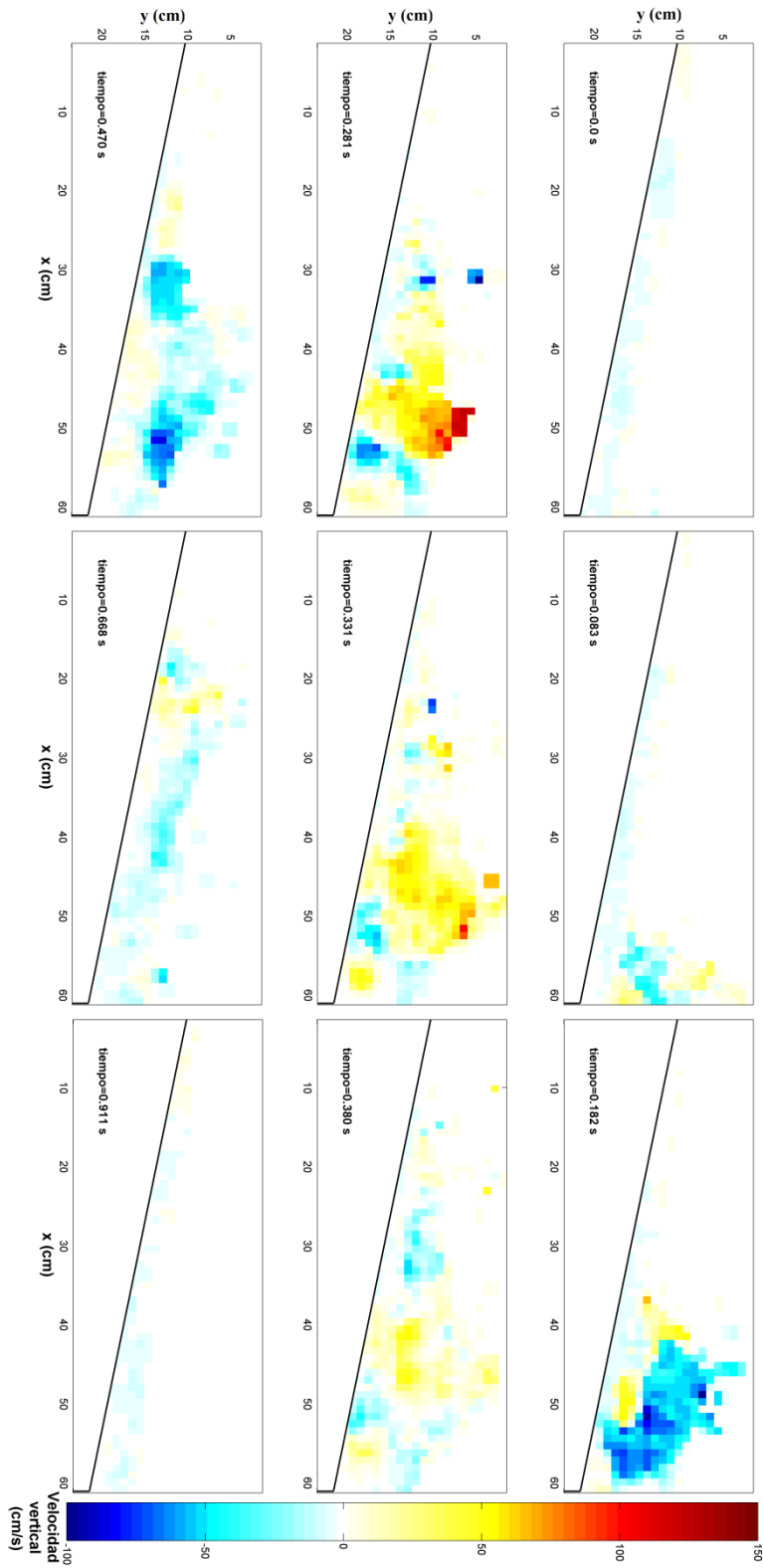
Figura A.12 Ejemplo de las imágenes procesadas con la técnica de inversión de color (H=14 cm; T=1.0 s).



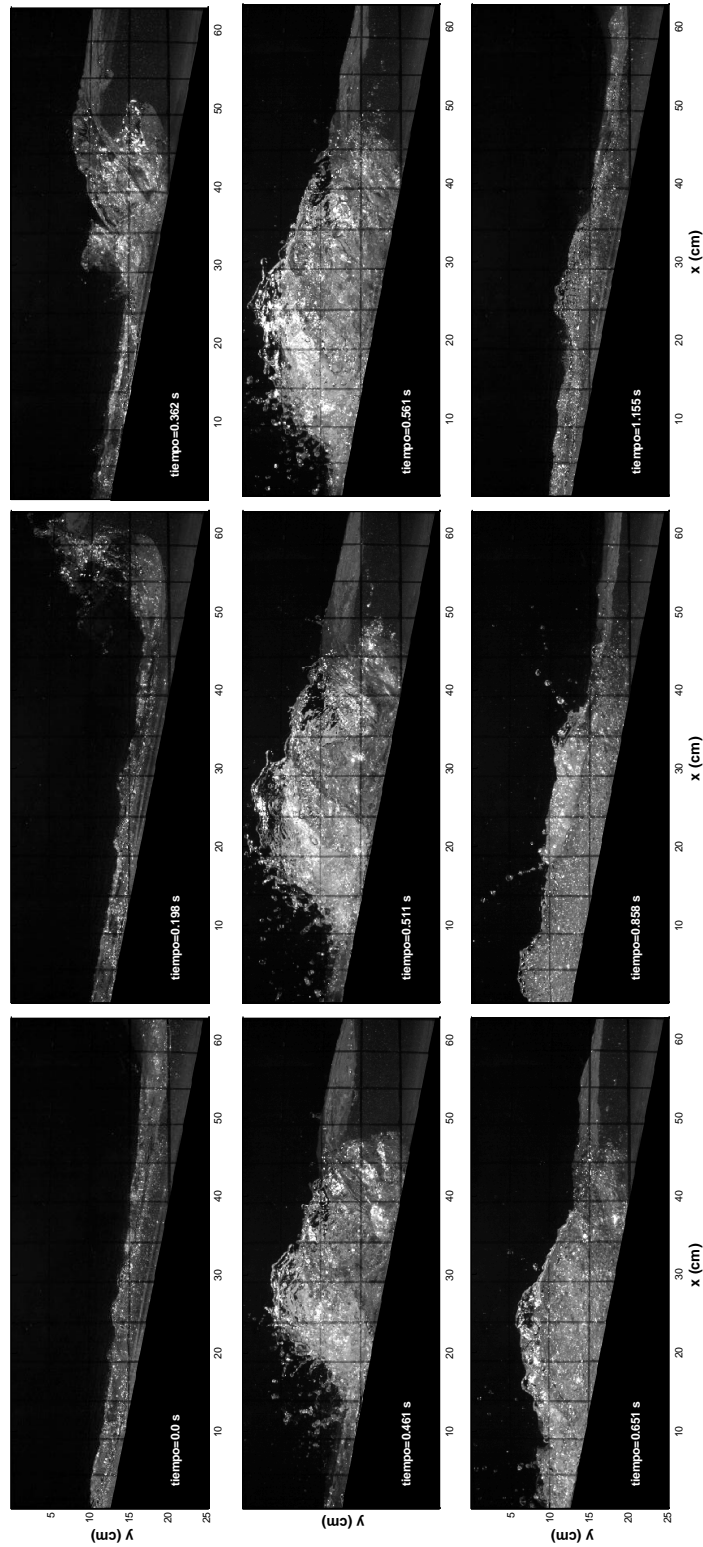
**Figura A.13** Instantes de campos de velocidad obtenidos con la técnica (BIV), para la fase de rotura en voluta (H=14 cm; T=1.0 s).



**Figura A.14** Resultados de la componente horizontal de la velocidad (H=14 cm; T=1.0 s).



**Figura A.15** Resultados de la componente vertical de la velocidad (H=14 cm; T=10 s).



**Figura A.16** Instantes no consecutivos de imágenes naturales para una ola en rotura (H=14 cm, T=1.2 s).

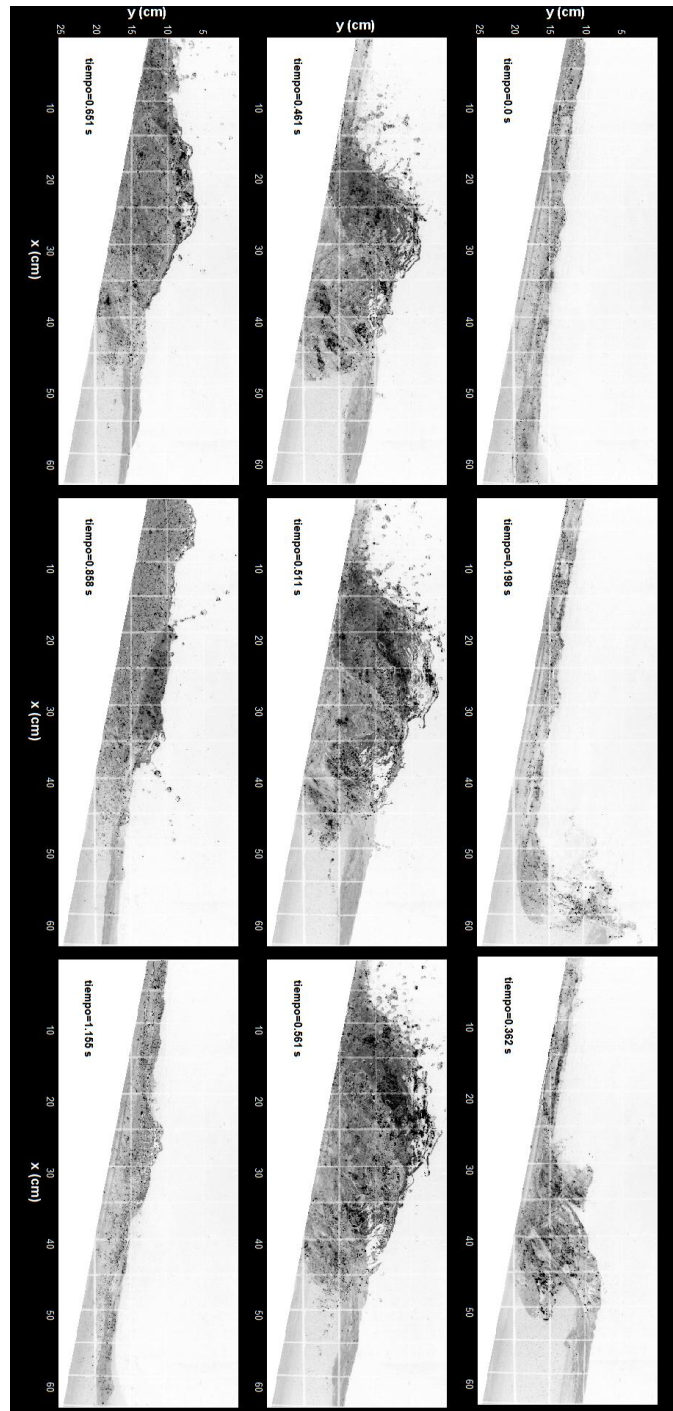
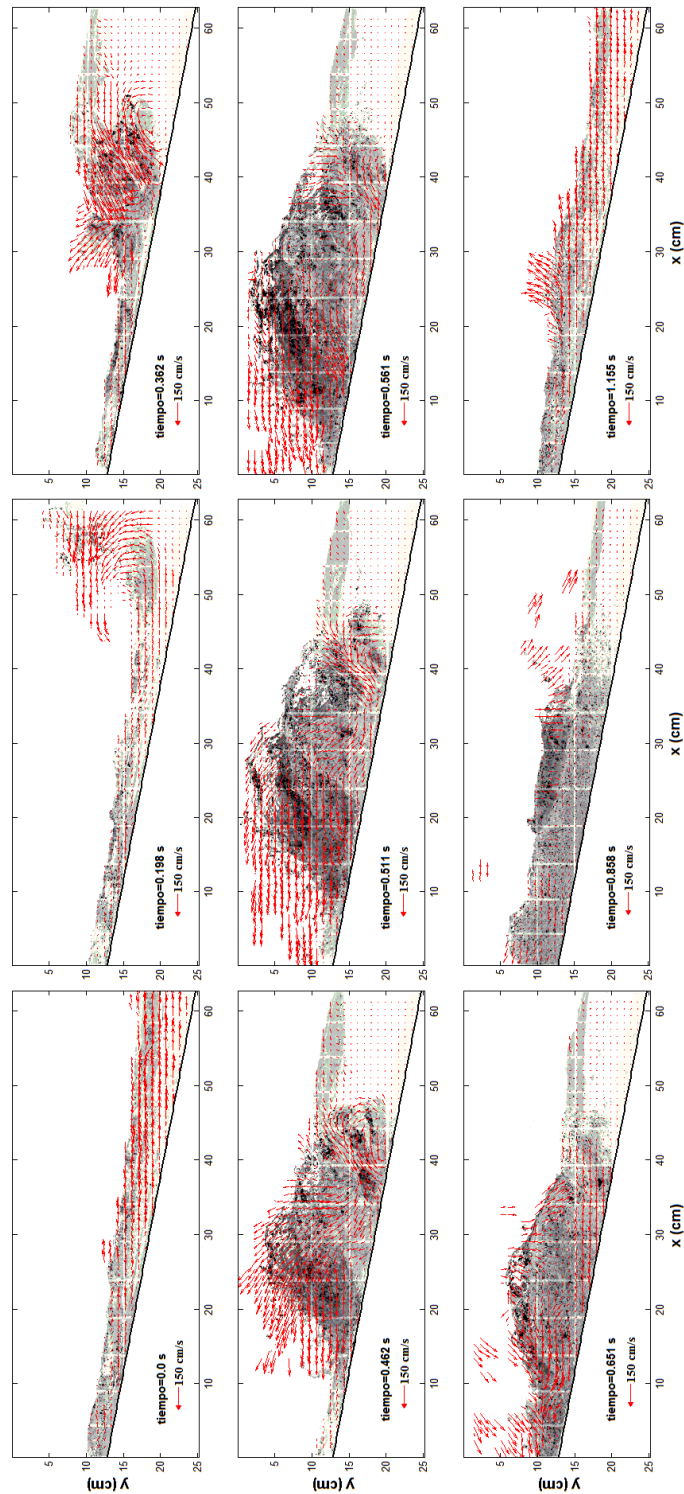


Figura A.17 Ejemplo de las imágenes procesadas con la técnica de inversión de color (H=14 cm; T=1.2 s).





**Figura A.18** Instantes de campos de velocidad obtenidos con la técnica (BIV), para la fase de rotura en voluta (H=14 cm; T=1.2 s).

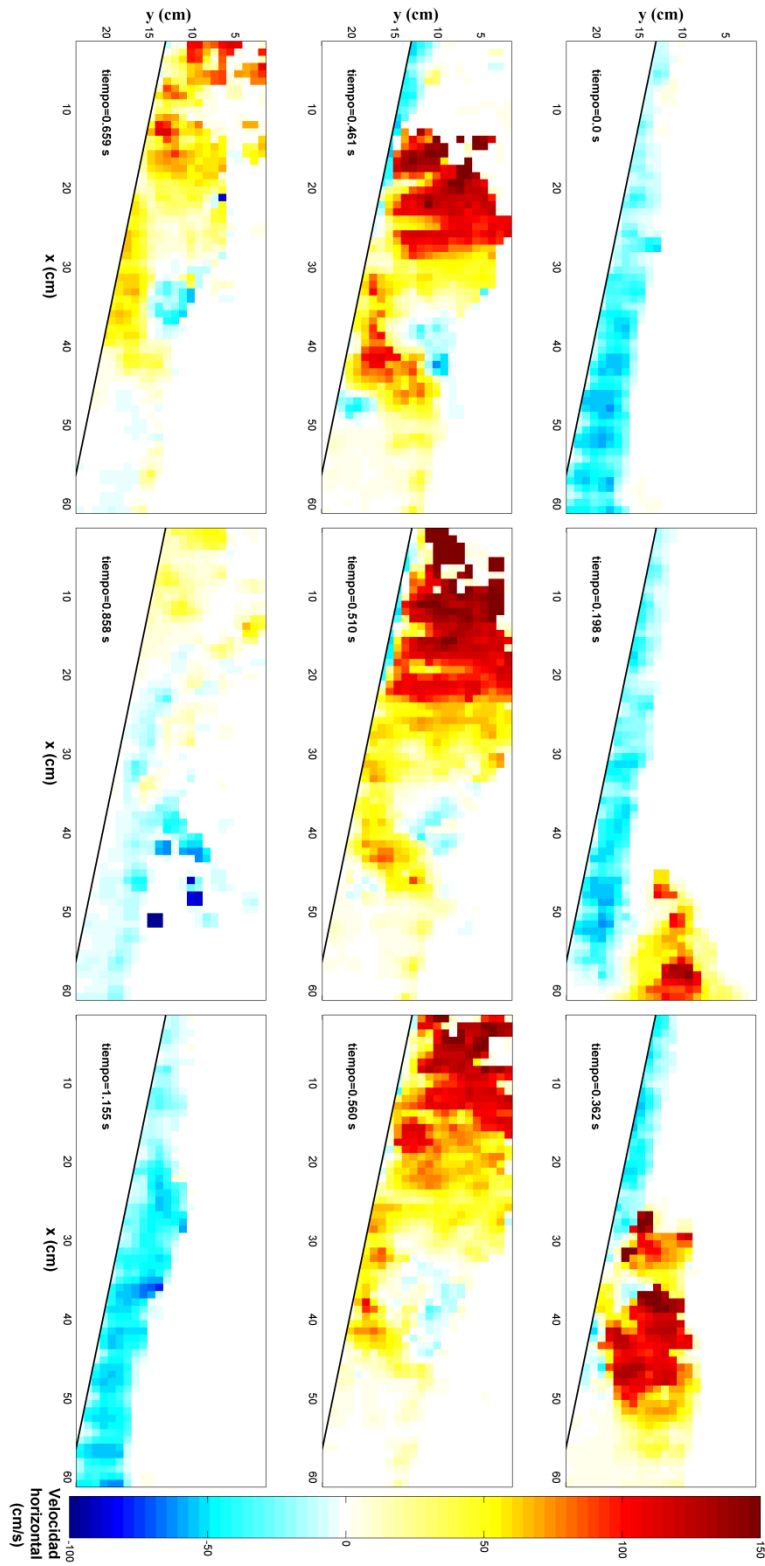
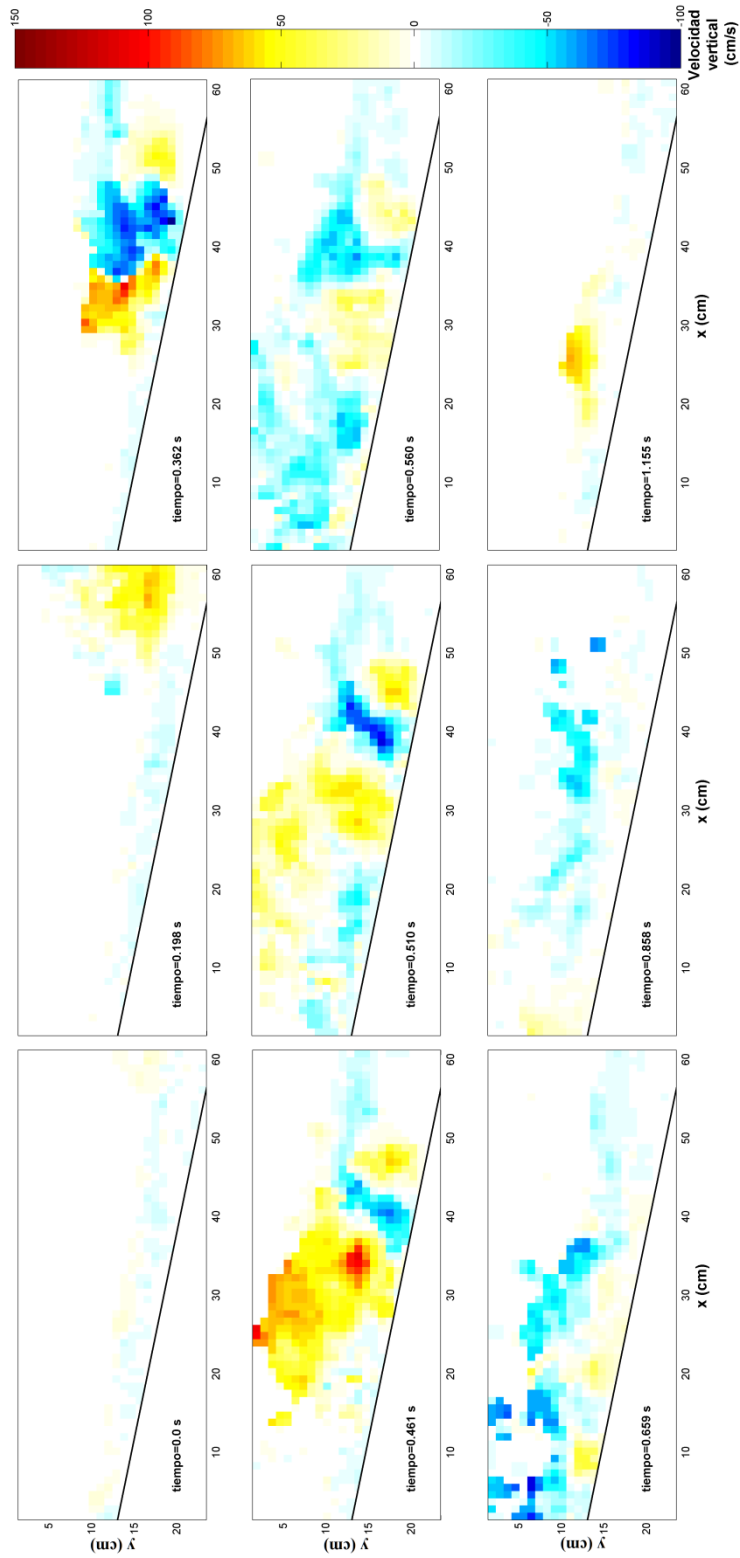


Figura A.19 Resultados de la componente horizontal de la velocidad (H=14cm; T=1.2s).



**Figura A.20.** Resultados de la componente vertical de la velocidad (H=14cm; T=1.2s).

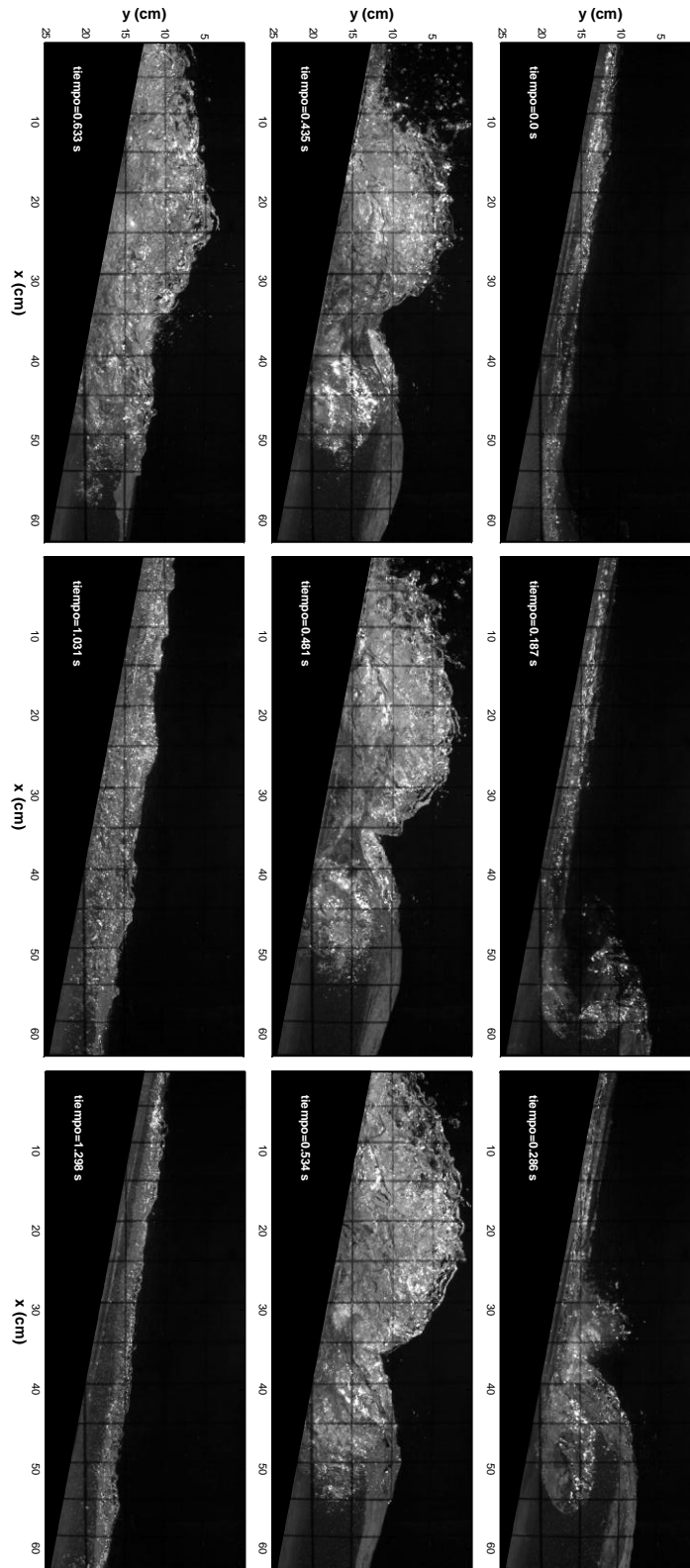
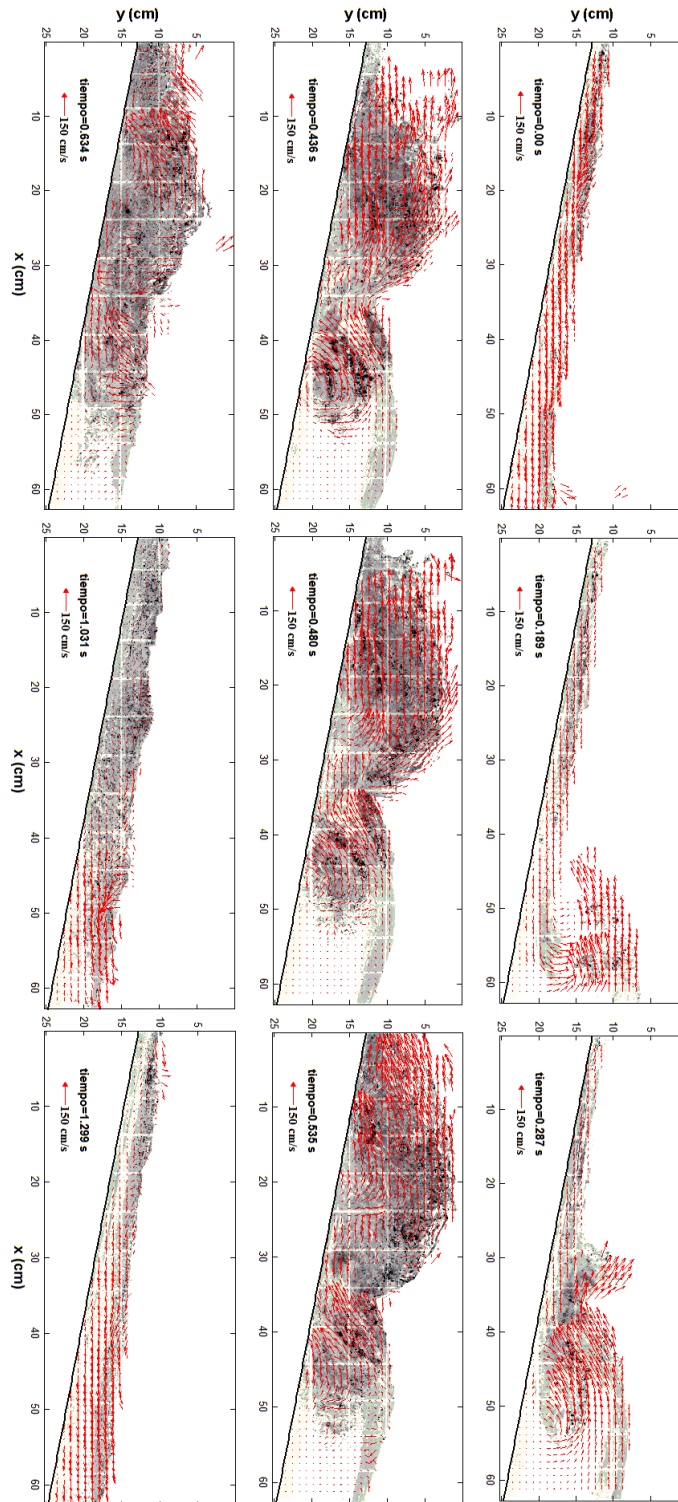


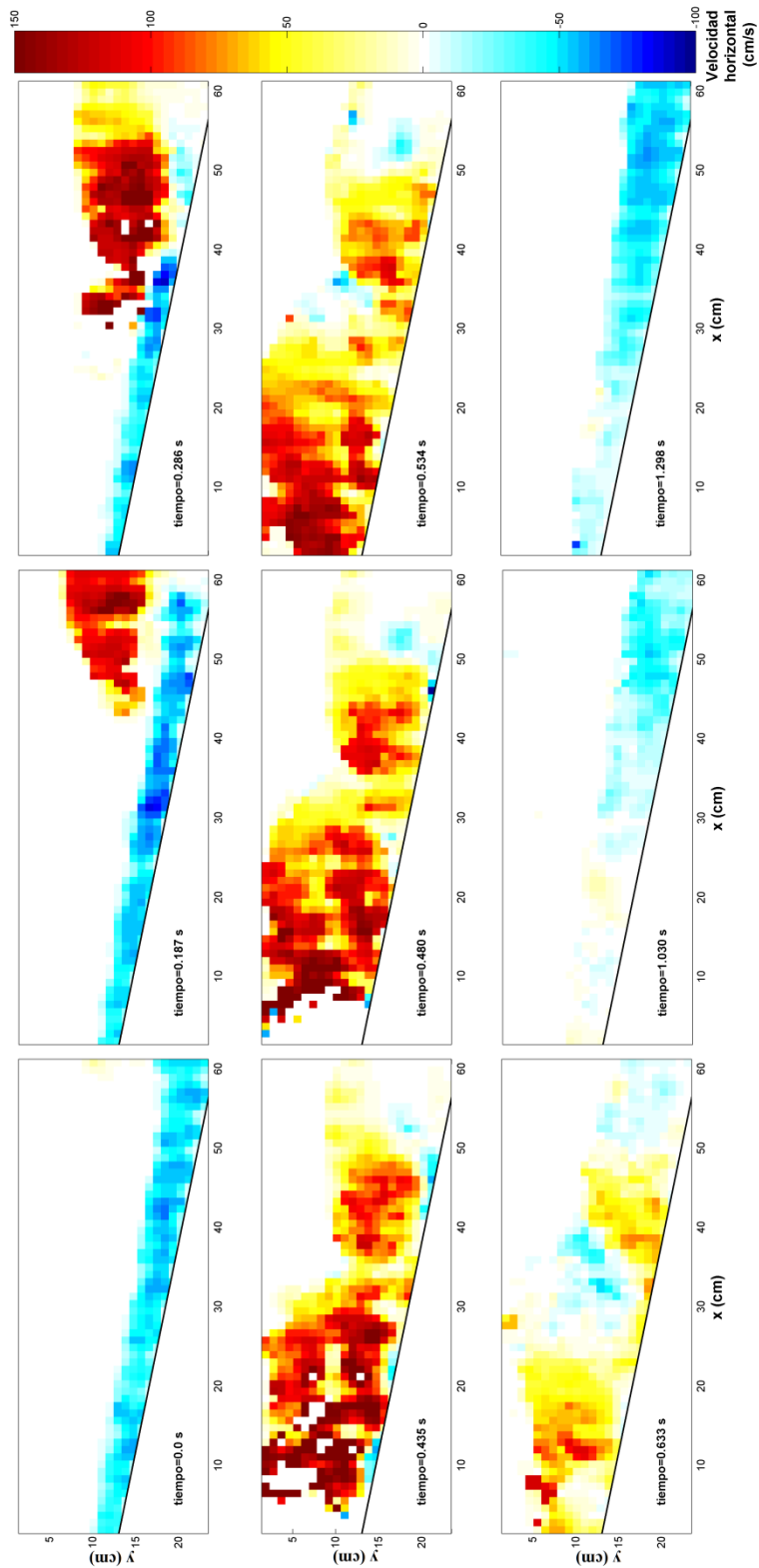
Figura A.21 Instantes no consecutivos de imágenes naturales para una ola en rotura (H=15cm, T=1.5s).



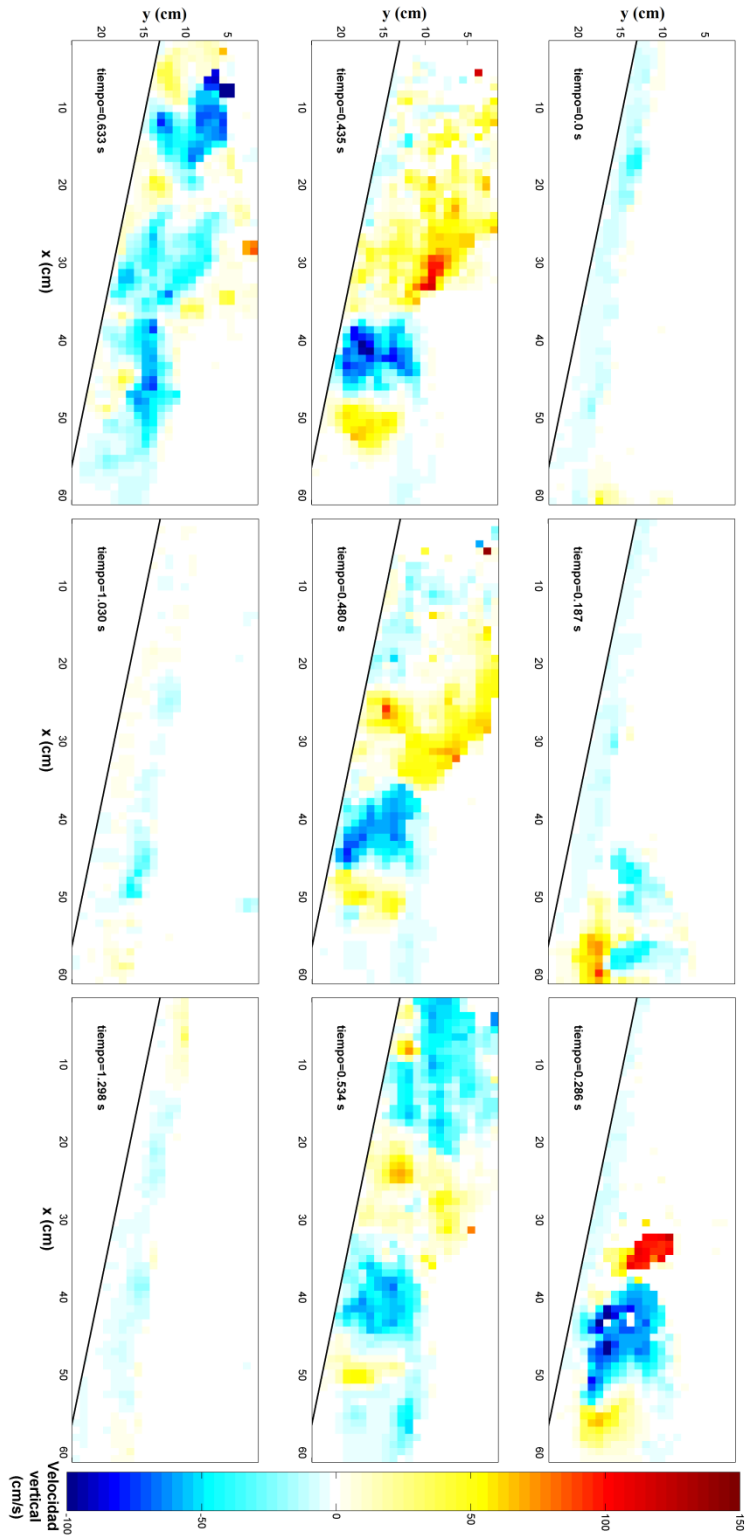
**Figura A.22** Ejemplo de las imágenes procesadas con la técnica de inversión de color (H=15 cm; T=1.5 s).



**Figura A.23** Instantes de campos de velocidad obtenidos con la técnica (BIV), para la fase de rotura en voluta (H=15 cm; T=1.5 s).

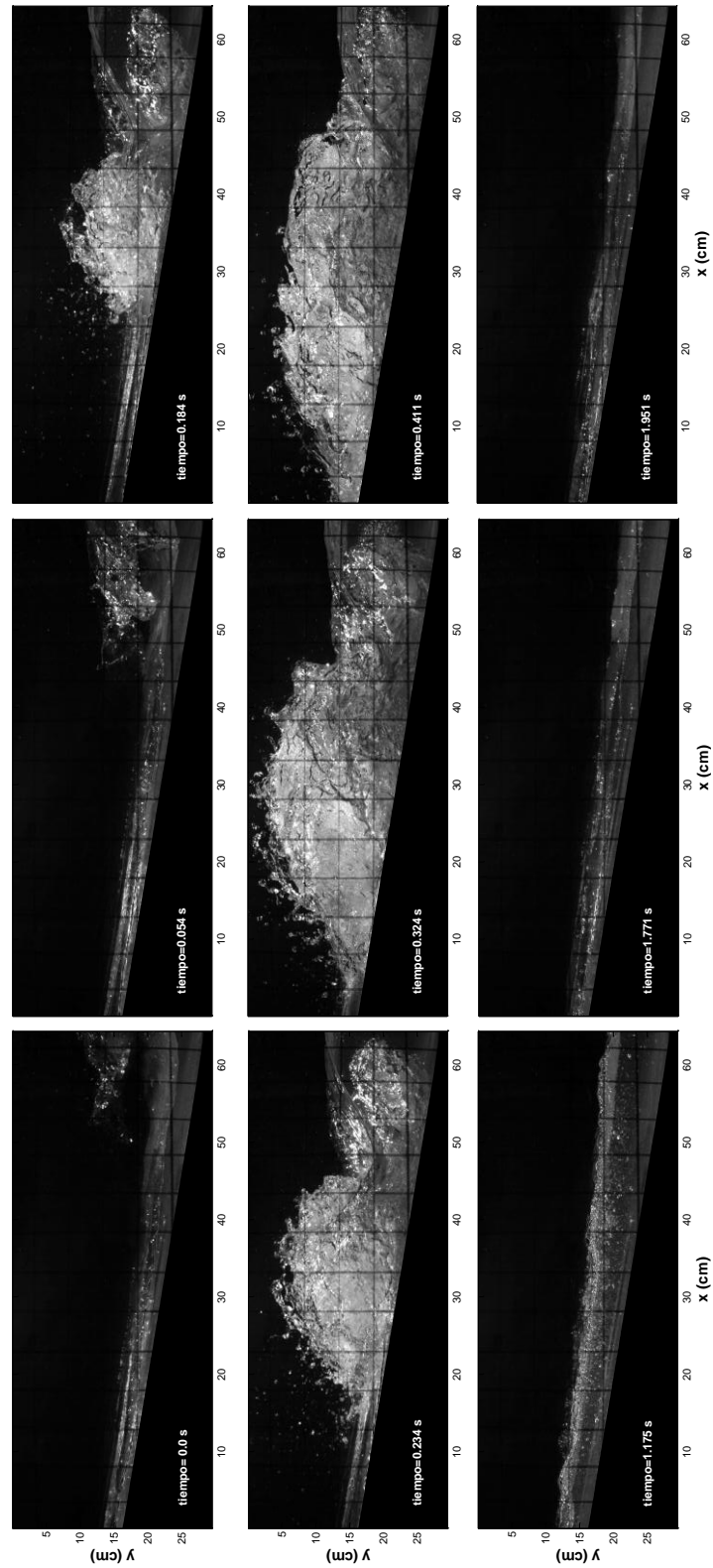


**Figura A.24** Resultados de la componente horizontal de la velocidad (H=15 cm; T=1.5 s).



**Figura A.25** Resultados de la componente vertical de la velocidad (H=15 cm; 1.5 s).





**Figura A.26** Instantes no consecutivos de imágenes naturales para una ola en rotura ( $H=15$  cm,  $T=2.0$  s).

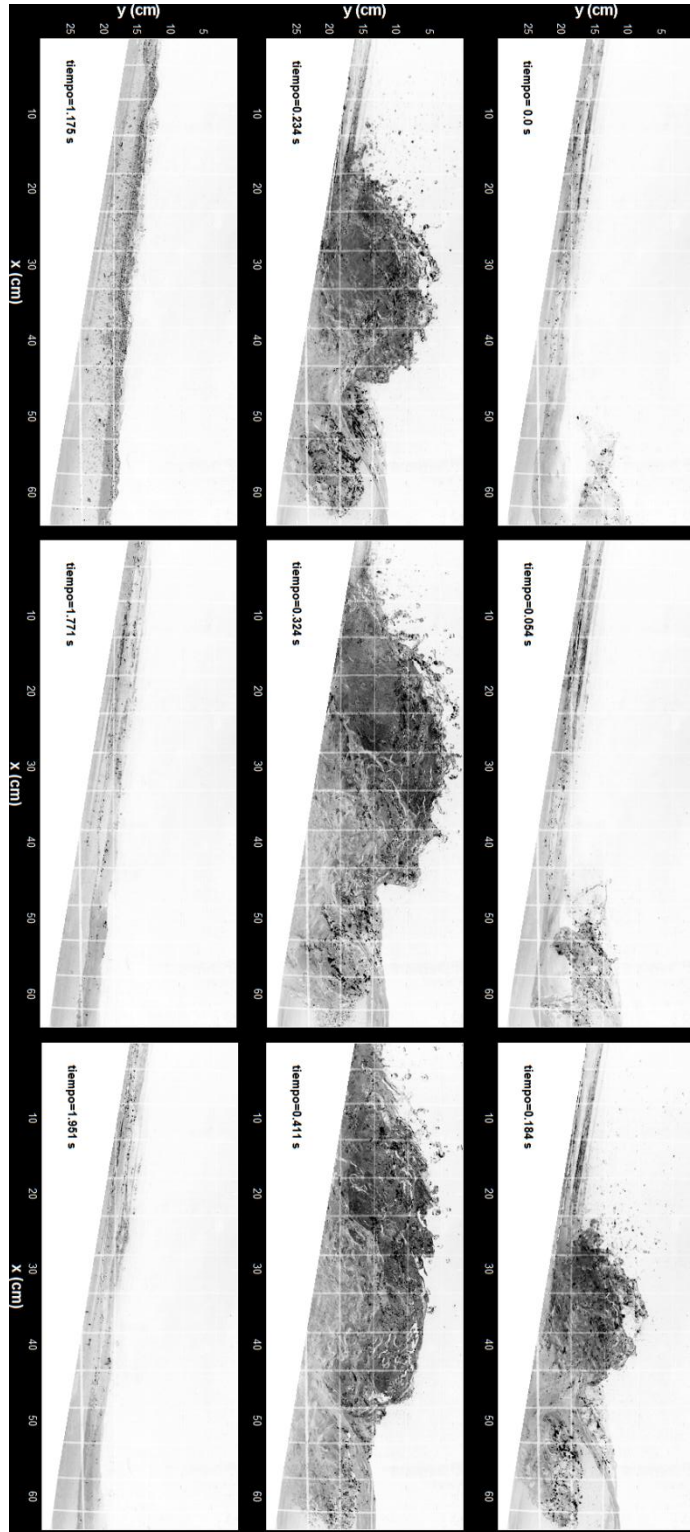
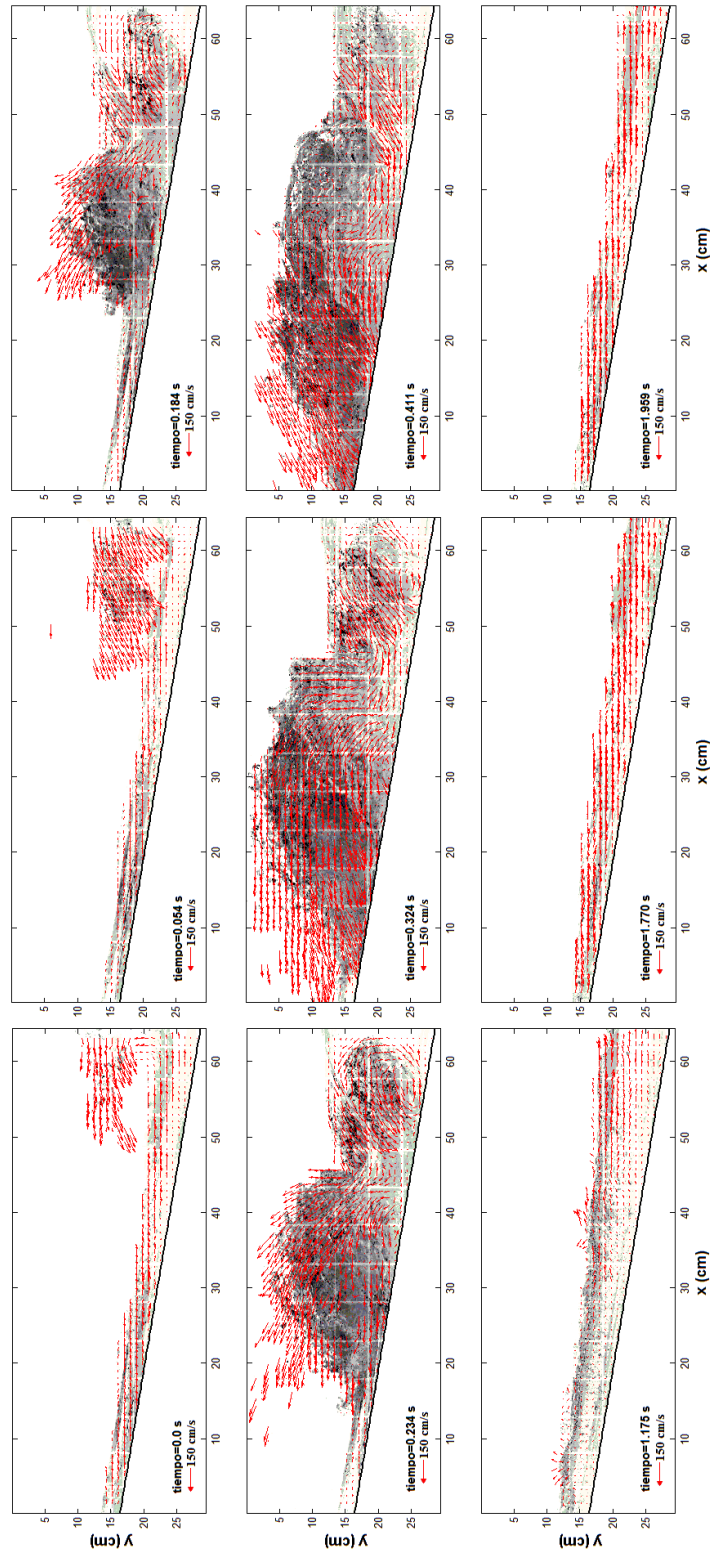


Figura A.27 Ejemplo de las imágenes procesadas con la técnica de inversión de color (H=15 cm; T=2.0 s).



**Figura A.28** Instantes de campos de velocidad obtenidos con la técnica (BIV), para la fase de rotura en voluta (H=15 cm; T=2.0 s).

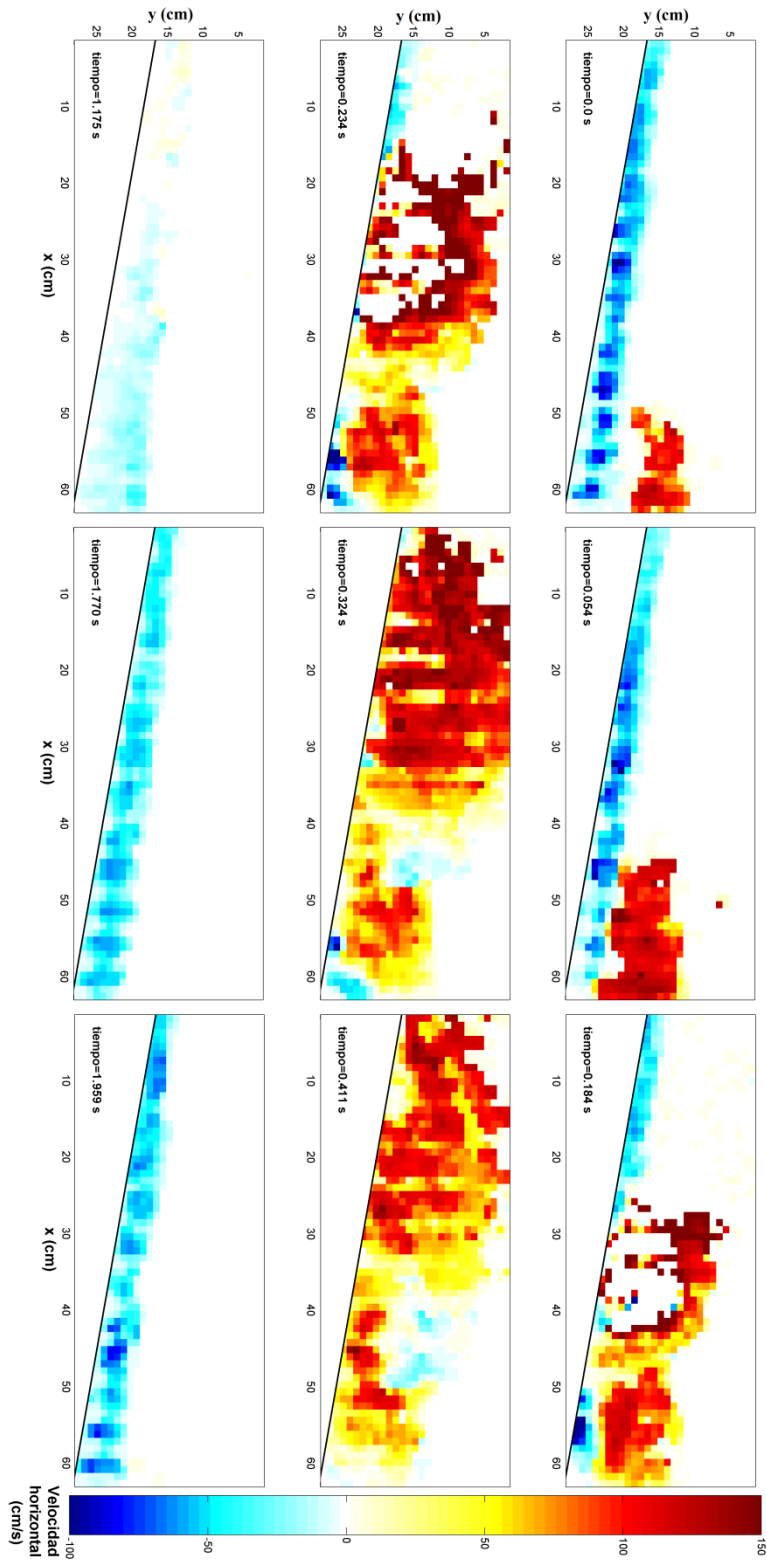
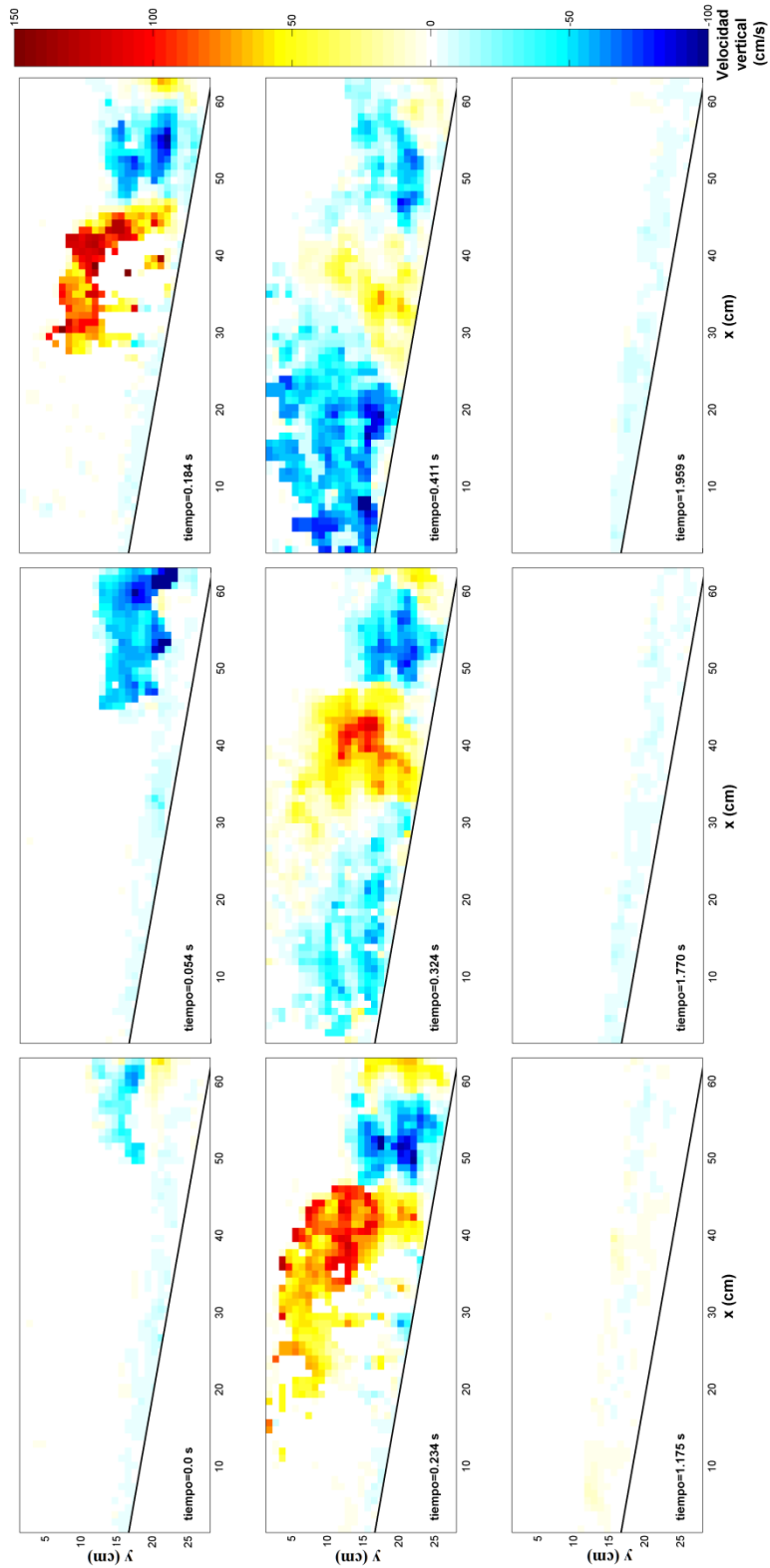
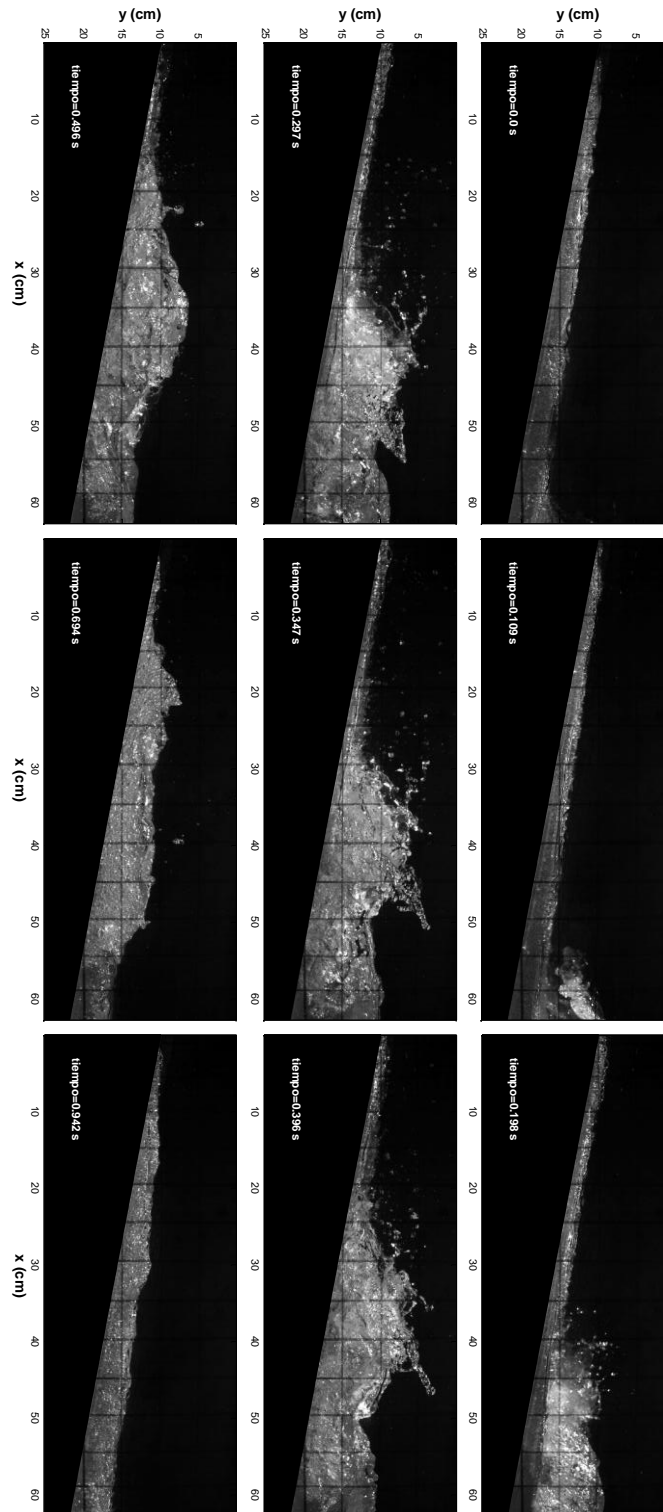


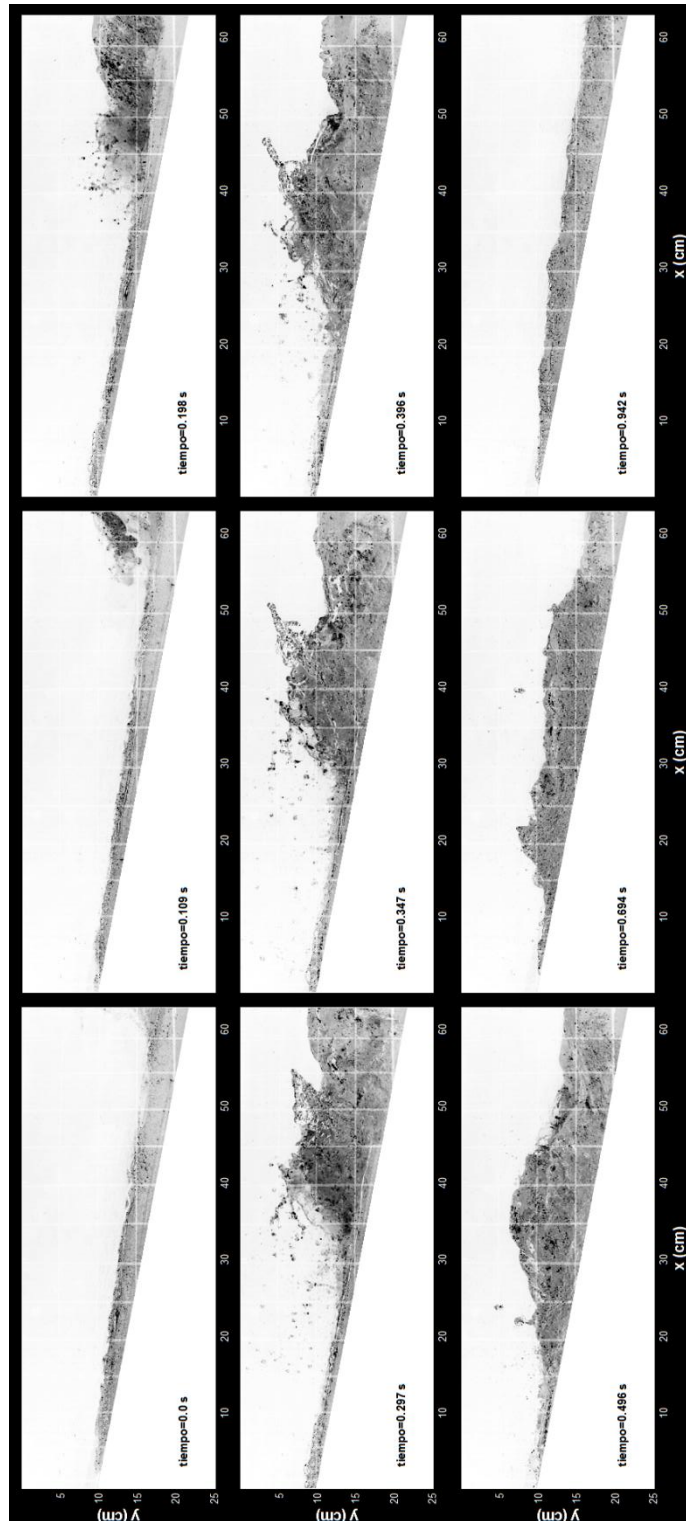
Figura A.29 Resultados de la componente horizontal de la velocidad (H=15 cm; T=2.0 s).



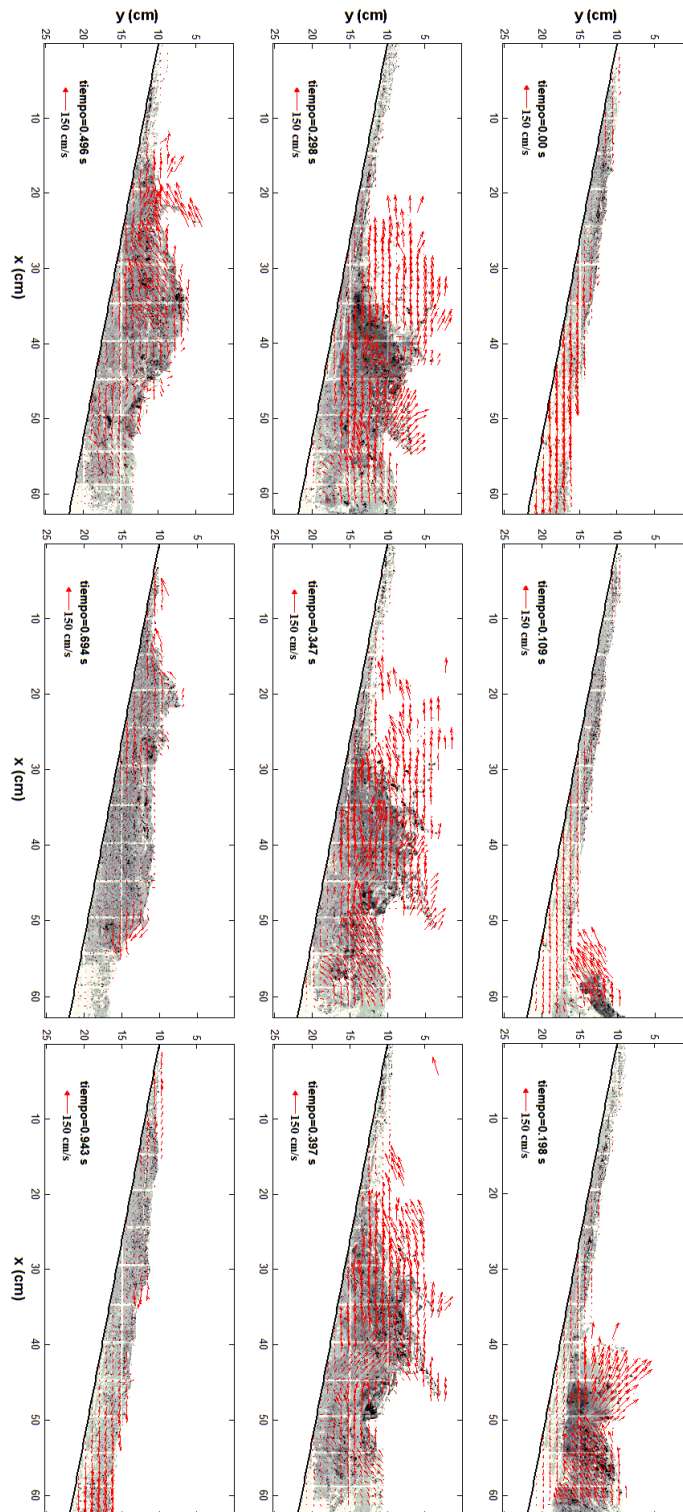
**Figura A.30** Resultados de la componente vertical de la velocidad (H=15 cm; T=2.0 s).



**Figura A.31** Instantes no consecutivos de imágenes naturales para una ola en rotura (H=16 cm, T=1.0 s).

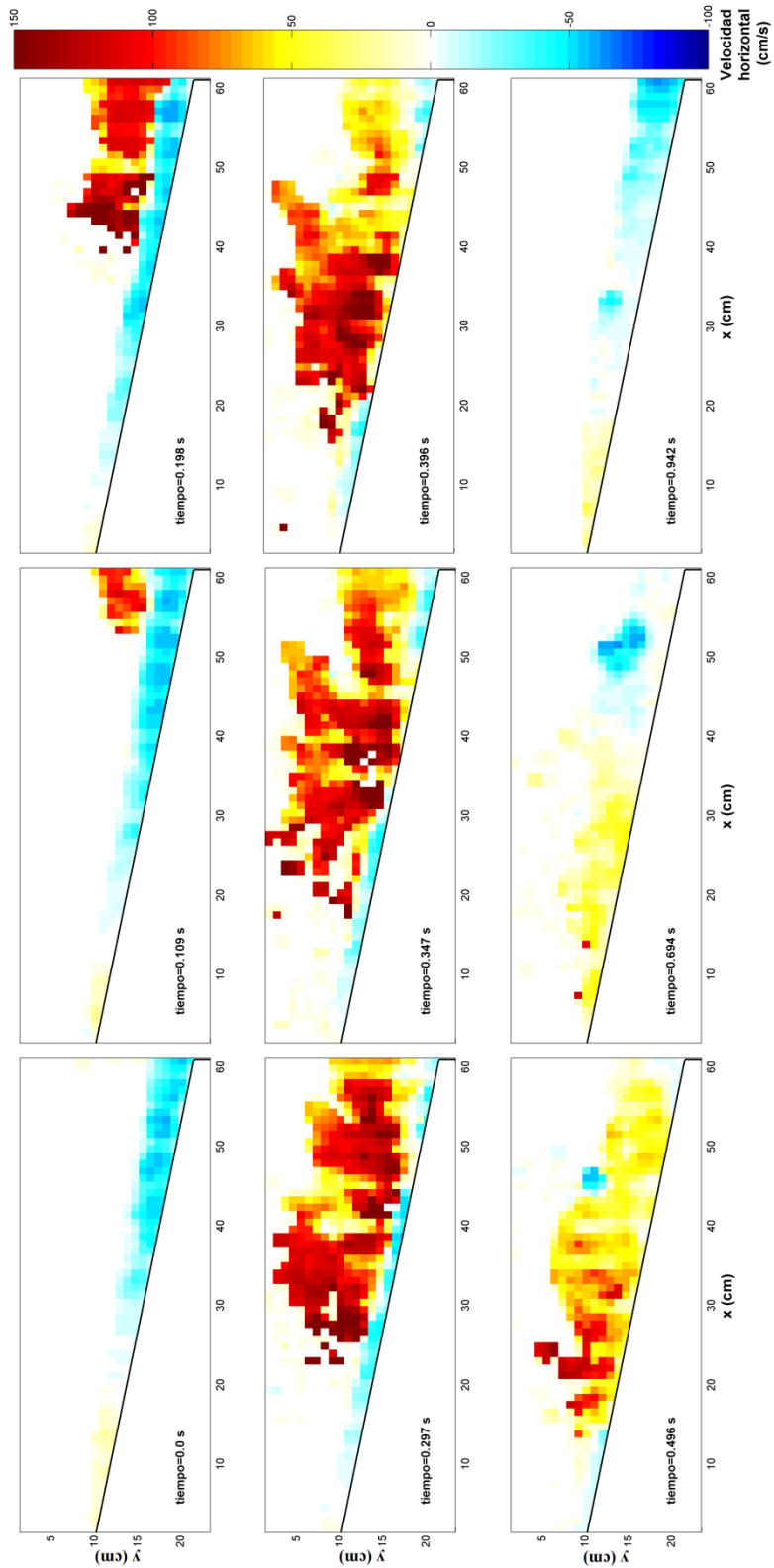


**Figura A.32** Ejemplo de las imágenes procesadas con la técnica de inversión de color (H=16 cm; T=1.0 s).

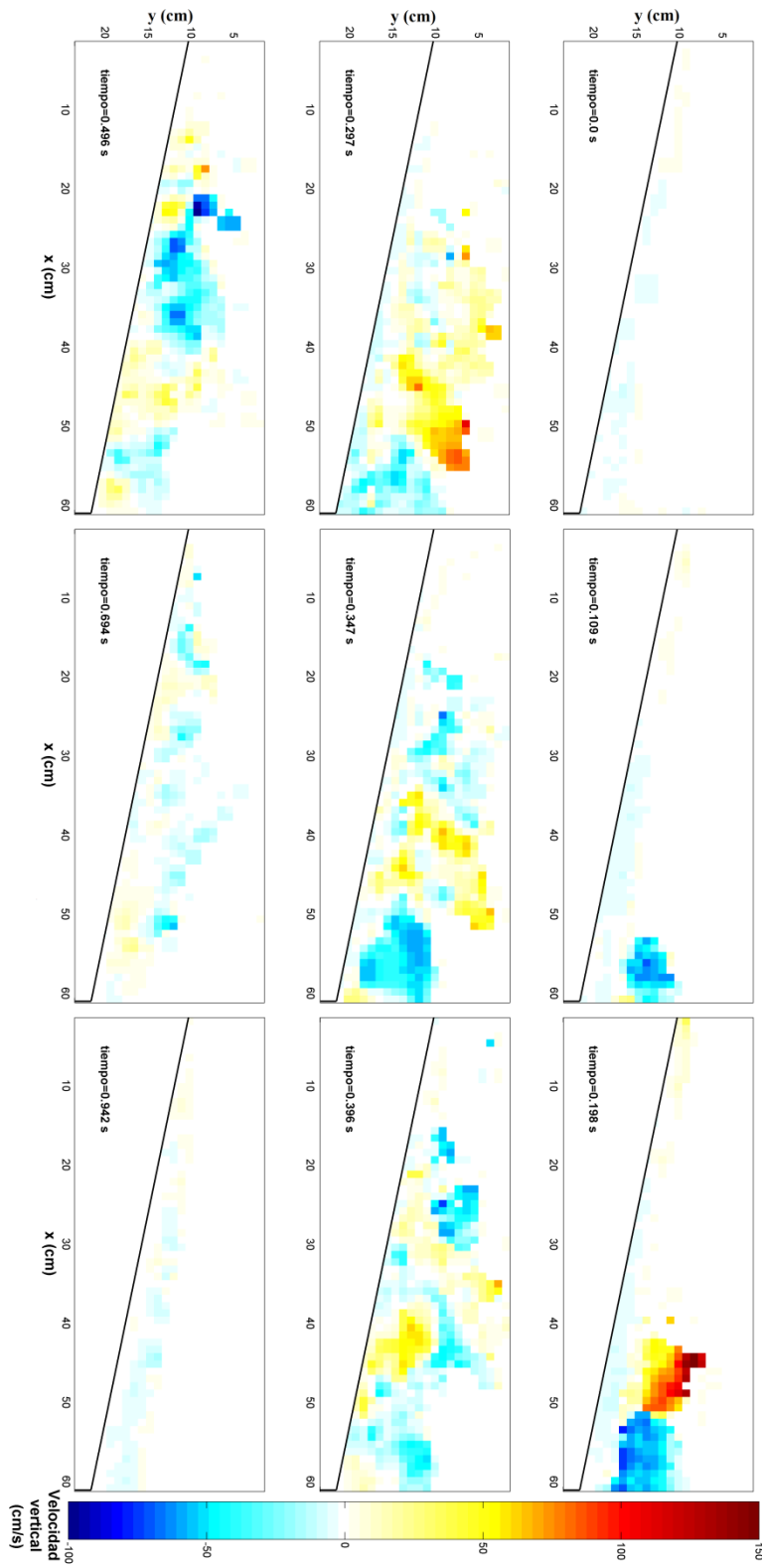


**Figura A.33** Instantes de campos de velocidad obtenidos con la técnica (BIV), para la fase de rotura en voluta (H=16 cm; T=1.0 s).

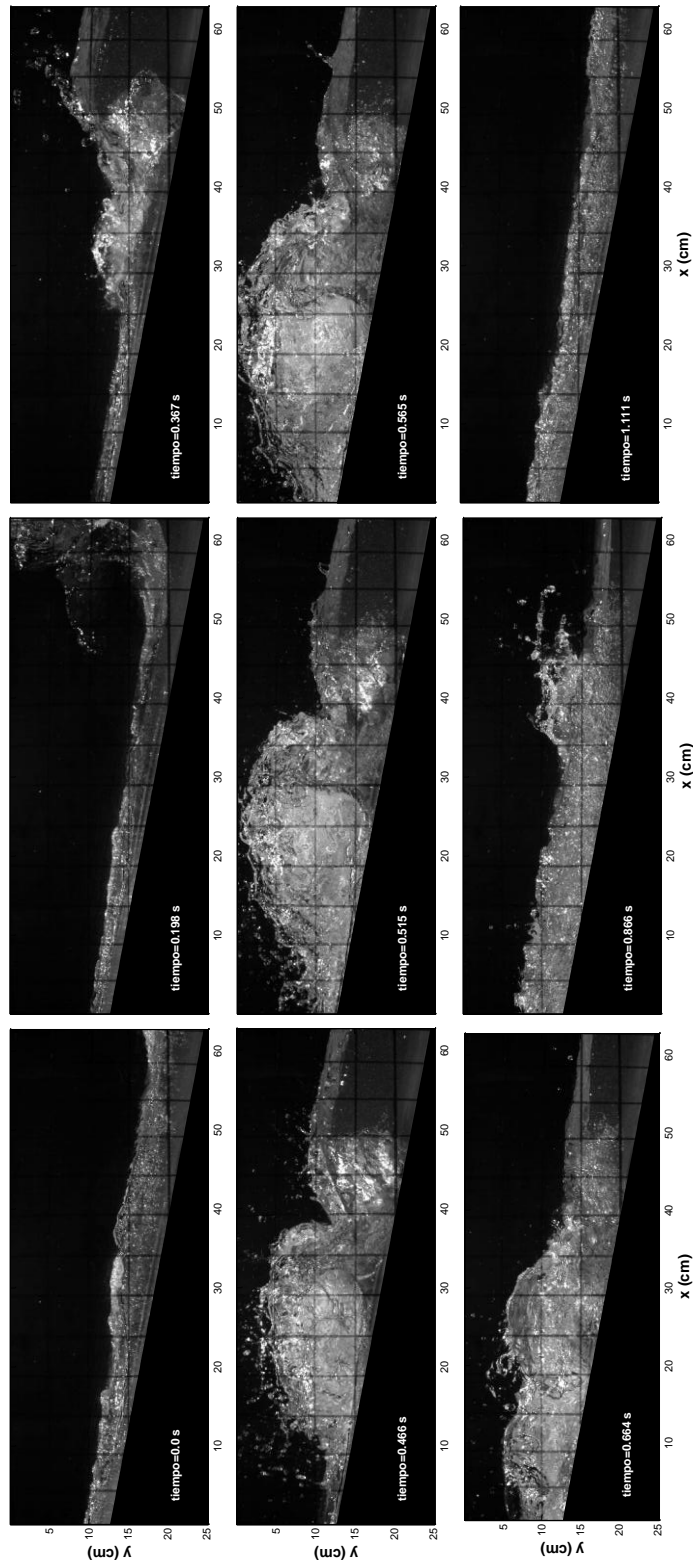




**Figura A.34** Resultados de la componente horizontal de la velocidad (H=16 cm; T=1.0 s).



**Figura A.35** Resultados de la componente vertical de la velocidad (H=16 cm; T=1.0 s).



**Figura A.36** Instantes no consecutivos de imágenes naturales para una ola en rotura (H=16 cm, T=1.2 s).

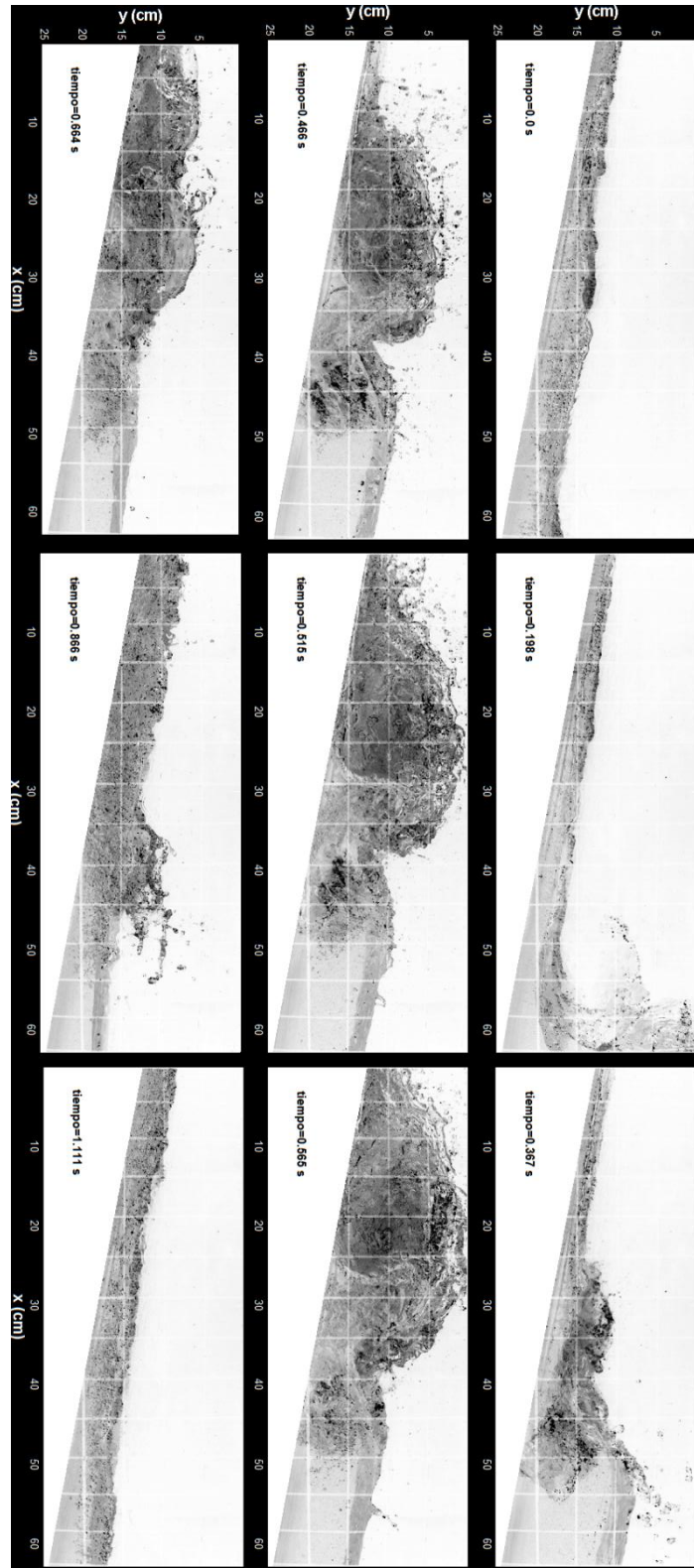
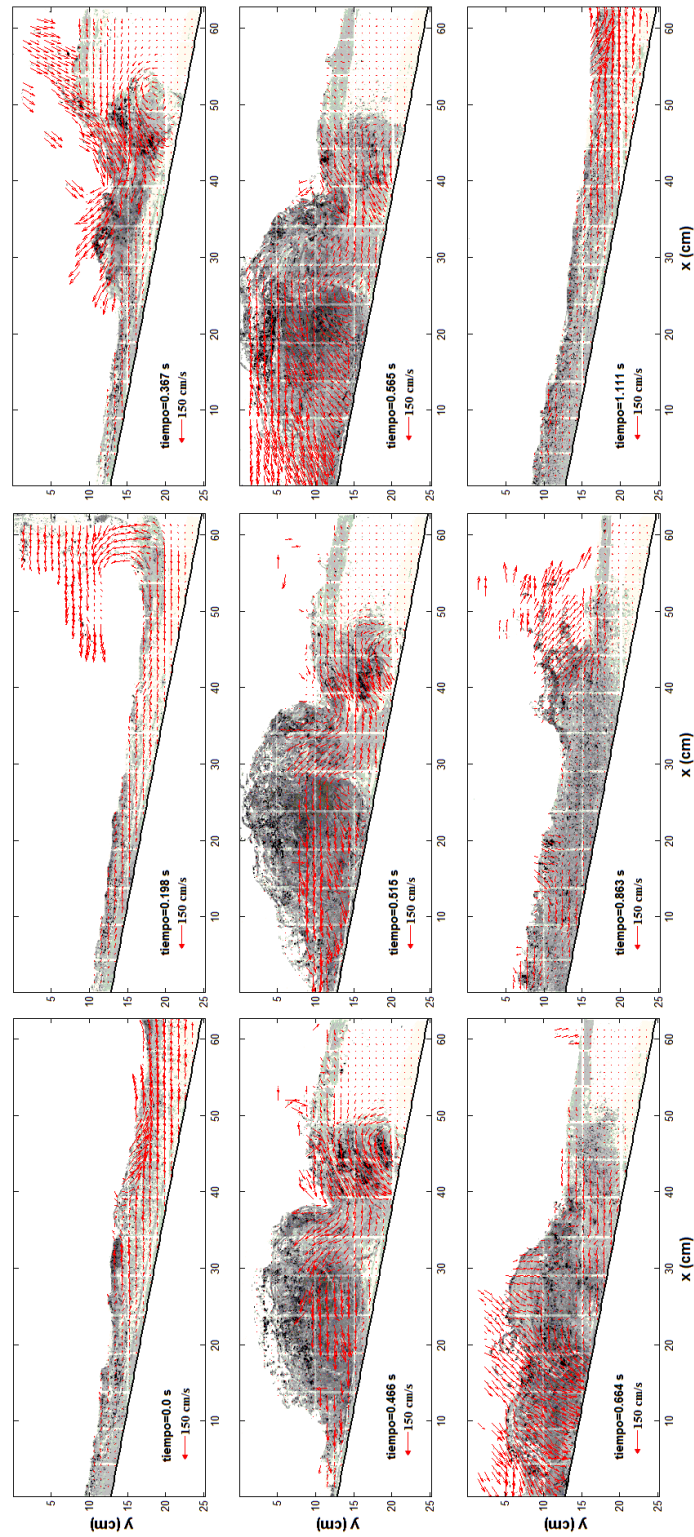


Figura A.37 Ejemplo de las imágenes procesadas con la técnica de inversión de color (H=16 cm; T=1.2 s).



**Figura A.38** Instantes de campos de velocidad obtenidos con la técnica (BIV), para la fase de rotura en voluta ( $H=16\text{ cm}$ ;  $T=1.2\text{ s}$ ).

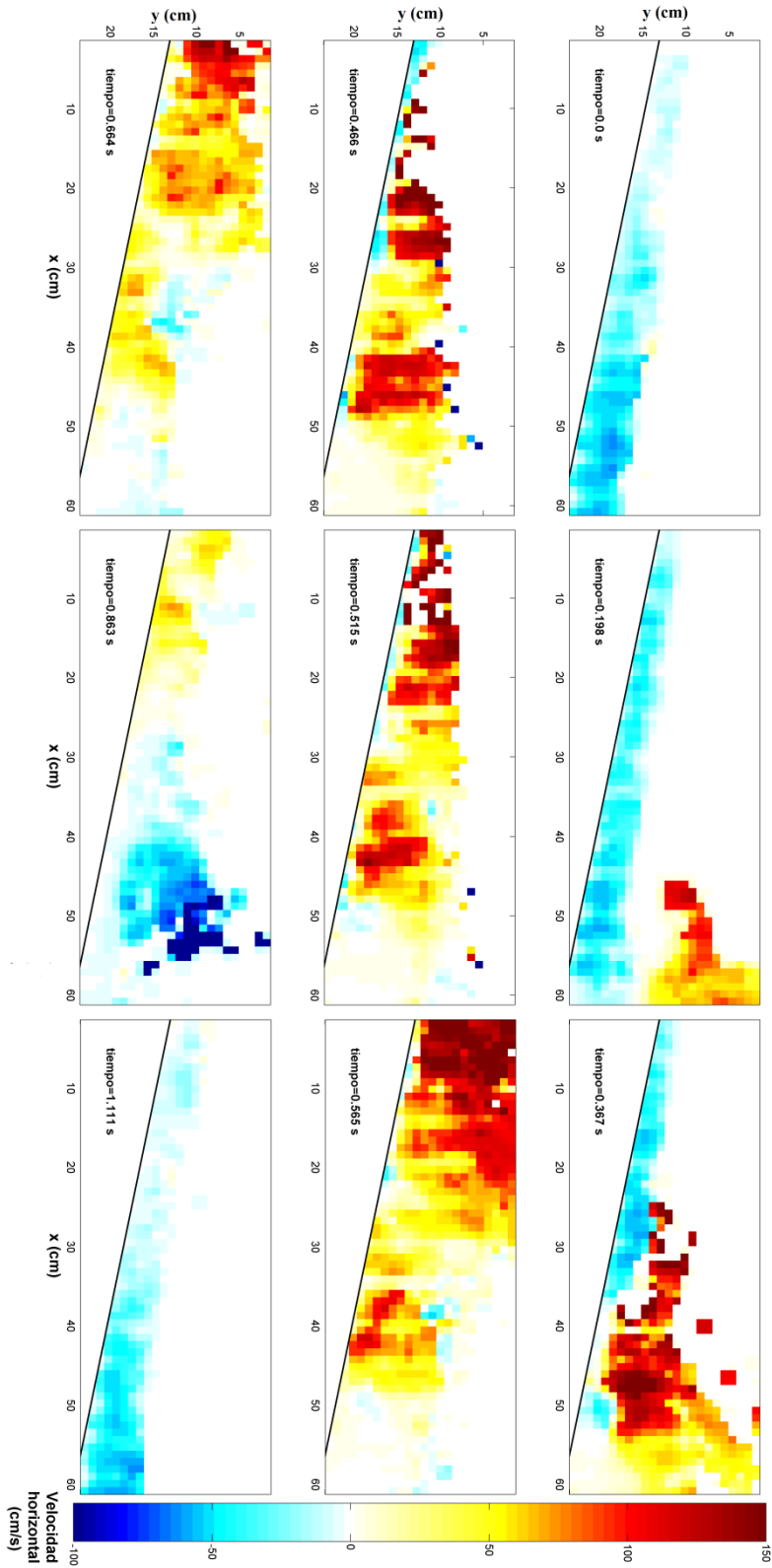
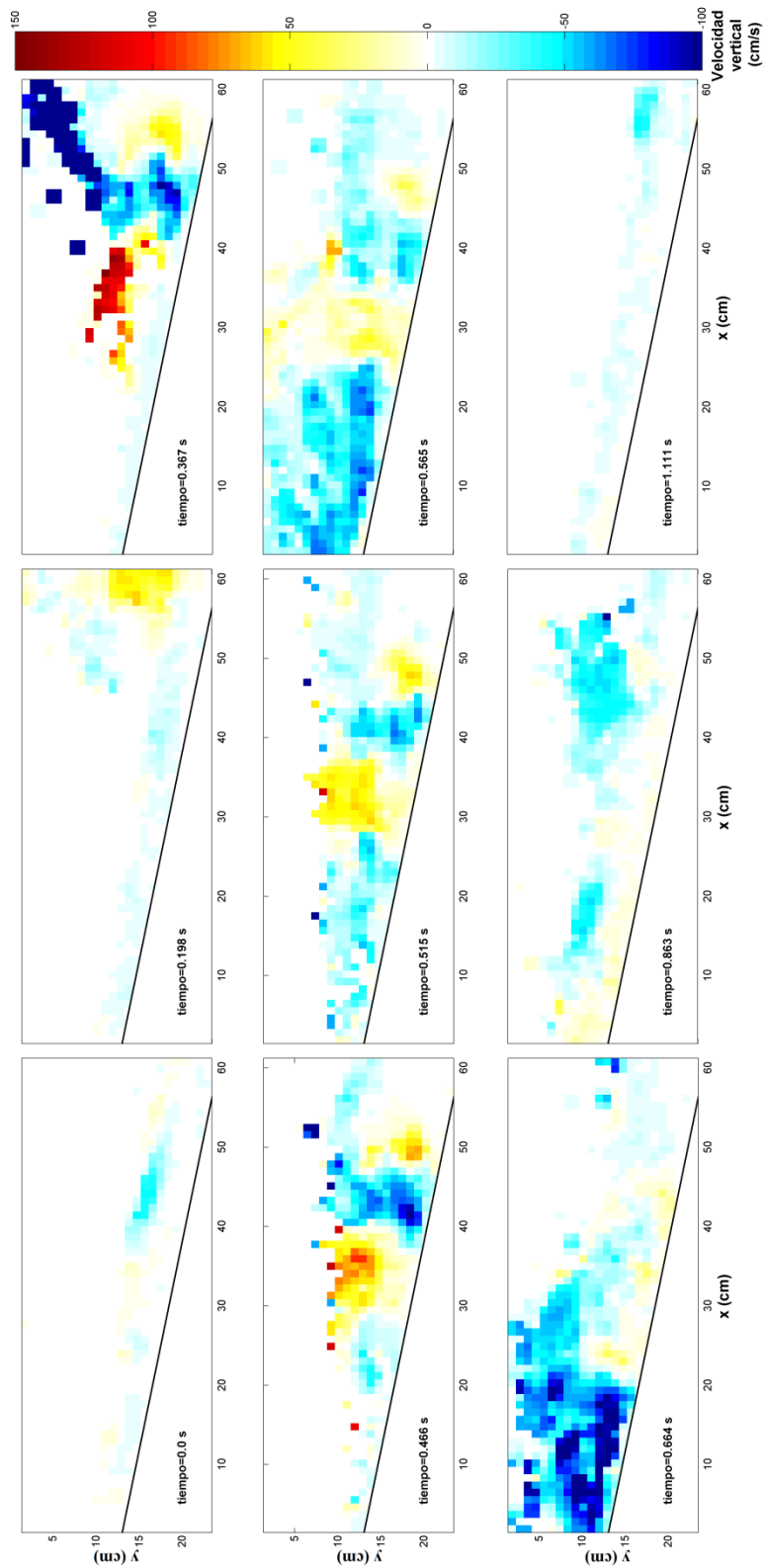
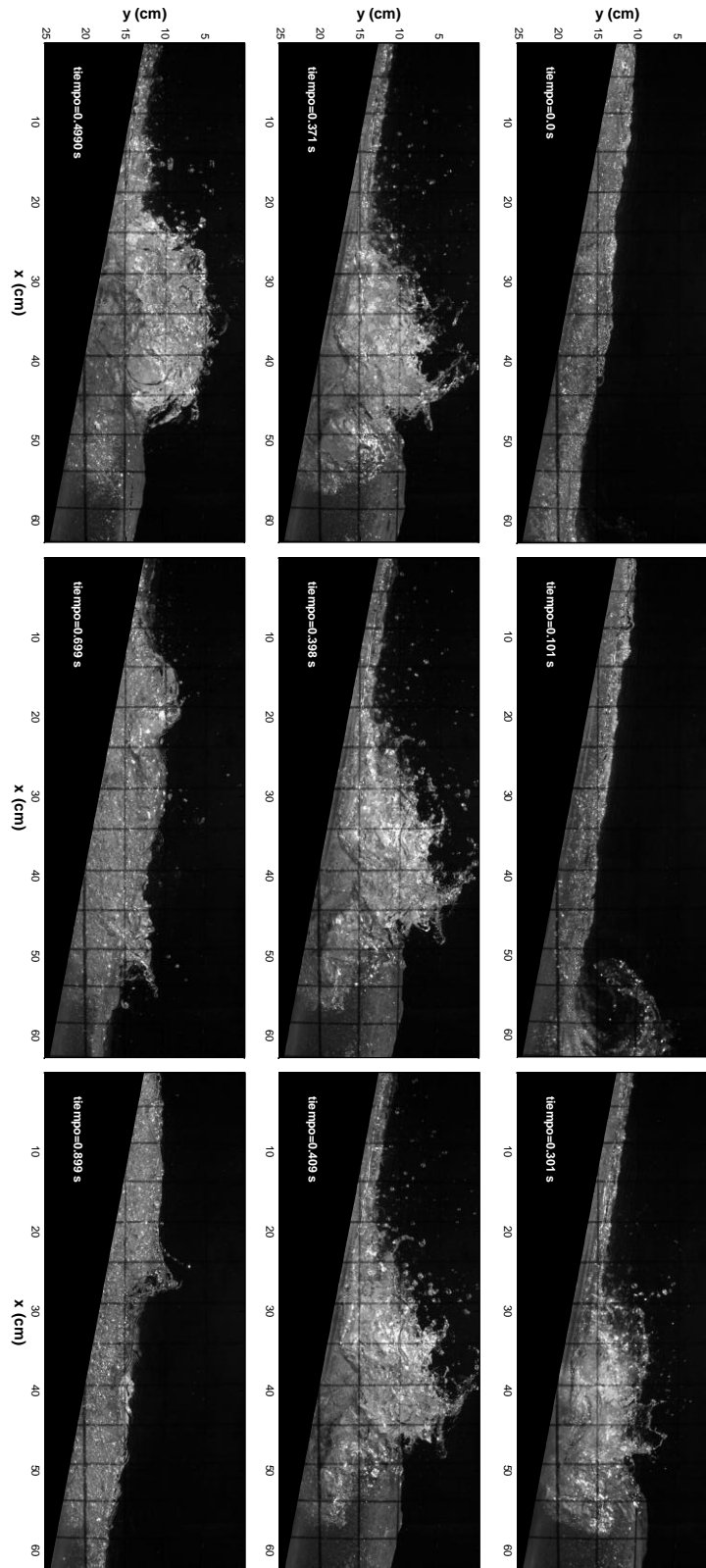


Figura A.39 Resultados de la componente horizontal de la velocidad (H=16 cm; T=1.2 s).

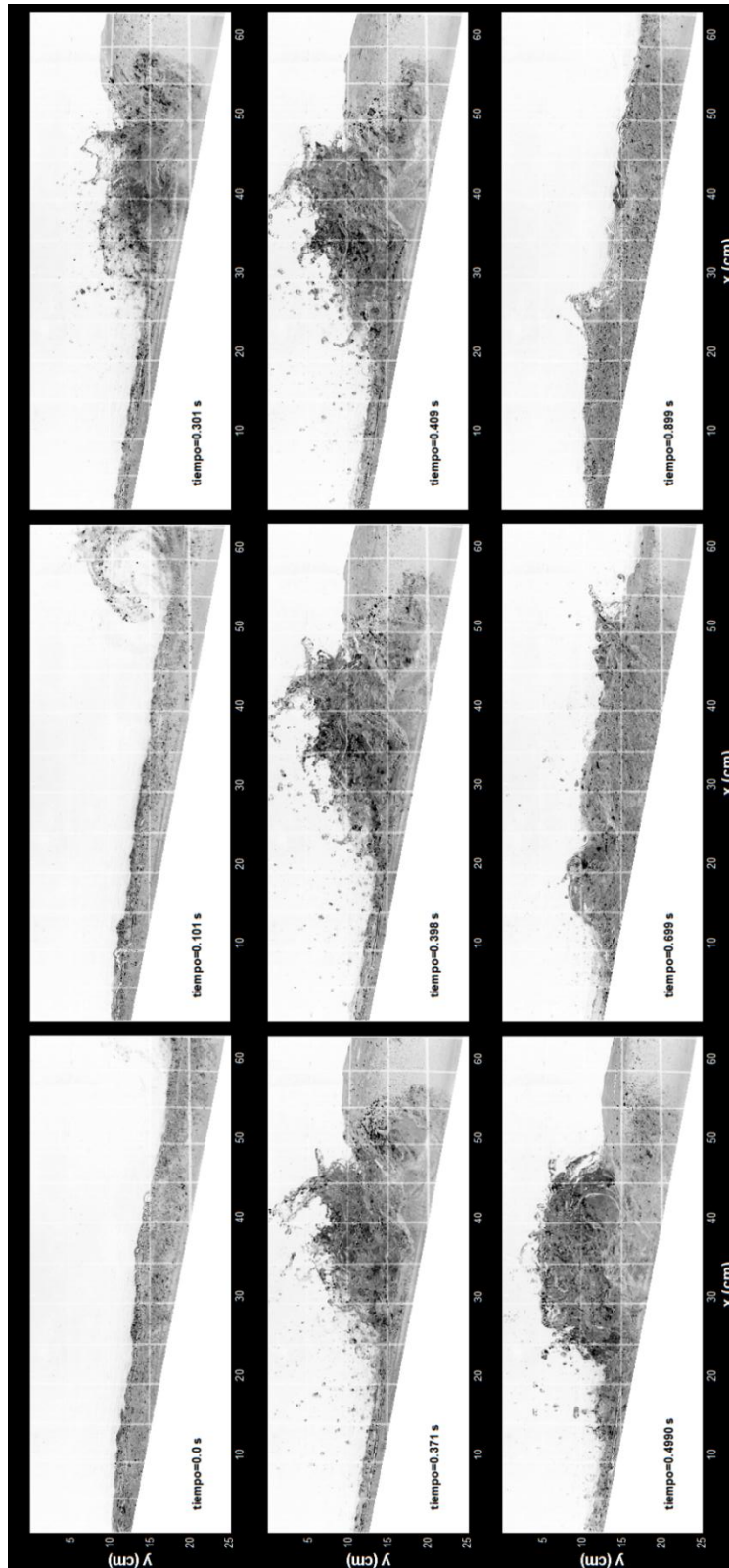


**Figura A.40** Resultados de la componente vertical de la velocidad (H=16 cm; T=1.2 s).

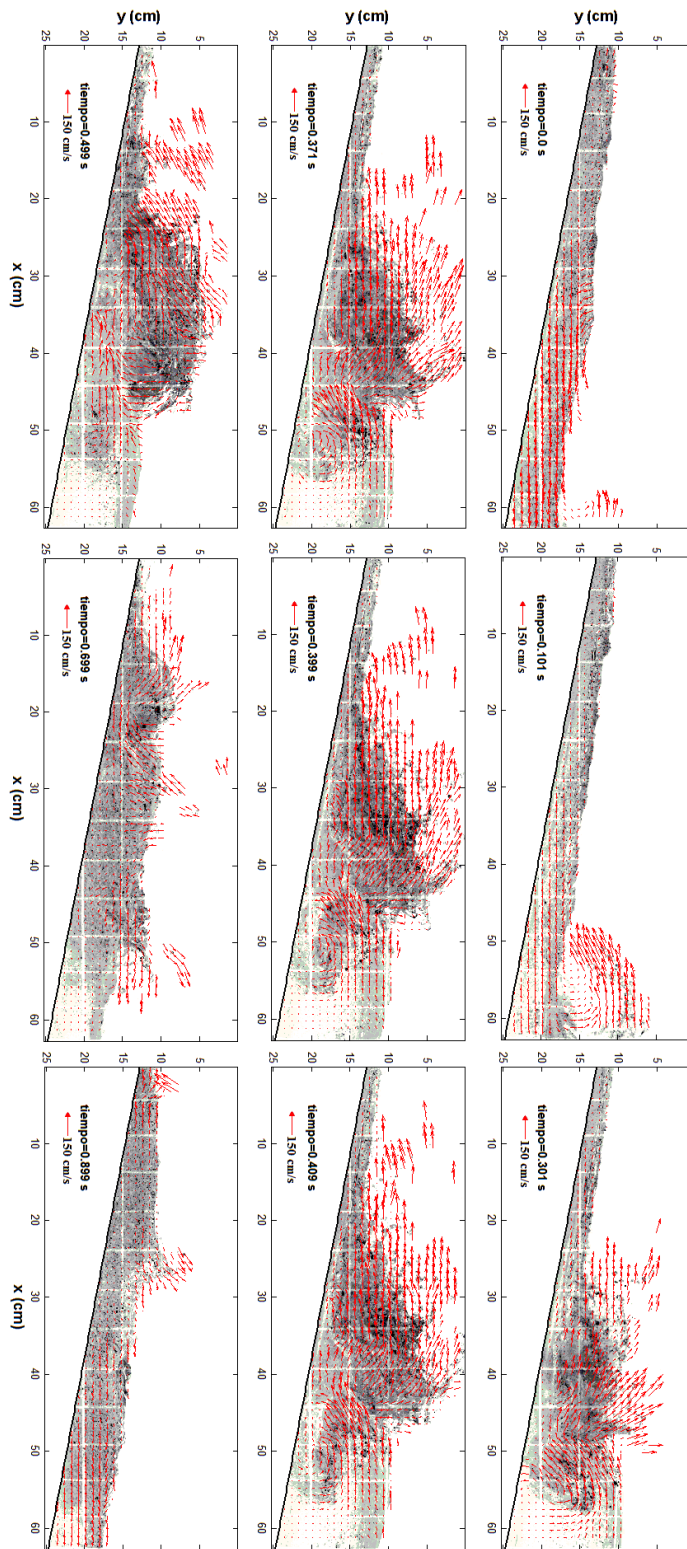


**Figura A.41** Instantes no consecutivos de imágenes naturales para una ola en rotura (H=17 cm, T=1.0 s).

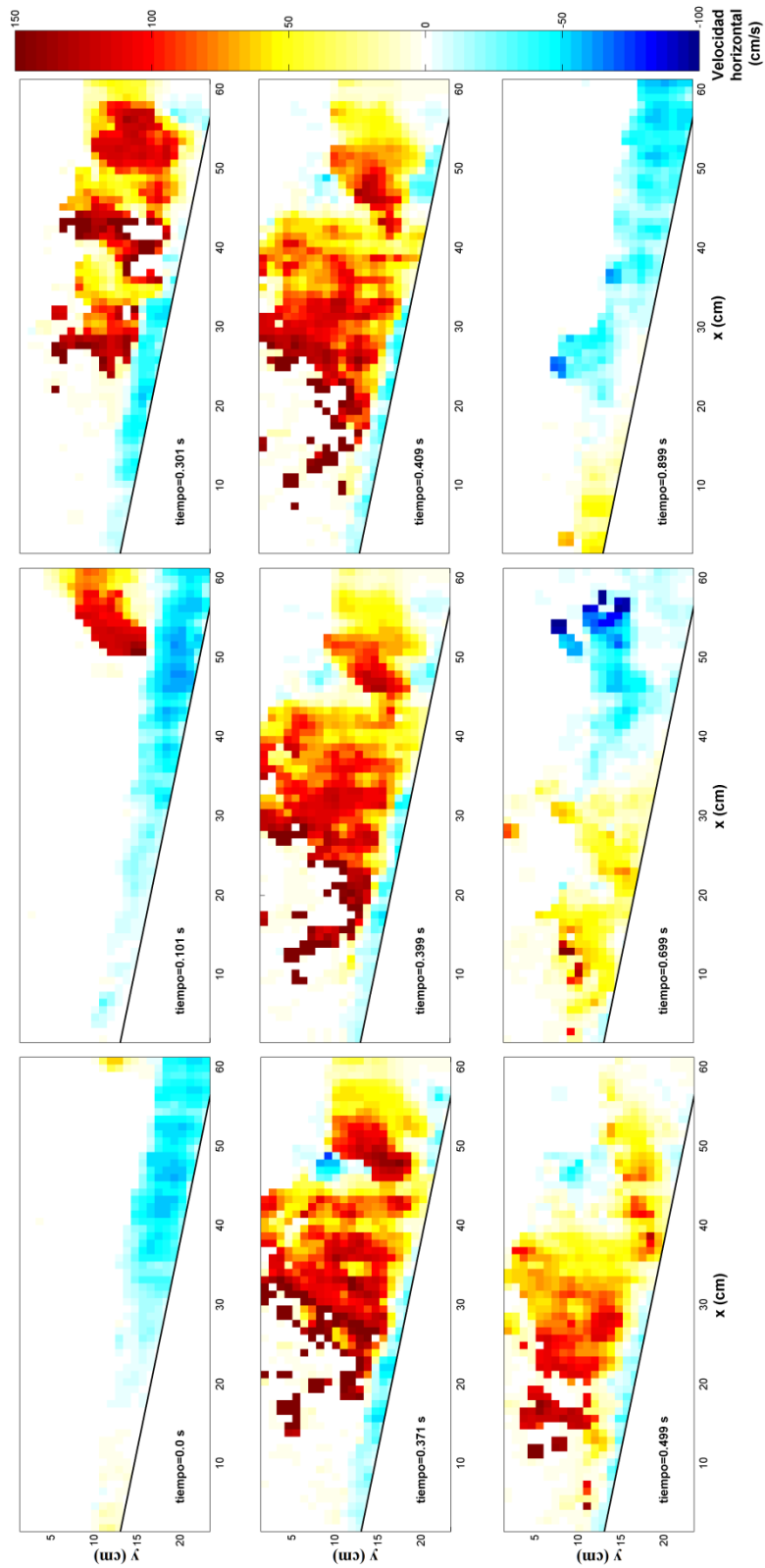




**Figura A.42** Ejemplo de las imágenes procesadas con la técnica de inversión de color (H=17 cm; T=1.0 s).



**Figura A.43** Instantes de campos de velocidad obtenidos con la técnica (BIV), para la fase de rotura en voluta (H=17cm; T=1.0 s).



**Figura A.44** Resultados de la componente horizontal de la velocidad (H=17 cm; T=1.0 s).

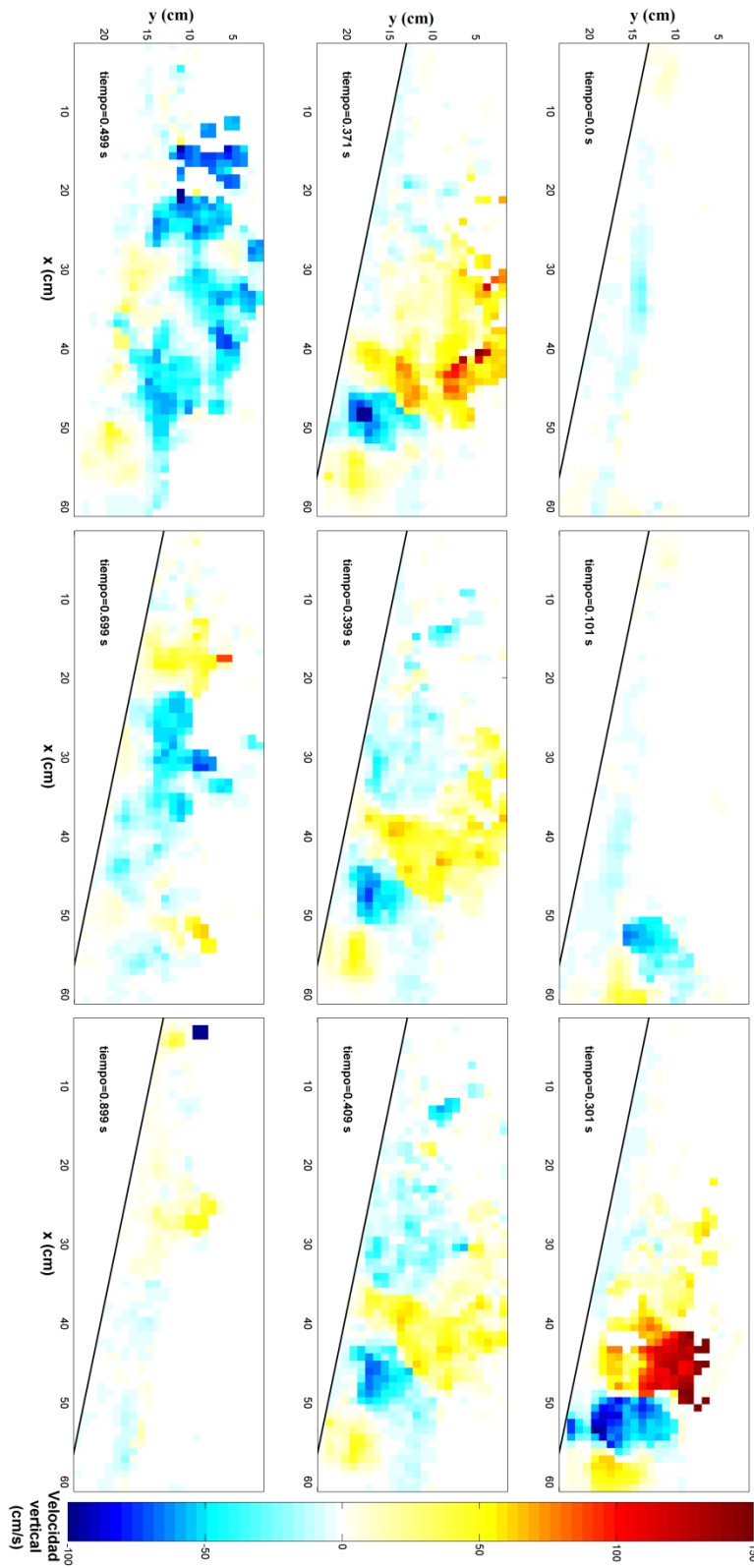
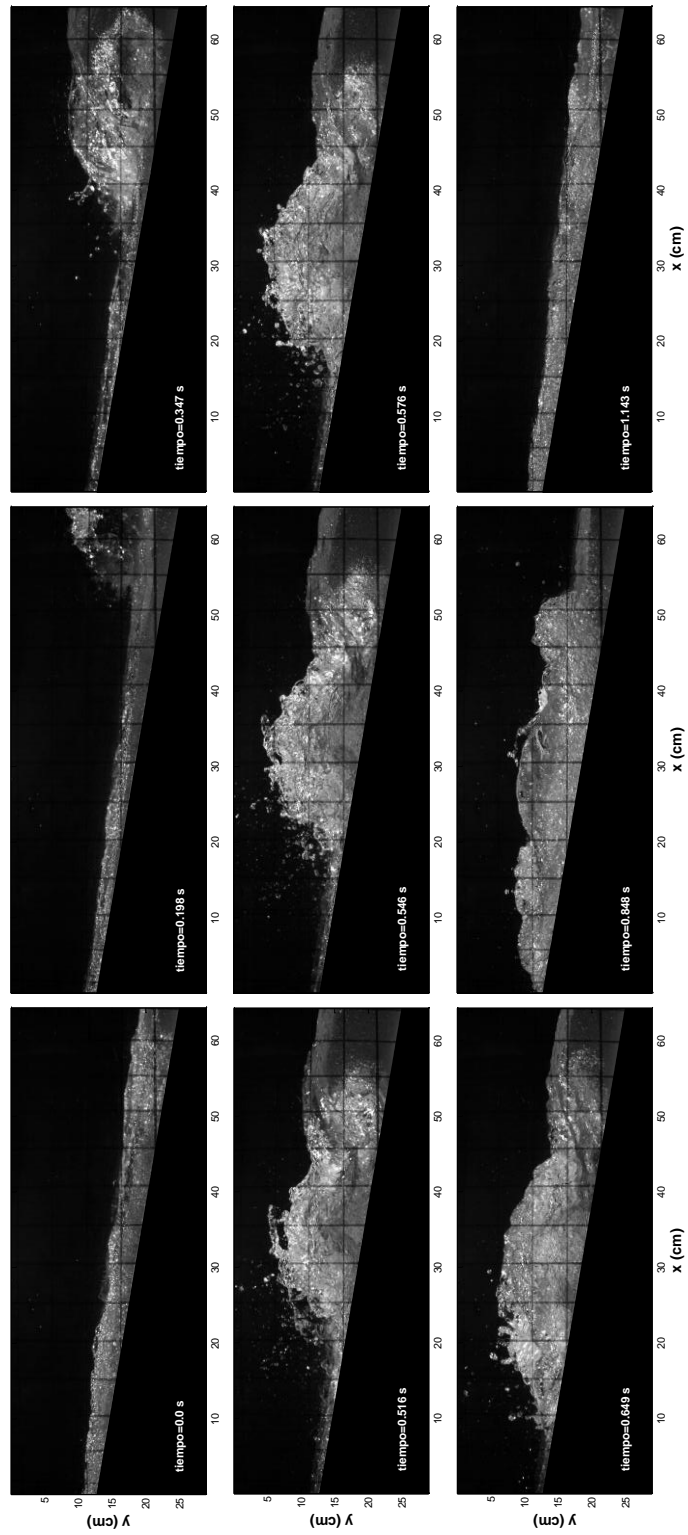


Figura A.45 Resultados de la componente vertical de la velocidad (H=17 cm; T=1.0 s).



**Figura A.46** Instantes no consecutivos de imágenes naturales para una ola en rotura (H=17 cm, T=1.2 s).

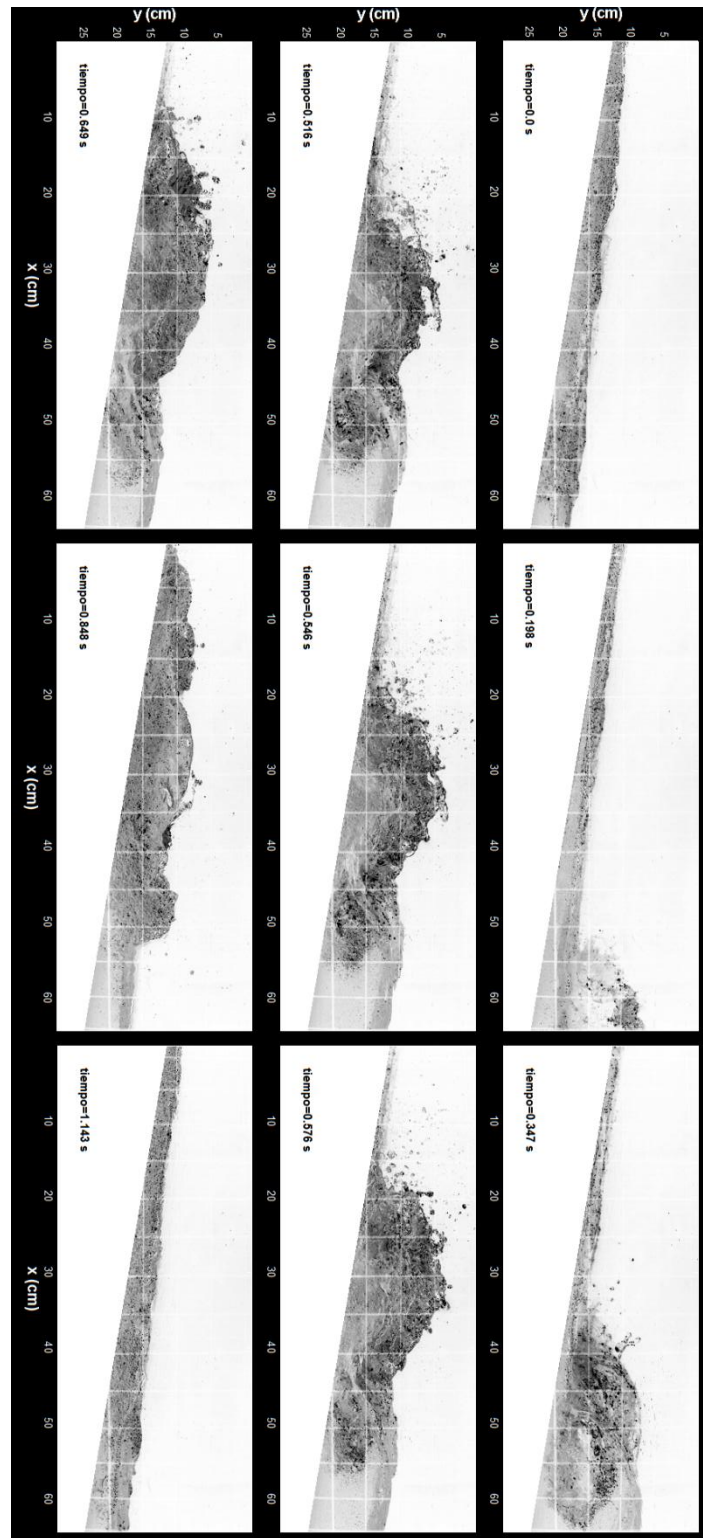
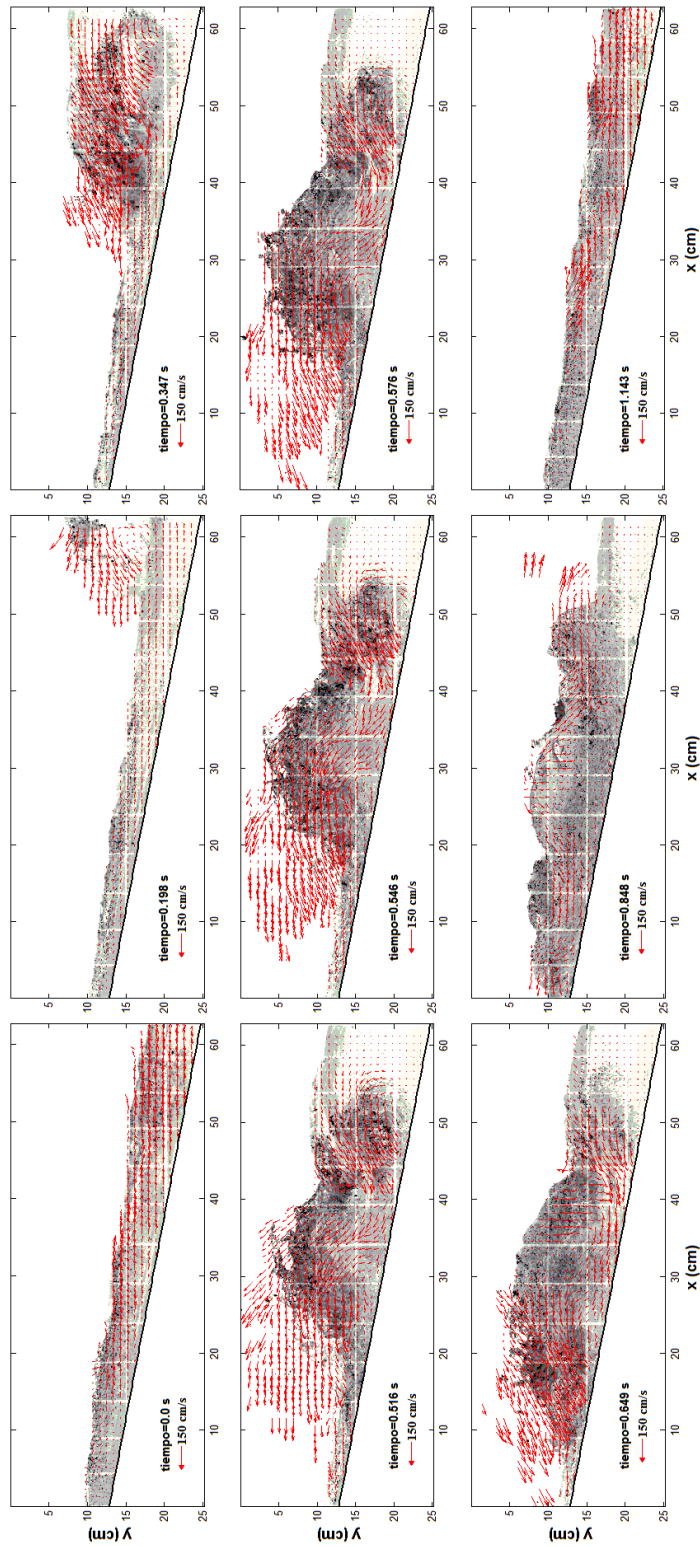
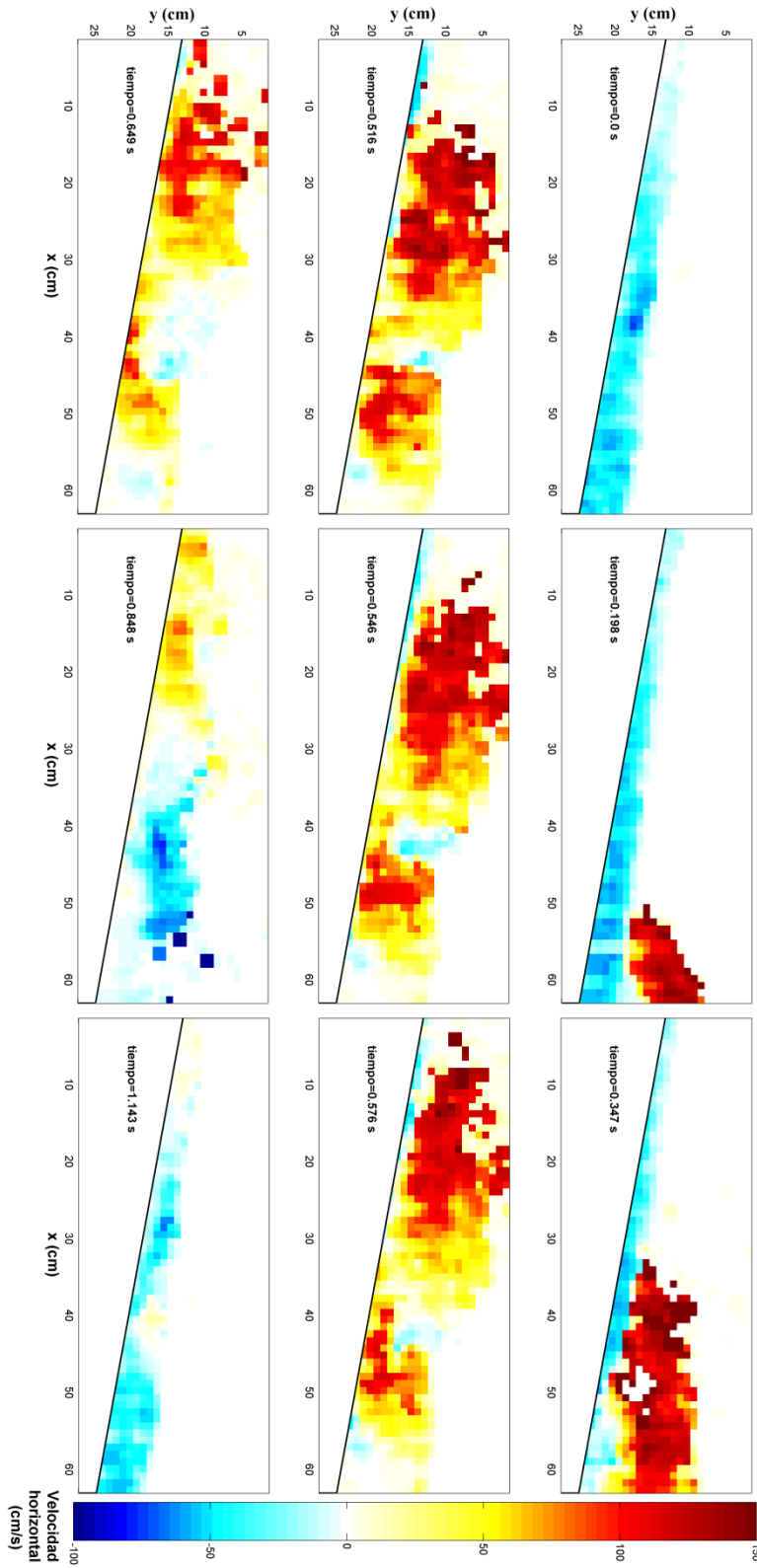


Figura A.47 Ejemplo de las imágenes procesadas con la técnica de inversión de color (H=17 cm; T=1.2 s).

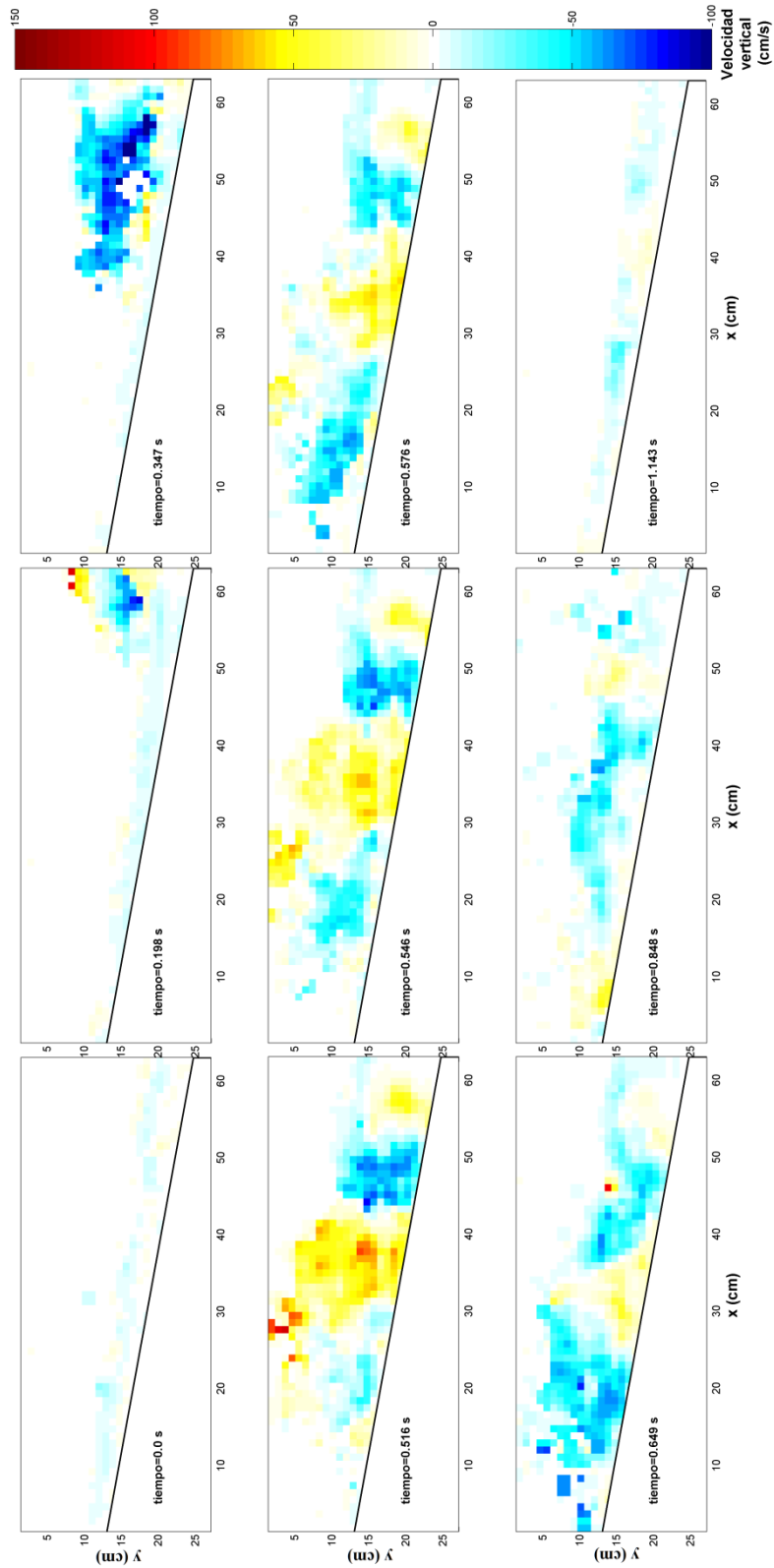


**Figura A.48** Instantes de campos de velocidad obtenidos con la técnica (BIV), para la fase de rotura en voluta (H=17 cm; T=1.2 s).

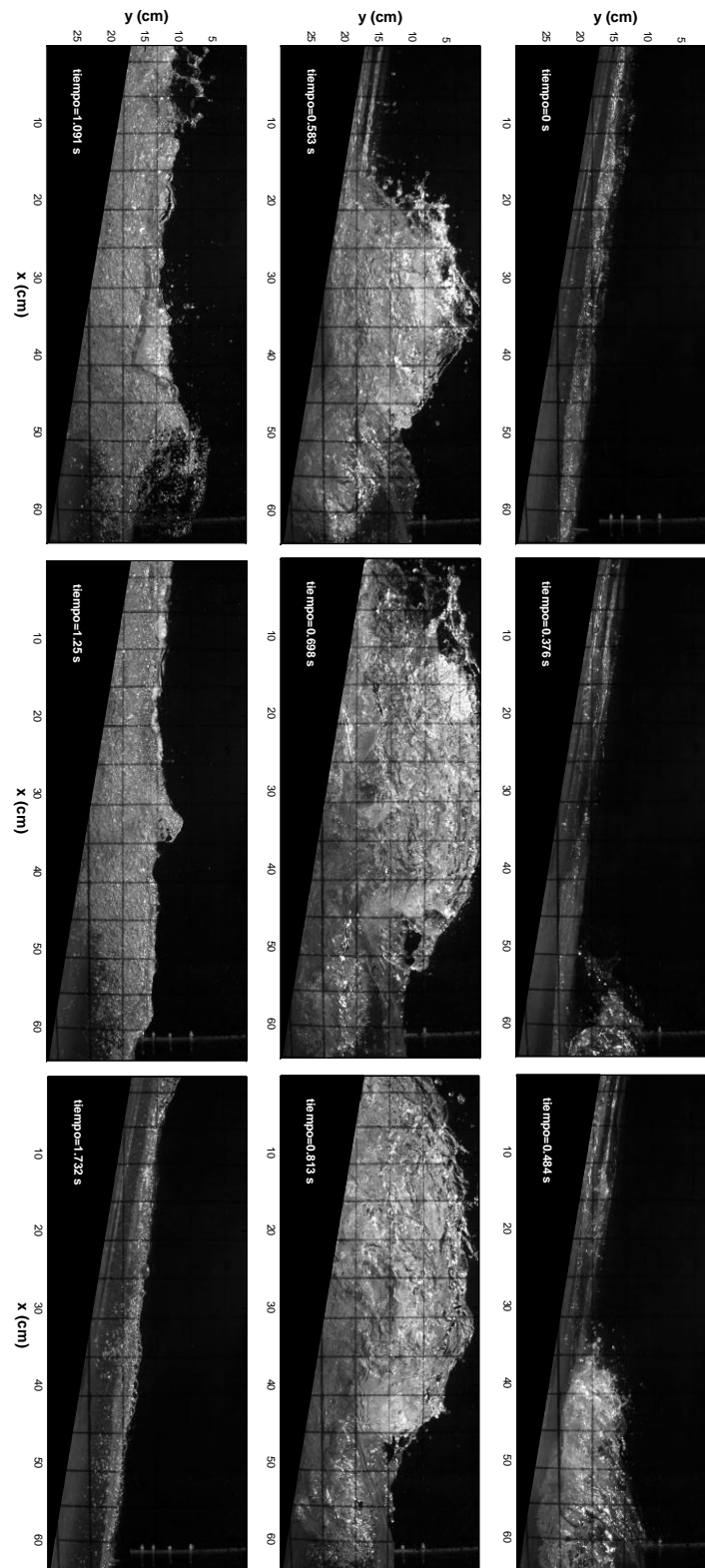


**Figura A.49** Resultados de la componente horizontal de la velocidad (H=17 cm; T=1.2 s).

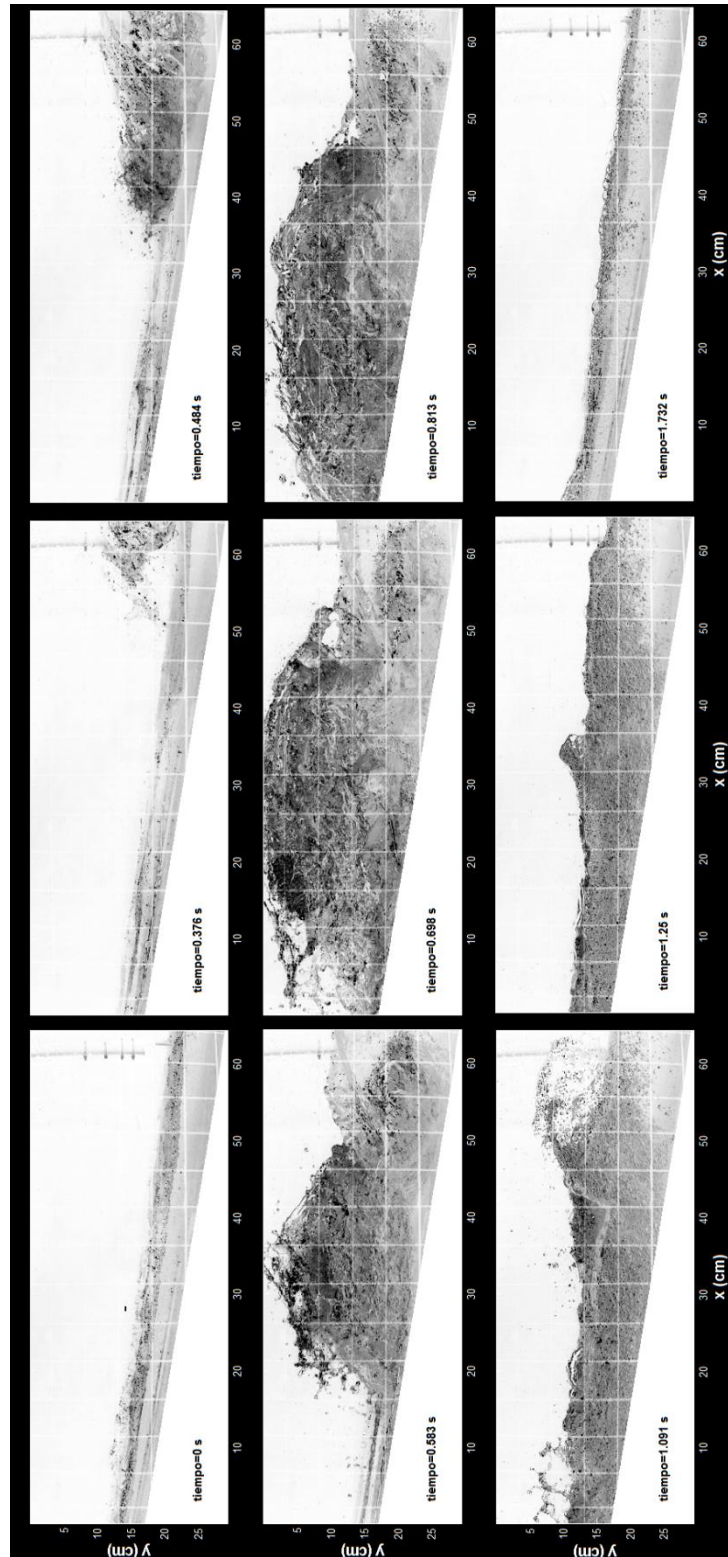




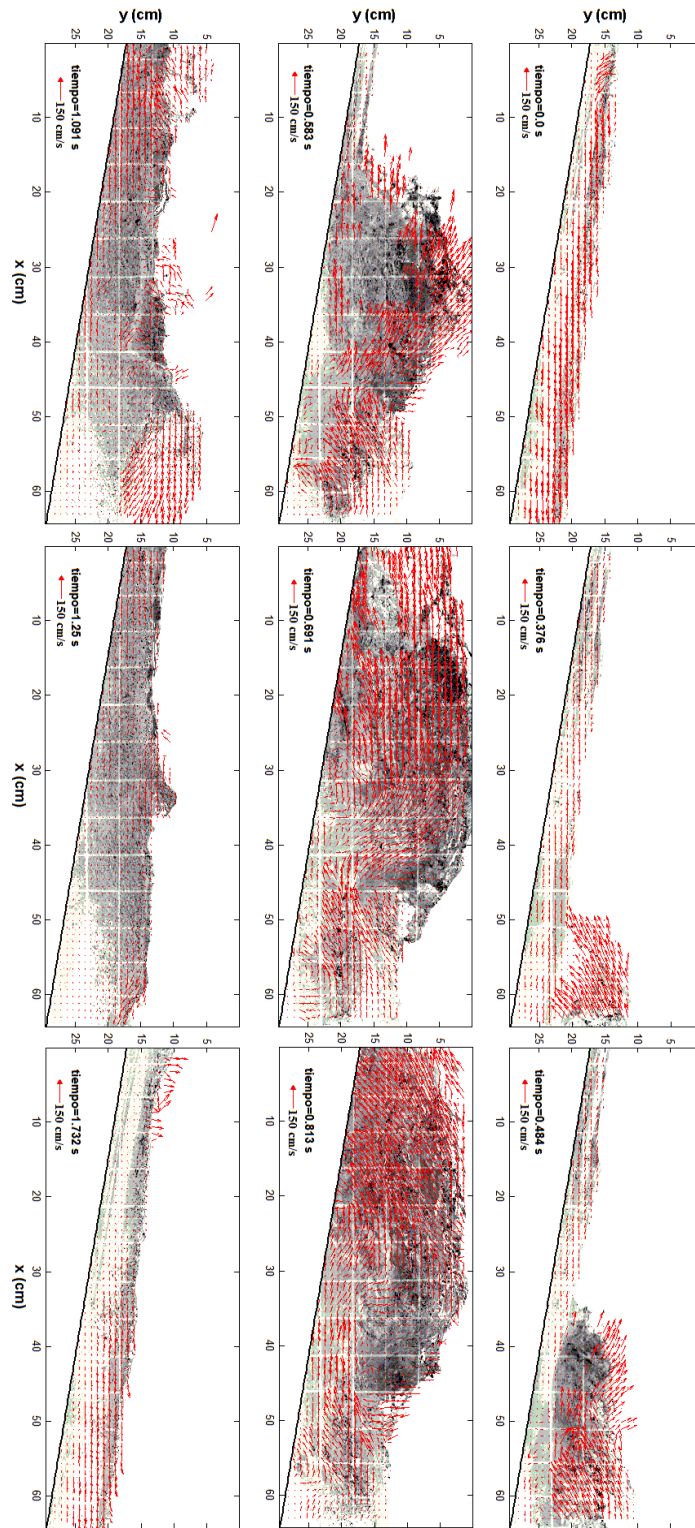
**Figura A.50** Resultados de la componente vertical de la velocidad (H=17 cm; T=1.2 s).



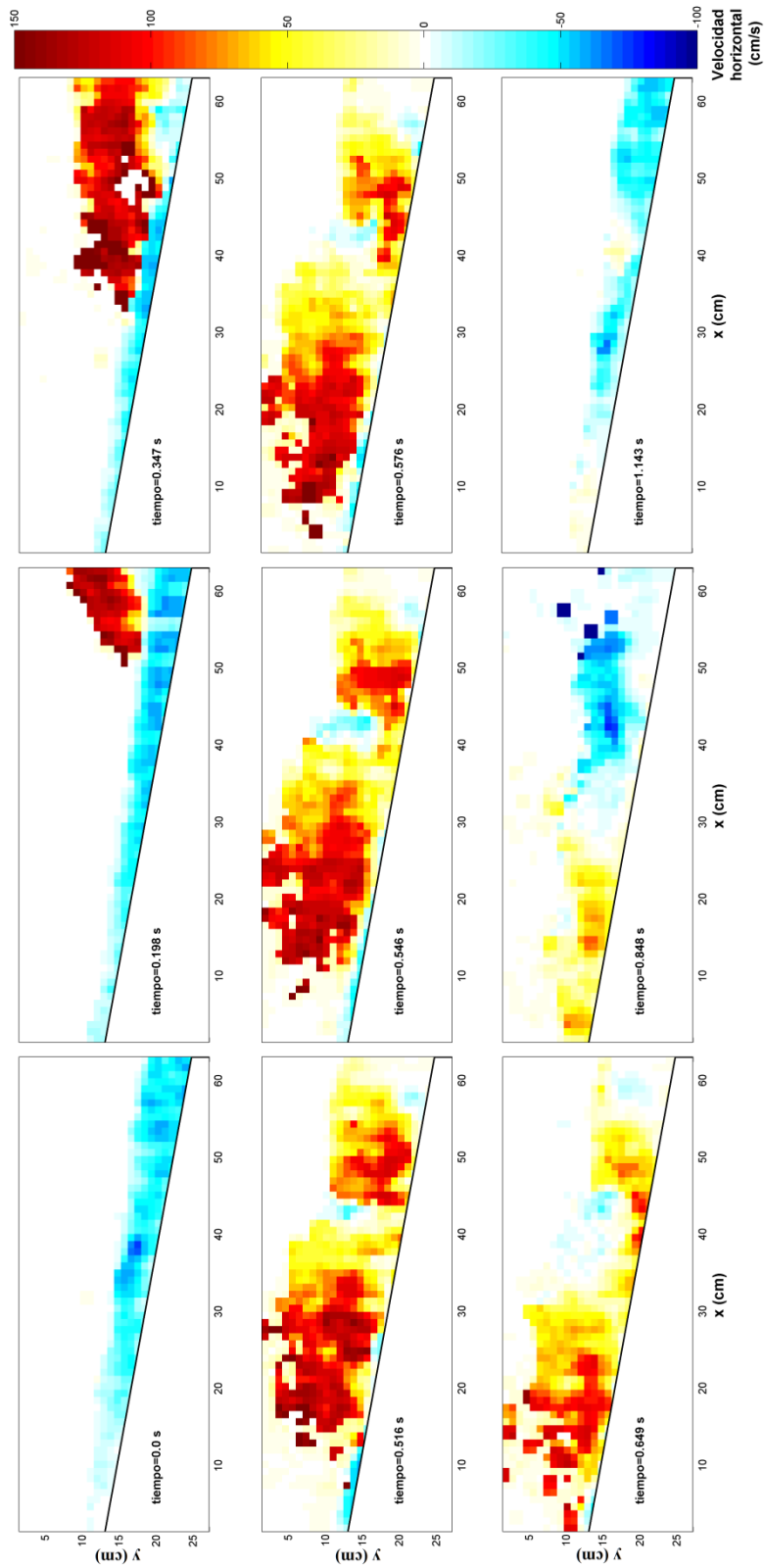
**Figura A.51** Instantes no consecutivos de imágenes naturales para una ola en rotura (H=18 cm, T=2.0 s).



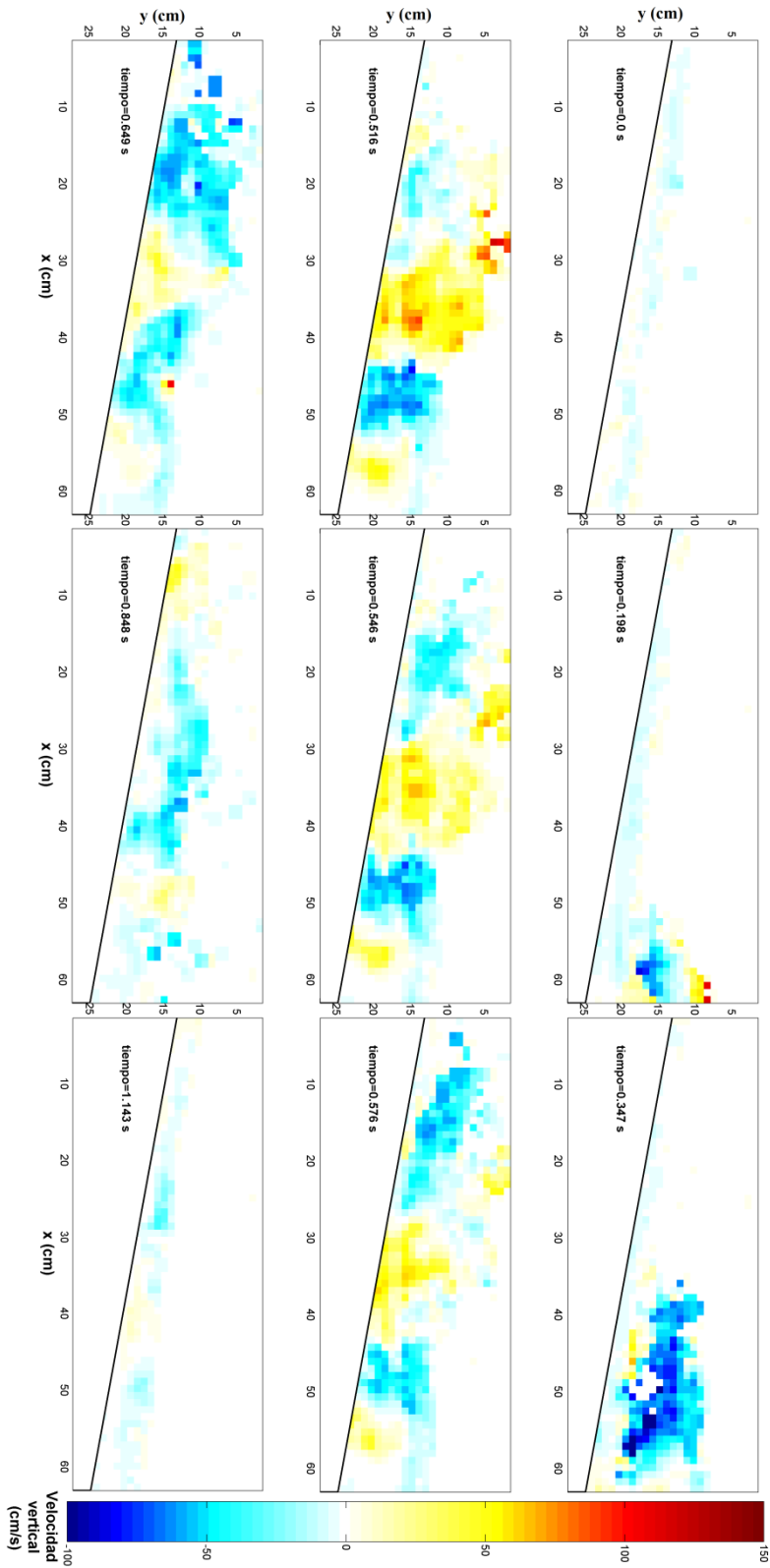
**Figura A.52** Ejemplo de las imágenes procesadas con la técnica de inversión de color (H=18 cm; T=2.0 s).



**Figura A.53** Instantes de campos de velocidad obtenidos con la técnica (BIV), para la fase de rotura en voluta (H=18 cm; T=2.0 s).



**Figura A.54** Resultados de la componente horizontal de la velocidad (H=18 cm; T=2.0 s).



**Figura A.55** Resultados de la componente vertical de la velocidad (H=18 cm; T=2.0 s).